


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВЯТСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ»

На правах рукописи



Лопатин Олег Петрович

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ
ЭМУЛЬСИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ
ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЕ**

Специальность: 05.04.02 – тепловые двигатели

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант -
доктор технических наук,
профессор В.А. Лиханов

Киров 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ В ДИЗЕЛЯХ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА.....	17
1.1 Социально-экологические аспекты применения альтернативных топлив для снижения токсичности ОГ дизелей.....	17
1.2 Физико-химические процессы и механизмы образования оксидов азота при горении альтернативных топлив.....	24
1.3 Моделирование физико-химических процессов образования оксидов азота в дизеле.....	46
1.4 Основные направления развития способов снижения содержания окси- дов азота в дизелях и перспективы их применения.....	65
1.5 Основные результаты и выводы по первой главе.....	93
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОК- СИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЕ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГА- ЗА И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ.....	96
2.1 Особенности химизма образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ.....	96
2.2 Модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при ра- боте дизеля на ПГ и СТЭ.....	109
2.3 Математическая модель расчета объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ.....	118
2.4 Теоретические исследования объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ.....	149
2.5 Основные результаты и выводы по второй главе.....	162
3 РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ И МЕТО- ДИК ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЯЕМЫХ ТОПЛИВ В ДИЗЕЛЕ.....	166
3.1 Объект исследований.....	166
3.2 Разработка программы проведения исследований рабочего процесса ди-	

зеля на ПГ и СТЭ.....	168
3.3 Методика исследований свойств СТЭ.....	172
3.4 Методика исследований влияния состава СТЭ на показатели рабочего процесса дизеля.....	174
3.5 Особенности экспериментальной установки исследований дизеля на ПГ и СТЭ.....	175
3.6 Методика обработки результатов исследований. Ошибки измерений.....	182
3.7 Основные результаты и выводы по третьей главе.....	184
4 СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЕ ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ГАЗА И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ...	186
4.1 Результаты экспериментальных исследований свойств альтернативных экологических энергоносителей для дизелей.....	186
4.2 Результаты экспериментальных исследований экологических и эффективных показателей дизеля при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от установочного у.о.в.т.....	191
4.3 Результаты экспериментальных исследований экологических и эффективных показателей дизеля при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от нагрузки.....	217
4.4 Результаты экспериментальных исследований экологических и эффективных показателей дизеля при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от частоты вращения.....	259
4.5 Основные результаты и выводы по четвертой главе.....	274
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЯ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ.....	278
5.1 Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля на ПГ и СТЭ по установочному у.о.в.т.....	278
5.2 Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля на ПГ и СТЭ на нагрузочных режимах.....	296
5.3 Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля на ПГ и СТЭ на скоростных режимах.....	316

5.4 Основные результаты и выводы по пятой главе.....	323
6 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЯ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ.....	326
6.1 Исследование тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ по установочному у.о.в.т.....	326
6.2 Исследование тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ по углу п.к.в.....	339
6.3 Исследование тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ на нагрузочных режимах.....	349
6.4 Исследование тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ на скоростных режимах.....	364
6.5 Основные результаты и выводы по шестой главе.....	371
7 ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТОКСИЧНОСТИ И ДЫМНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ, В УСЛОВИЯХ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	375
7.1 Нормирование выбросов токсичности и дымности ОГ дизелей.....	375
7.2 Расчет интегральной токсичности ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, на режимах испытательных циклов.....	379
7.3 Расчет интегральных значений дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации.....	387
7.4 Основные результаты и выводы по седьмой главе.....	389
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	394
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	398
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	400
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	447

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Проблема охраны окружающей среды от загрязнения токсичными продуктами, содержащимися в отработавших газах (ОГ), является одной из наиболее актуальных в современном мире. В настоящее время в мировом энергетическом балансе на первом месте по выработке мощности стоят двигатели внутреннего сгорания (ДВС) транспортных и транспортно-технологических машин. Общее количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу автотракторной техникой, более чем в три раза превосходит выбросы промышленных предприятий. При этом подавляющее большинство колёсных и гусеничных машин комплектуются дизелями, превосходящими бензиновые двигатели по суммарному выбросу вредных веществ.

С применением современных требований по токсичности для дизелей ужесточаются предельные нормы выбросов одного из наиболее токсичных компонентов ОГ – оксидов азота (NO_x). NO_x образуются в основном в результате диссоциации молекулярного кислорода на атомы с последующим окислением молекулы азота в зоне горения. Оксиды азота взаимодействуют с парами воды в воздухе и участвуют в образовании азотной кислоты, которая воздействует на легочную ткань человека, разрушает ее и вызывает многочисленные заболевания. Хроническое отравление NO_x вызывает воспалительные заболевания дыхательных путей, мышечную и сердечную слабость, хронические бронхиты, расстройства нервной системы.

Поэтому проблема снижения токсичности ОГ, в т.ч. снижение NO_x , с каждым днем становится всё более актуальной, а вопросы экологической безопасности топлив для тепловых двигателей приобретают все большую масштабность и востребованность. Естественно, это напрямую обусловлено тем, что существующие механизмы уменьшения токсичности ОГ ДВС уже не в состоянии (даже при массовом использовании) остановить все более прогрессирующее загрязнение воздушного бассейна выбросами загрязняющих веществ и парниковых газов, вызванное постоянно возрастающим парком автотранспортных средств. Так, для

снижения NO_x в ОГ дизеля изменяют организацию и состав подачи топлива, рабочий процесс, регулируют топливную аппаратуру, подают водяной пар или воду в камеру сгорания (КС), используют водо-топливные эмульсии, применяют рециркуляцию отработавших газов (РОГ), межцилиндровый перепуск ОГ, абсорбционную и адсорбционную очистку ОГ, каталитическую нейтрализацию и др. Но из-за различных механизмов образования NO_x и продуктов, получающихся в результате неполноты сгорания топлива, а также из-за разного их в ОГ агрегатного состояния часть перечисленных методов нейтрализации NO_x экономически не целесообразна, другие методы применимы только для тепловых двигателей с малым литражом, третьи характерны для бензиновых ДВС, некоторые вызывают только селективное действие на вредные вещества, а если удастся в результате определенных эксплуатационно-конструктивных действий улучшить экологические показатели ОГ по одним веществам (например, NO_x), то это неизбежно вызывает ухудшение по другим. Поэтому большинство рассмотренных способов, направленных на снижение NO_x в ОГ, не получили масштабного использования и требуют детального усовершенствования для конкретной модели дизеля.

С другой стороны, вследствие сокращения запасов нефтяных месторождений и волатильности цен на нефть и нефтепродукты все более остро ставится проблема дефицита моторного топлива нефтяного происхождения. Поиск новейших способов и перспективных технологий, направленных на улучшение экологических и энергетических показателей автотранспортных средств и изучение конкуренции различных видов топлива (дизельное топливо, природный газ, спирты, эмульсии и др.) по показателям экологической эффективности, может стать существенным шагом в активизации развития и применения альтернативных моторных топлив. Поэтому переход к альтернативным топливам, которые, в основном, не являются продуктами переработки нефти - перспективным направлением в борьбе за уменьшение содержания NO_x в ОГ тепловых двигателей.

Так, в последнее время в мире все больше средств и времени отводят на исследование, производство и применение альтернативных топлив. Основной целью

такой деятельности является расширение сырьевой базы, поиск энергоэффективных топлив и методов их рационального применения. Использование альтернативных топлив ставит перед нами задачу предсказания физико-химических свойств новых топлив или стандартного нефтяного топлива при применении присадок и добавок. Исследования на эту тему слабо освещаются в литературе. Рассмотрение этой проблемы только с помощью химической кинетики не позволяет раскрыть некоторые вопросы, крайне важные с точки зрения организации рабочего процесса теплового двигателя и изготовления альтернативного топлива.

Из изложенного выше и согласно указу Президента РФ от 07.07.2011 № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологии и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» исследования, направленные на улучшение экологических показателей дизелей путем снижения содержания оксидов азота в ОГ и экономии нефтяного моторного топлива являются приоритетными и актуальными, поскольку входят в «Приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации: п.8. Энергоэффективность, энергосбережение...» и в «Перечень критических технологий Российской Федерации: п.15. Технологии новых и возобновляемых источников энергии... и п. 27. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе».

Степень разработанности. Весомый вклад в исследования, направленные на применение альтернативных топлив не нефтяного происхождения с целью улучшения экологических показателей тепловых двигателей внесли А.А. Абрамзон, С.А. Абрамов, В.С. Азев, Ю.П. Алейников, Д.Г. Алексеев, Е.Е. Арсенов, Ю.Н. Васильев, А.Б. Виппер, А.И. Гайворонский, Ю.В. Галышев, К.И. Генкин, М.П. Гиринович, В.А. Гладких, Л.Н. Голубков, И.И. Гольдблат, А.Н. Гоц, Л.В. Грехов, А.А. Гуреев, С.В. Гусаков, С.Н. Гуцин, А.М. Данилов, С.Н. Девянин, К.Е. Долганов, В.И. Ерохов, А.А. Ефанов, В.А. Звонов, А.А. Зенин, А.А. Зинченко, Л.С. Золоторевский, В.А. Иванов, Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе, В.Г. Камалтдинов, Г.М. Камфер, В.В. Карницкий, А.Н. Карташевич, А.П. Картошкин, А.В. Козлов, И.М. Коклин, Г.С. Корнилов, Н.В. Кострюкова, М.Н. Кочетков,

В.А. Кудрявцев, А.С. Кулешов, Р.Ш. Кулиев, А.Р. Кульчицкий, В.Ф. Кутенев, С.Р. Лебедев, М.О. Лернер, В.А. Лиханов, В.М. Луканин, В.А. Лукшо, П.Д. Лупачев, В. Лютко, В.В. Макаров, Р.В. Малов, В.И. Мальчук, В.А. Марков, А.П. Марченко, Д.Д. Матиевский, В.З. Махов, В.П. Михеев, Т.Н. Митусова, К.А. Морозов, А.В. Николаенко, Н.В. Носенко, А.М. Обельницкий, С.Н. Онойченко, Ю.В. Панов, Н.Н. Патрахальцев, Н.Г. Певнев, М.Р. Петриченко, С.А. Плотников, Е.Г. Пономарев, В.М. Попов, А.А. Равкинд, М.Ю. Ратькова, П.А. Ребиндер, Г.С. Савельев, А.М. Сайкин, Г.И. Самоль, Ю.Б. Свиридов, А.Е. Свистула, В.Г. Семенов, С.М. Сивачёв, В.Ф. Смаль, А.С. Теренченко, Г.А. Терентьев, А.Е. Торопов, В.М. Тюков, А.П. Уханов, Т.Р. Филипосянц, В.М. Фомин, А.С. Хачиян, Е.В. Шатров, М.Г. Шатров, И.Г. Шишлов, В.А. Шишков, Б.А. Энглин, В.В. Эфрос, А. Al-Sarkhi, J. Chen, С.Е. Goering, W. Heinrich, M. Kamel, G.A. Karim, S.S. Kim, G. Knothe, J. Krahl, Lyford-Pike, Y.D. Mikalsen, R.H. Miller, T. Murayama, T. Myo, R.R. Raine, O. Ribeiro, A.R. Schroeder, H. Shimoda, S.C. Sorenson, M. Tsukahara, A. Tsunoda, K.S. Varde, R. Wang, Y.D. Wang, A. Witt, Y. Yoshimoto, G. Zhang, Y. Zhao и др.

Углубленный анализ результатов научных исследований показывает, что исследователями разработаны предпосылки, проведены глубокие экспериментальные работы по вопросам использования альтернативных топлив в тепловых двигателях. Вместе с тем необходимо отметить, что практически нет исследований, направленных на сравнительные испытания дизеля рабочим объемом до 5 литров, работающего на природном газе (ПГ), ПГ с различными степенями РОГ и спирто-топливных эмульсиях (СТЭ), проведенные с должным учетом взаимосвязи экологических и эксплуатационных показателей и определением объемного содержания и массовой концентрации NO_x в цилиндре и ОГ.

Вопросам образования оксидов азота при горении посвящено большое число исследований, первенствующие из них – это работы А.И. Атрощенко, Р.Б. Ахмедова, В.И. Бабия, С.А. Батурина, Ю. Варнатца, С.И. Ганзы, А.Н. Гоца, О.И. Жегалина, В.А. Звонова, А.В. Зонова, Я.Б. Зельдовича, З.Р. Кавтарадзе, Р.З. Кавтарадзе, В.Ф. Копытова, А.Р. Кульчицкого, В.Ф. Кутенева, В.А. Лиханова, А.С.

Лоскутова, Р.В. Малова, А.М. Маркевича, В.А. Маркова, В.З. Махова, А.А. Отса, В.В. Померанцева, Н.Ф. Разлейцева, Ю.П. Райзера, А.Д. Рослякова, Ю.И. Рябинина, П.Я. Садовникова, А.М. Сайкина, Т.Ю. Саловой, Н.Н. Семёнова, Я.И. Сигала, В.И. Смайлиса, Н.И. Тамма, В.А. Туркина, Д.А. Франк-Каменецкого, В.В. Фурсы, R.L. Andrews, J.P. Appleton, F. Bachmaier, M.C. Branch, G. Desolte, K. Eberins, R.S. Elagan, P. Eyzat, C.P. Fenimore, S. Galant, G. Greeves, J.C. Guibet, G. Häfner, R.S. Harries, H.R. Hazard, B.S. Haynes, J.B. Heywood, J.B. Homer, A. Imamura, D. Iverach, T. Just, E. Kaizer, W.E. Kaskan, J.C. Keck, J.M. Khan, G.A. Lavoie, G.C. Lugas, P.C. Malte, J. Matsui, J.A. Miller, T. Miyanchi, J. Mori, M. Nasfall, T. Nomaguchi, K. Pattas, D.T. Pratt, J. Sataronis, S.C. Schidt, G.W. Siegmund, M.M. Sutton, D.W. Turner, K.S. Varde, C.H. Wang, A. Williams и др.

Анализ представленных физико-кинетических исследований образования оксидов азота не дает достаточно полную оценку о составе компонентов и радикалов, принимающих участие в образовании NO_x в цилиндре дизеля (ЦД), работающего на альтернативном топливе, что не позволяет без проведения дополнительных исследований достаточно подробно описать физико-химические процессы, происходящие в ЦД, и представить на их основании модель расчета NO_x в дизеле, работающем на ПГ, ПГ с различными степенями РОГ и СТЭ.

Цель и задачи исследования. Цель – улучшение экологических показателей автотракторного дизеля с камерой сгорания типа ЦНИДИ и экономия нефтяного моторного топлива путем разработки теоретических основ процесса образования оксидов азота и их снижения, изменения конструктивных и регулировочных параметров при работе на природном газе и спирто-топливных эмульсиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

- разработать математическую модель расчета объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- провести теоретические исследования объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;
- разработать химизм процесса образования оксидов азота при работе дизе-

ля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- разработать модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- провести экспериментальные исследования и оценить сравнительное воздействие применения ПГ, ПГ с РОГ, СТЭ и регулировочных параметров как методов снижения токсичности на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ;

- оценить влияние режимов работы дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ;

- определить оптимальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- оценить верификацию сочетания выполненных по разработанной модели теоретических расчетов объемного содержания оксидов азота с результатами экспериментальных исследований при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- оценить интегральную токсичность и дымность ОГ дизеля, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации;

- разработать рекомендации по снижению содержания оксидов азота в ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ для обеспечения улучшенных экологических показателей и экономии нефтяного топлива.

Научную новизну представляют:

- математическая модель расчета объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- химизм процесса образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- результаты экспериментальных исследований влияния ПГ, ПГ с РОГ, СТЭ и регулировочных параметров на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ;

- экспериментальные зависимости влияния режимов работы дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ;

- оптимальные экспериментальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ дизеля при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- результаты исследований интегральной токсичности и дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации;

- рекомендации по снижению содержания оксидов азота в ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ для обеспечения улучшенных экологических показателей и экономии нефтяного топлива.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- представлены теоретические положения и результаты экспериментальных исследований новых научно обоснованных технических и технологических перспективных решений по улучшению экологических показателей автотракторного дизеля с камерой сгорания типа ЦНИДИ и экономии нефтяного моторного топлива;

- экспериментально получены оптимальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и

массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- предложены химизмы и разработана математическая модель, позволяющая теоретически без дорогостоящих экспериментальных исследований определять объемное содержание оксидов азота и оценивать их влияние на эффективные и экологические показатели дизеля в широком диапазоне его работы как на дизельном топливе, так и на альтернативном (ПГ, ПГ с различными степенями РОГ и СТЭ);

- представлены результаты исследований интегральной токсичности и дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации доказывающие соответствие его требованиям ГОСТ 17.2.2.05-97, ГОСТ 17.2.2.02-98 и Правилам ЕЭК ООН №96;

- разработаны рекомендации по снижению содержания оксидов азота в ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ для обеспечения улучшенных экологических показателей и экономии нефтяного топлива;

- материалы диссертации используются в учебном процессе при изучении дисциплин аспирантуры по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника» (направленность программы 05.04.02 «Тепловые двигатели»); бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 23.03.03, 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.01 «Технология транспортных процессов», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия» в Вятской, Костромской, Нижегородской, Чувашской государственных сельскохозяйственных академиях и Казанском государственном аграрном университете;

- по результатам проведенных исследований на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА создан макетный образец трактора МТЗ-80, переоборудованный для работы ПГ и СТЭ, который при работе на ЭТЭ прошел эксплуатационные испытания в ЗАО племзавод «Октябрьский» Кировской области;

- результаты исследований рассмотрены и рекомендованы:

- Министерством сельского хозяйства и продовольствия Кировской области к внедрению в предприятиях, занимающихся производством и переработкой продукции сельского хозяйства;

- ООО «Газпром межрегионгаз Киров» для использования при переводе техники для работы на природном газе;

- ОАО «КировПассажирАвтотранс» для использования в производстве при переводе действующего автотранспортного парка для работы на природном газе.

Методология и методы исследования. В теоретических исследованиях использовались законы термодинамики, горения, теплотехники, аэродинамики, электротехники и теоретической механики. При экспериментальных исследованиях применялись общеизвестные методики и разработанные на их базе частные, основанные на современных методах проведения стендовых испытаний дизелей с обработкой экспериментальных данных с помощью математической статистики с использованием передовых компьютерных программ.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований влияния ПГ, ПГ с РОГ, СТЭ и регулировочных параметров на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ;

- математическая модель расчета объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- химизм процесса образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- экспериментальные зависимости влияния режимов работы дизеля на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепло-

выделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымность ОГ;

- оптимальные экспериментальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ дизеля при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ;

- результаты исследований интегральной токсичности и дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации;

- рекомендации по снижению содержания оксидов азота в ОГ дизеля при работе его на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ для обеспечения улучшенных экологических показателей и экономии нефтяного топлива.

Степень достоверности полученных научных результатов обуславливается:

- использованием общепризнанных закономерностей теории горения и окисления азота при горении топлив;

- применением поверенных и аттестованных современных средств измерения и испытаний, действующих отечественных и международных стандартов, опытом проведения испытаний по оценке мощностных, экономических и экологических характеристик дизелей;

- согласованием полученных результатов с известными данными.

Апробация результатов. Основные результаты и материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийских научных конференциях Вятской ГСХА (Киров, Вятская ГСХА, 2004-2007 г.г.); I-X Международных научно-практических конференциях «Наука – Технология – Ресурсосбережение» (Киров, Вятская ГСХА, 2008-2019 г.г.); Международных научно-практических конференциях «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения» (Йошкар-Ола, Марийский ГУ, 2007, 2011, 2014-2016 г.г.); Международной научно-практической конференции «Совершенствование технологий, средств механизации и технического обслуживания в АПК», (Чебоксары, Чувашская

ГСХА, 2004 г.); Всероссийских научно-технических конференциях «Наука - производство - технологии - экология» (Киров, Вятский ГУ, 2004, 2005 г.г.); Международной научно-технической конференции «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский ГАУ, 2004 г.); X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы управления качеством производства и эксплуатации автотранспортных средств», (Владимир, Владимирский ГУ, 2004 г.); Международных молодежных научных конференциях «Туполевские чтения» (Казань, КГТУ им. А.Н.Туполева, 2004, 2005 г.г.); Inzynieria Systemow Bioagrotechnicznych, (Plock, 2005); X Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей», (Владимир, Владимирский ГУ, 2005 г.); IV Международной научно-практической конференции «Автомобиль и техносфера» (Казань, КГТУ им. А.Н. Туполева, 2005 г.); IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные тенденции развития автомобилестроения в России» (Тольятти, Тольяттинский ГУ, 2005 г.); Международной научно-практической конференции «Основные итоги и приоритеты научного обеспечения АПК Евро-Северо-Востока», (Киров, НИИСХ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 2005 г.); Международной научно-практической конференции «Роль молодых ученых в реализации национального проекта «Развитие АПК» (Москва, МСХА им. К.А. Тимирязева, 2007 г.); Международной научно-практической конференции молодых исследователей «Наука и молодежь: новые идеи и решения» (г. Волгоград, Волгоградская ГСХА, 2008 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Вклад молодых ученых в отраслевую науку с учетом современных тенденций развития АПК» (Москва, Российская академия кадрового обеспечения АПК, 2008 г.); Международной научно-практической конференции «Энергетика предприятий АПК и сельских территорий: состояние, проблемы и пути решения» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский ГАУ, 2009 г.); VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Научное обеспечение развития сельских территорий» (Москва, ГУ по землеустройству, 2014 г.); Всероссийских ежегодных научно-практических конференциях «Обще-

ство, наука, инновации» (Киров, Вятский ГУ, 2014, 2015 г.г.); VII Всероссийской научно-практической конференции «Основные направления развития техники и технологий в АПК» (Княгинино, Нижегородский ГИЭУ, 2015 г.); VI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» (Ульяновск, Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина, 2015 г.); XVI Международной научной конференции «Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения» (Липецк, НП «Национальный фонд инноваций», 2015 г.); XIV Международной научной конференции «Наука в центральной России» (Липецк, ВНИИТиН, 2015 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние прикладной науки в области механики и энергетики» (Чебоксары, Чувашская ГСХА, 2016 г.); I Международной научно-практической конференции «Динамика механических систем» (Казань, Казанский ГАУ, 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Мобильная энергетика в сельском хозяйстве: состояние и перспективы развития» (Чебоксары, Чувашская ГСХА, 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Prospects of development of agrarian sciences» (ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА, г. Чебоксары) 2019 г.

Основные результаты и положения диссертационной работы опубликованы в 370 печатных работах, включая 5 монографий, 8 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, 50 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, патенты, работы на английском и польском языках.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в работе над диссертацией научному консультанту заслуженному работнику высшей школы Российской Федерации, заведующему кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, доктору технических наук, профессору Лиханову В.А., а также сотрудникам кафедры: кандидатам технических наук, доцентам Деветьярову Р.Р., Романову С.А., Торопову А.Е. и Чупракову А.И., оказавших помощь и участие в выполнении отдельных этапов работы.

1 ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ В ДИЗЕЛЯХ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА

1.1 Социально-экологические аспекты применения альтернативных топлив для снижения токсичности ОГ дизелей

Обращение к альтернативным топливам как одной из основ перспективной мировой энергетики стало логичным результатом исторического развития и осознания необходимости диверсификации используемых первичных источников энергии с целью повышения энергетической и экологической безопасности стран, регионов и конкретных потребителей энергии [1-3]. Кроме того, по прогнозам к 2020 г. годовое потребление энергоресурсов составит 18-20 млрд т в нефтяном эквиваленте [4-6]. Так, вследствие осложняющейся экологической обстановкой, которая непосредственно связана с ростом работающих на нефтяном топливе энергоустановок, и неопределенности курса ценообразования на нефтепродукты проводятся интенсивные поиски альтернативных источников энергии [7-10].

Поскольку автомобильный транспорт является одним из глобальных загрязнителей окружающей среды и потребителем нефтяных топлив, анализ социально-экологических проблем, возникающих при его использовании, доказывает актуальность проблемы сохранения чистоты атмосферного воздуха от вредных выбросов, растущую с каждым годом [11-20]. На данный момент времени нефть - это основная сырьевая составляющая при производстве моторных топлив, на производство которых тратится около 50% всей нефти, которая добывается [21-23]. Так, по данным Международного энергетического агентства (рисунок 1.1) к 2020 году мировой энергетический спрос на нефть может достичь 5000 млн т (около 100 млн баррелей в сутки), а к 2030 году уже 5700 млн т (около 114 млн баррелей в сутки), а по прогнозам ОПЕК к 2025 году мировая потребность в нефти может достичь 118 млн баррелей в сутки. Следовательно, можно говорить о предстоящем дефиците нефти.

Неблагоприятная экологическая обстановка, существующая в настоящее время не только в стране, но и в мире; неопределенность в вопросах ценообразования на нефть и нефтепродукты; введение в РФ Европейских норм на ограничение выбросов вредных веществ с ОГ; увеличение наказания за выбросы диоксида углерода CO_2 ; стимулирование применения ПГ и возобновляемых источников энергии – все это делает все более актуальными исследования, направленные на получение и применение альтернативных возобновляемых энергоресурсов.

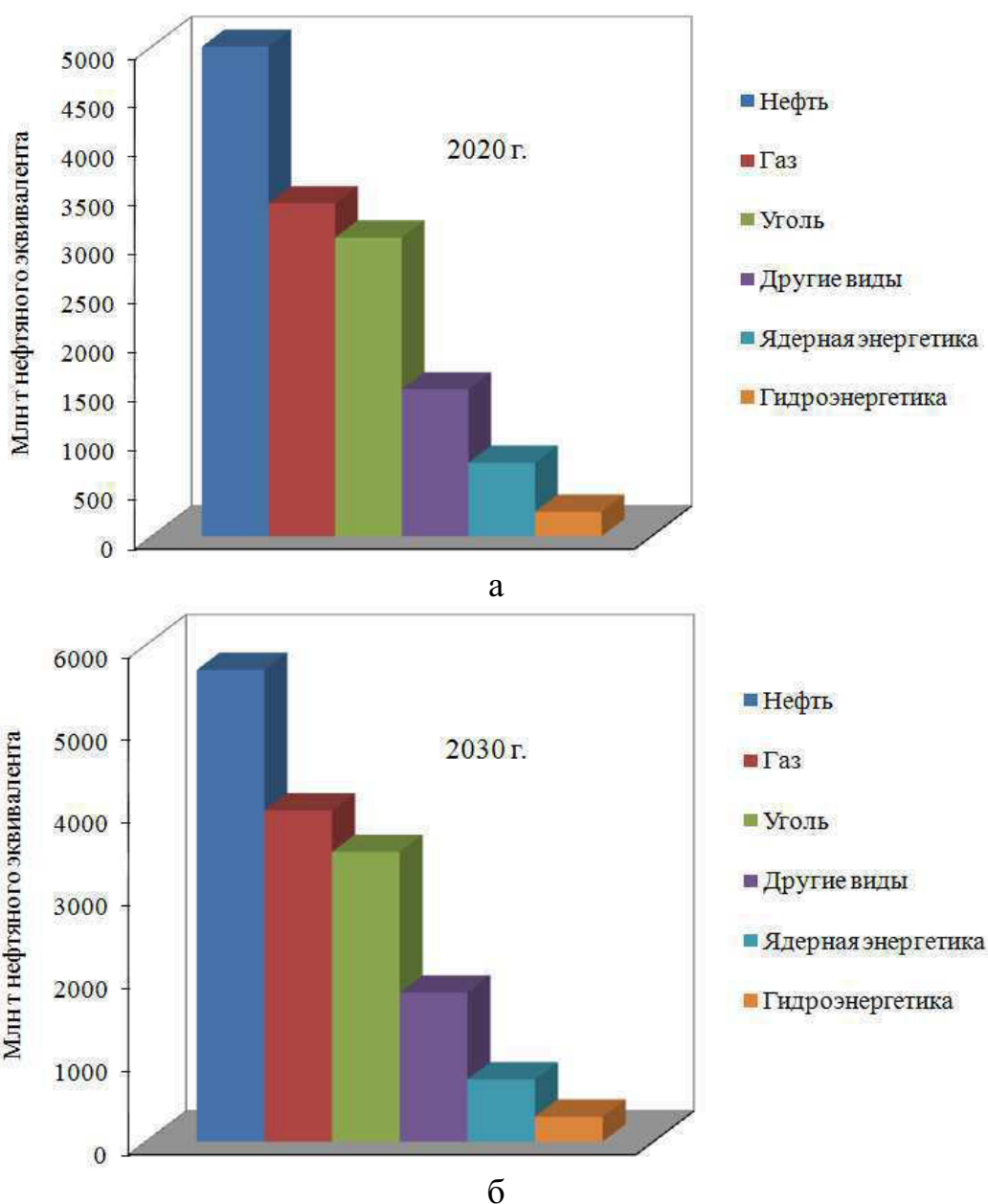


Рисунок 1.1 - Прогноз мирового энергетического спроса (по данным Международного энергетического агентства): а – 2020 г.; б – 2030 г.

Постоянное повышение требований к нормативам содержания вредных веществ в ОГ и к топливной экономичности заставляют исследователей искать различные пути для разработки принципиально новых силовых установок, которые соответствовали бы самым жестким мировым нормам в области экологии и качества моторных топлив [19-24].

Представим основные виды альтернативных энергоносителей и способы их применения для мобильных силовых установок в виде схемы так, как это видно на рисунке 1.2.

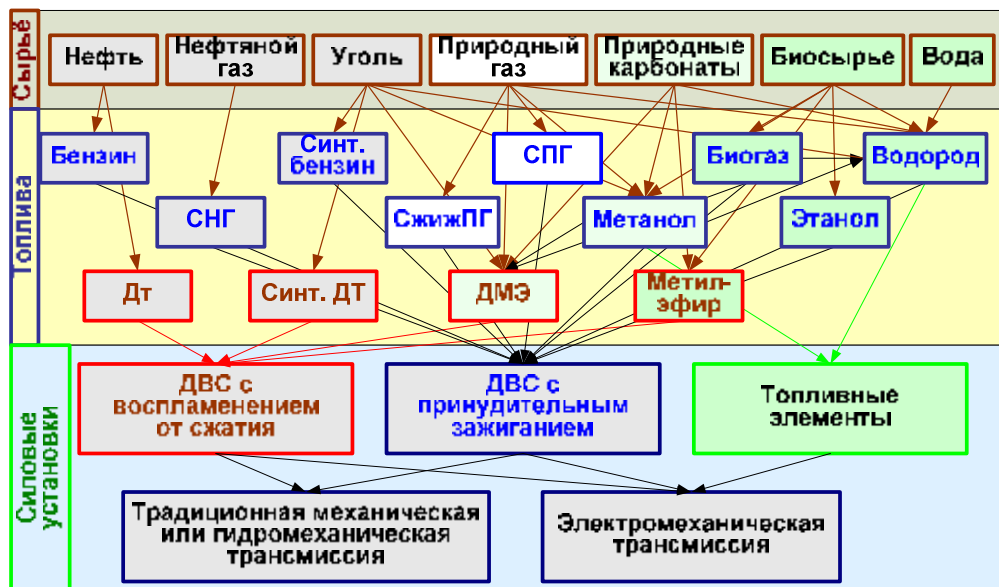


Рисунок 1.2 - Альтернативные энергоносители, их виды и способы применения для мобильных силовых установок

В мире в качестве энергетических силовых установок используются миллионы тепловых двигателей, которые вырабатывают более 85% энергии, но потребляют при этом огромное количество кислорода в год (более 1 млрд. тонн) и выбрасывают сотни миллионов тонн вредных веществ в атмосферу [25-87]. Поскольку дизели обладают меньшей эквивалентной токсичностью (в 1,5-2,0 раза по отношению к бензиновым ДВС), т.е. имеют определенное экологическое преимущество, и высокой топливной экономичностью (на 25-30%), то их можно рассматривать на предмет перспективности по отношению к другим типам тепловых двигателей во многих сферах хозяйственной деятельности человека. Но, к сожалению, из-за масштабного использования дизелей их выбросы увеличиваются с каждым годом, все больше загрязняя при этом окружающую среду [88-96].

ОГ тепловых двигателей содержат свыше 170 токсичных веществ, около 160 из которых это – производные углеводородов, прямо обязанные своим появлением неполному сгоранию топлива в двигателе. Присутствие токсичных компонентов в ОГ ДВС непосредственно связано с организацией процесса сгорания топлива и, конечно же, с его видом [97-100]. Количественный состав токсичных выбросов ОГ дизелей различного назначения характеризуется данными, приведенными в таблице 1.1, где также приведены класс опасности и значения предельно допустимых концентраций вредных веществ.

Таблица 1.1 - Основные характеристики токсичных выбросов ОГ дизелей

Компонент	Концентрация в ОГ	Класс опасности	ПДК, мг/м ³		
			в рабочей зоне	максимально-разовая	средне-суточная
NO _x (в пересчете на NO ₂), %	0,005-0,5	2	5	0,085	0,085
Оксид углерода, %	0,01-0,5	4	20	3	1
Углеводороды (в пересчете на CH ₄), %	0,1-1,5	2-4	5-300	1,4-200	1-2,5
Альдегиды (в пересчете на C ₃ H ₄ O), мг/м ³	1-10	2-3	0,2-5	0,01-3	0,01-5
Формальдегиды, %	0,002	3	0,5	0,035	0,003
Акролеин, %	0,0001	2	0,2	0,03	0,03
Бенз(α)пирен, мг/м ³	0,5-1	1	0,0001	-	1·10 ⁻⁶
Сажа, г/м ³	0,01-0,5	3	4	0,15	0,05

С применением современных требований по токсичности для дизелей ужесточаются предельные нормы выбросов одного из наиболее токсичных компонентов ОГ – NO_x. Концентрация NO_x в воздухе более 0,008% вызывает отек легких и представляет угрозу для жизни человека. Концентрация же оксидов азота в ОГ дизеля значительно превышает 0,1%.

Анализ количества выбросов токсичных компонентов (рисунок 1.3) показывает, что около 70% в суммарной токсичности ОГ дизеля приходится на NO_x.

Хроническое отравление NO_x вызывает воспалительные заболевания дыхательных путей, мышечную и сердечную слабость, хронические бронхиты, расстройства нервной системы. Оксидами азота поглощается естественная фоновая радиация, что приводит к снижению прозрачности атмосферы с образованием смога (фотохимического тумана), который состоит из озона и фотохимических оксидантов.

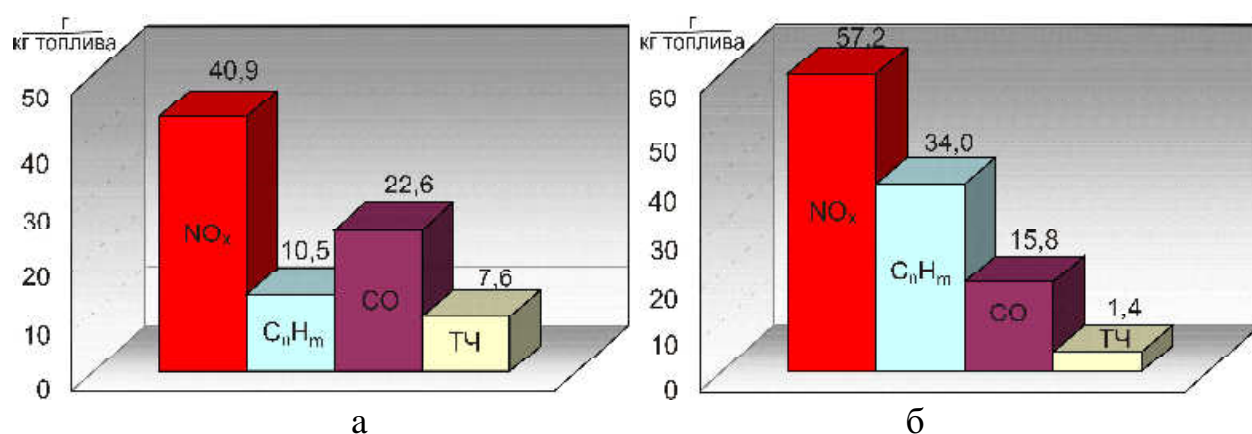


Рисунок 1.3 - Значимость выбросов токсичных компонентов ОГ дизелей:

а – усредненные выбросы вредных веществ ОГ дизелей;

б – усредненные выбросы вредных веществ ОГ ГД

Самыми перспективными топливами в ближайшее время эксперты считают ПГ [101, 102] из-за его запасов, в несколько раз превышающих нефтяные запасы, и спирты. С точки зрения экологической безопасности ПГ – это одно из предпочтительных топлив для ДВС, поскольку его применение позволяет в значительной мере снизить основные токсичные компоненты в ОГ (рисунок 1.4.) и, кроме того, практически полностью ликвидировать оксиды серы SO_2 и SO_3 в ОГ дизелей.

Не менее важное место в списке альтернативных топлив занимают спирты, такие как метанол (CH_3OH) и этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), для применения которых в силовых установках достаточно сырьевых ресурсов. Этиловый спирт широко используется в пищевой промышленности, парфюмерии, медицине, химической промышленности, на бытовые нужды, кожевенной промышленности, радиоэлектронике и, конечно же, в топливной промышленности. Метиловый спирт нашел большее применение в химической промышленности и немалые его объемы применяются в производстве топлив для силовых машин [103-110].

Применение этилового и метилового спиртов в качестве альтернативного энергоносителя для мобильных силовых установок стало возможным в результате получения их доступным способом из сельскохозяйственных и пищевых отходов, из газообразного топлива. Но более важная причина в применении метилового и этилового спиртов – это снижение выбросов токсичных компонентов с ОГ силовых машин. Это, скорее всего, объясняется тем, что при горении спиртов образуется меньшее количество промежуточных элементов, которые являются инициаторами и основателями образования ароматических и ацетиленовых углеводородов, способствующих активному формированию сажевых частиц. Кроме того, в ОГ при сгорании метилового и этилового спиртов значительно меньше (по отношению к ДП) различных соединений серы. Спирт со своей более простой структурой и незначительными размерами молекул является одним из определяющих факторов более «чистого сгорания» топлива [111-113].

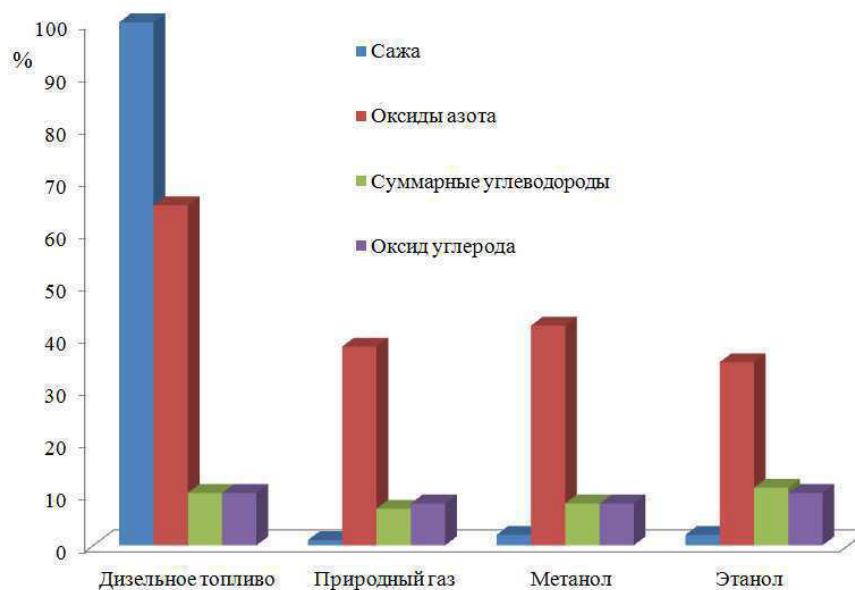


Рисунок 1.4 - Относительное содержание загрязняющих веществ в ОГ мобильных силовых установок, работающих на различных топливах, % (за 100% принято дизельное топливо по саже)

На рисунке 1.5 рассмотрены относительные величины затрат энергии при получении различных видов альтернативных топлив, показывающие соизмеримость затрат на получение метиловых спиртов (и менее этиловых) с затратами при получении биодизельных топлив и диметиловых эфиров, что позволяет им

претендовать на одну из ведущих ролей в месте альтернативных топлив для силовых установок [54].

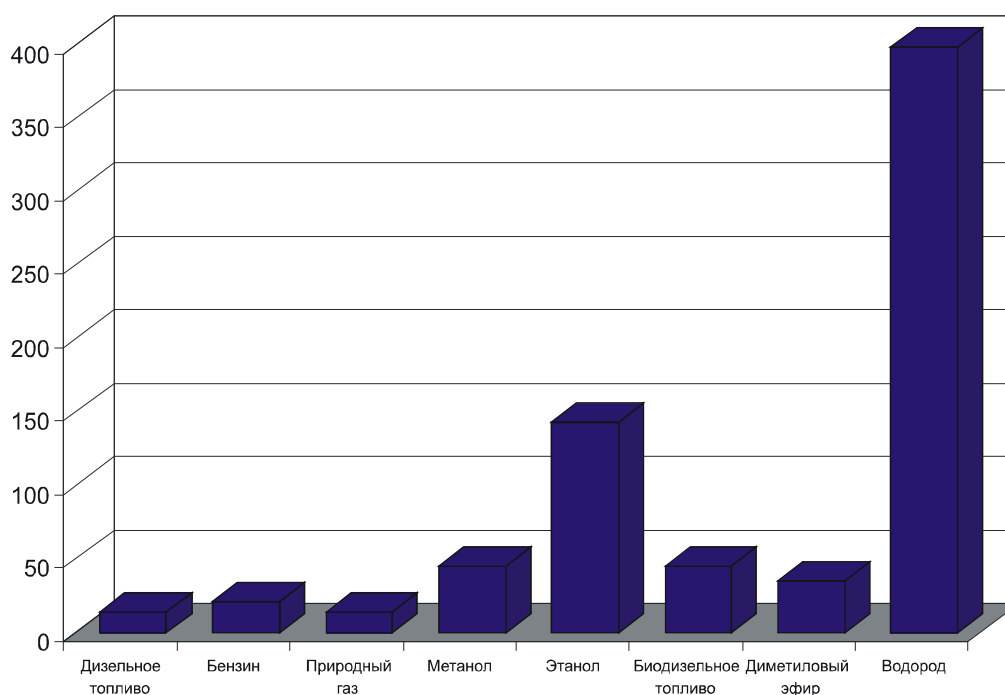


Рисунок 1.5 - Относительные величины затрат энергии при получении топлив (теплота сгорания топлива принята за 100%) [54]

Все более ухудшающаяся экологическая ситуация, особенно в населенных пунктах, заставляет развитые страны вводить нормативные ограничения на выбросы токсичности и дымности силовых установок мобильных энергетических средств. При этом постоянно разрабатываются и совершенствуются нормы не только в масштабах конкретного региона, страны, но и в рамках международных программ ЕЭК ООН. Наиболее приоритетными в настоящее время являются экологические требования к силовым агрегатам транспортных средств. При этом экологичность ОГ производители уже закладывают в конструкцию ДВС на стадии проектирования, причем она не должна ухудшаться при эксплуатации автомобиля. Целесообразно использовать другие источники энергии, но поскольку более 90% всех мощностей от энергетических установок в мире приходится на тепловые двигатели, необходимо принятие мер по их совершенствованию. Следовательно, не сложно предположить, что будущее за экологически чистыми ди-

зельными энергоустановками, работающими на альтернативных видах топлива не нефтяного происхождения.

1 января 2015 года вступил в действие ГОСТ ISO 8178-4-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания» [114]. Для ОГ ДВС, в т.ч. работающих на ПГ и сжиженном нефтяном газе, действуют единообразные предписания – Правила ЕЭК ООН №49 [115]. При разработке новых стандартов в России учтены требования международных стандартов МС ISO 8178, ISO 100154, ISO 11614 и UIC - Codex № 623-2 в части терминов и определений, методов испытаний, измерений и расчетов [114-125].

Анализируя рассмотренные вопросы загрязнения окружающей среды тепловыми двигателями можно сделать **вывод**, что при сохранении либо увеличении тенденций развития происходит рост нагрузки антропогенного воздействия силовых машин на окружающую среду. Следовательно, применение способов, позволяющих достаточно эффективно улучшать экологические показатели дизельных энергоустановок, - важная научная и практическая задача современности.

1.2 Физико-химические процессы и механизмы образования оксидов азота при горении альтернативных топлив

При изучении и расширении знаний учеными и исследователями разного уровня создана модель современного представления о процессах горения топлива в ЦД в виде последовательных этапов физико-химических превращений. Процесс образования NO_x в ЦД – это один из таких элементарных физико-химических процессов, требующий дальнейшего изучения с целью максимальной ликвидации NO_x в ОГ. По физической сущности можно выделить следующие виды NO_x : термические, быстрые и топливные (низкотемпературные) [126-140 и др.].

Термические NO_x являются наиболее изученными, основы их механизма образования представлены Я.Б. Зельдовичем [126]. Образование быстрых NO_x происходит непосредственно в ходе пламенных реакций, причем механизм их образования менее изучен. Механизм образования быстрых оксидов при сгорании

углеводородного топлива в ЦД изучали Кхан, Гривс, Ванг, Лукас [133, 134]. Ученые сделали вывод о минимальном вкладе быстрых оксидов в общий процесс образования NO_x . Причиной образования топливных NO_x является химически связанный азот топлива, который быстрее азота воздуха и в процессе пламенных преобразований легко становится лабильным и реакционноспособным, что инициирует дополнительные цепи образования NO_x [135].

Поскольку процесс образования NO_x в продуктах горения углеводородного топлива связан не только с окислением N_2 воздуха, но и с N_2 топлива, то необходимо отдельное рассмотрение каждого из этих механизмов.

Механизм образования термических NO_x . При горении наличие высоких температур приводит N_2 воздуха к реакционноспособному состоянию, в результате чего N_2 соединяется с кислородом, образуя NO_x в основном NO .

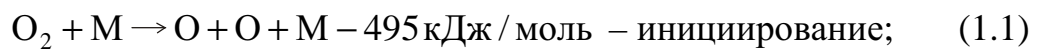
Основы термической теории образования NO , которая общепризнана во всем мире, разработаны отечественными учеными Я.Б. Зельдовичем, П.Я. Садовниковым, Д.Я. Франк-Каменецким [126]. Ученые исследовали научные разработки по следующим важнейшим вопросам. Первый сводился к решению проблемы определения сути образования NO как результата основных реакций горения, либо горение является лишь источником тепловыделения, которое обеспечивает высокую температуру. Второй заключался в определении структуры кинетического механизма образования оксида азота NO . Третий связан с предположением термического характера реакции окисления азота, который не зависит даже от состава топлива. Так, на примере горения H_2 и CO с O_2 и N_2 авторы [126] показали, что увеличение температуры горения пропорционально $\sqrt{\text{N}_2\text{O}_2}$ увеличивает количество NO , а отношение $\text{NO}/\sqrt{\text{N}_2\text{O}_2}$ равнозначно тепловой энергии топлива, содержащегося в смеси, и характеризуется энергией смеси и количеством энергии, которая была затрачена на подогрев. Таким образом, ученые на основании анализа проведенных опытов подтвердили термическую направленность механизма образования NO , и на ее основе была осуществлена разработка

термической теории образования NO_x в процессе горения углеводородного топлива. Основные тезисы которой выглядят следующим образом:

1. Окисление N_2 протекает за линией фронта пламени в области продуктов сгорания.

2. Количество NO характеризуется значением максимальной температуры горения, содержанием N_2 и O_2 в продуктах сгорания и не зависит от химической природы топлива, которое участвует в процессе.

3. Окисление N_2 протекает по цепному механизму взаимодействия атомов и молекул N_2 и O_2 по механизму, предложенному Н.Н. Семеновым:



В предложенном механизме уравнение (1.2) является основным, а его скорость определяется концентрацией атомов кислорода. Уравнение (1.1) является источником активных центров реакции диссоциации O_2 , а концентрация атомов кислорода зависит от условий равновесия реакции (1.1) и реакции (1.4):

$$\text{O} = C_{\text{O}} \sqrt{\text{O}_2}, \quad (1.5)$$

где C_{O} – постоянная равновесия реакций (1.1) и (1.4).

Поскольку C_{O} максимально зависит от температуры, поэтому и концентрация атомов кислорода, и выход NO , который также зависит от нее, характеризуются значениями максимальной температуры в зоне горения. На рисунке 1.6 представлены концентрации (равновесные) NO в продуктах горения ПГ при различных значениях температуры.

Наличие в смеси газов паров воды приводит к образованию NO по следующим уравнениям:



Лидирующее положение в механизме образования NO занимает уравнение

(1.2).

4. Количество NO определяется скоростью охлаждения («закалкой») продуктов сгорания.

5. В бедных смесях количество NO зависит от максимальной температуры взрыва, т.е. от кинетики её образования, а в богатых – уже менее зависит от максимальной температуры и ориентируется на кинетику разложений, т.е. «закалку» образовавшегося азота.

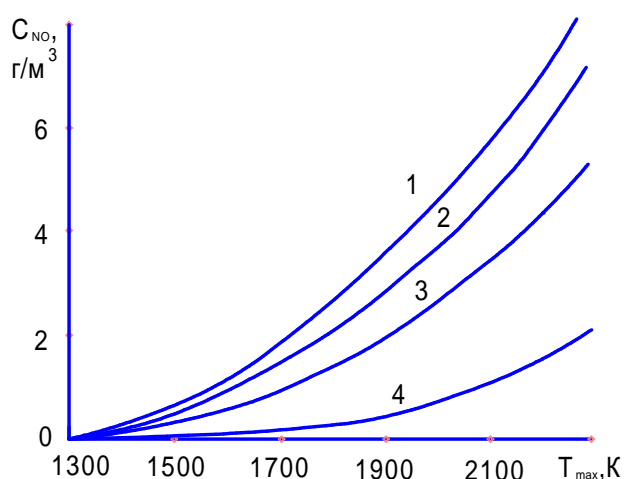


Рисунок 1.6 – Концентрация NO в продуктах горения ПГ при различных значениях температуры в зависимости от коэффициента избытка воздуха α [126]:
1 – $\alpha = 1,6$; 2 – $\alpha = 1,4$; 3 – $\alpha = 1,2$; 4 – $\alpha = 1,0$

Я.Б. Зельдович разработал теорию образования «термических» NO для двух крайних случаев подвижности реакции:

1 – не высокая подвижность (рисунок 1.6). При горении не успевает образовываться равновесная концентрация, что приводит к остановке реакции из-за охлаждения;

2 – высокая подвижность (рисунок 1.6). При горении достигается равновесная концентрация, но подвижность реакции не замедляется даже при охлаждении, что приводит к падению концентрации NO из-за его разложения.

Меру подвижности характеризует безразмерная величина, составленная из постоянной скорости обратной реакции – K_T , равновесного содержания – $[C_{NO}]_T$ и времени реакции – τ_p :

$$K_T [C_{NO}]_T \tau_p. \quad (1.8)$$

Не высокая подвижность, при $K_T[C_{NO}]_T \tau_P < 1$, выход оксидов азота равен критерию подвижности:

$$[\hat{C}_{NO}] = [C_{NO}]/[C_{NO}] = K_T[C_{NO}]_T \tau_P \quad (1.9)$$

Используя характерное время установления равновесной концентрации τ_{NO} , получим:

$$[\tau_{NO}]_{\max} = 1/(K_T[C_{NO}]_T) = (2,06 \cdot 10^{-12} / \sqrt{C_{N_2}}) - \exp[107500/(RT)]. \quad (1.10)$$

Из-за серьезного энергетического барьера реакций образование большей части NO, которая определяет его содержание в конечных продуктах сгорания, протекает при максимальных значениях температуры и является определяющей на некотором температурном диапазоне, называемого температурной ступенькой. Эту величину определяют с помощью введенной Д.А. Франк-Каменецким единицы температуры, соответствующей изменениям скорости реакции [141]:

$$RT_{\max}^2 / E \sim \Delta T, \quad (1.11)$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Здесь величина времени реакции определяется в виде интервала $\Delta\tau$, в котором поддерживается температурная ступенька. В результате более глубокого изучения было отмечено:

- в зоне максимальных температур в КС время пребывания реагентов обычно ниже равновесного;
- сверхравновесная концентрация O присутствует в пламени;
- вследствие присутствия теплообмена излучением и турбулентных пульсаций, увеличенного расходования теплоты на неравновесную диссоциацию значение температуры в ядре зоны горения значительно ниже теоретической.

По теории Я.Б. Зельдовича определяющими факторами процесса образования «термических» NO являются значения максимальной температуры и времени реакции, последнее характеризуется темпами охлаждения при максимальной температуре:

$$NO_X^{\text{терм}} = f_1(T_{\max} \tau_P) = f_2(T_{\max} \frac{dT}{d\tau}). \quad (1.12)$$

Время реакции является незначительной частью общего пребывания компонентов в КС. Количество же «термических» NO характеризуется значениями максимальных температур в области горения и отношением времени реакции ко времени установления равновесия. Время образования равновесной концентрации больше времени реакции, следовательно, количество образовавшегося в зоне горения NO будет меньше его равновесных значений.

Термическая теория Я.Б. Зельдовича получила подтверждение в многочисленных работах [127, 136, 137, 142-146 и др.]. Но проведенные в последние годы исследования теоретические и экспериментальные показывают, что NO может образовываться и по реакциям, которые отличаются от цепной схемы Я.Б. Зельдовича [138-140, 146, 147]. Так, в работах [139, 140, 146, 147] указывается на то, что при относительно не высокой температуре $T < 2000$ К образование NO происходит по механизму, в котором активные компоненты (инициаторы цепей образования NO) не только атомы O_2 , но и молекулы N_2O в углеводородных пламенах, радикалы гидроксила CN, HCN, NH, NH_2 и др.

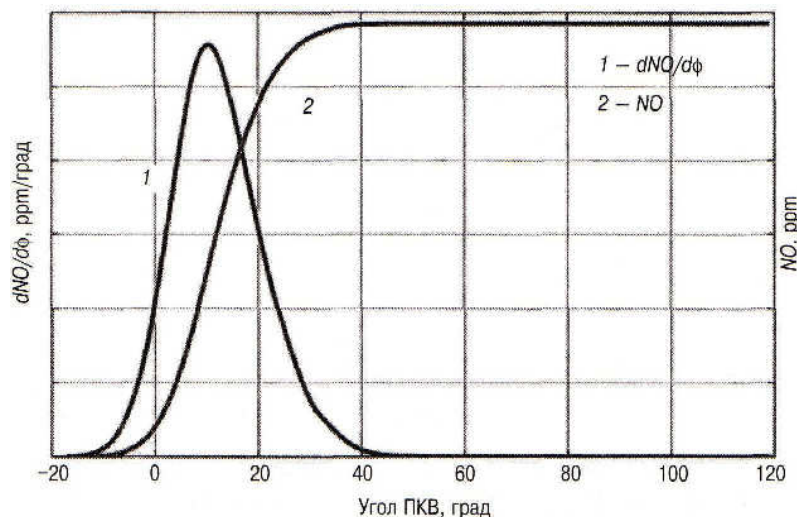


Рисунок 1.7 – Скорость образования и общая концентрация термического NO при сгорании газообразного топлива [148]

В материалах конгресса СИМАС 2010 [148] рассмотрены теоретические основы формирования термического NO в ДВС при сгорании газообразного топлива. Общий выброс термического NO в течение рабочего цикла вычислялся с помощью интегрирования скорости образования NO до момента открытия выпуск-

ных клапанов. Результаты расчета скорости образования NO и концентрации NO, соответствующие индикаторному давлению, представлены на рисунке 1.7.

В работе [149] Н.В. Лавров и др. описывают процесс окисления N_2 с участием радикала OH:



Хейвуд, Лавойе, Кек и Шоу [138, 150] считают, что для протекания уравнений (1.14) и (1.15) требуются тройные столкновения и они менее вероятны, поэтому авторы отдали предпочтение следующей реакции:

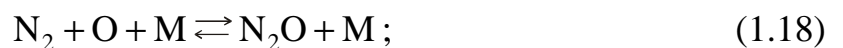


С.П. Фенимор [140] тоже отдает предпочтение реакции (1.16), но рассматривает получение радикала N по уравнению:



Уравнения (1.16, 1.17) присущи углеводородным пламенам, поскольку там велика вероятность соударения молекул N_2 с углеводородными радикалами CH. В работе [140] отмечается, что эти уравнения слабо зависят от температуры и в богатых смесях с $\alpha = 0,7 - 0,8$ могут дать максимальное количество NO.

В работе [151] П.С. Малте и Д.Т. Пратт проанализировав условия образования NO при сгорании бедных смесей CO_2 во влажной турбулизованной струе воздуха предложили схему образования NO с участием N_2O :



Выбирая ту или иную кинетическую схему уравнений необходимо руководствоваться физико-химическими условиями протекания процесса, видом топлива и составом смеси. Это легко заметить, анализируя представленные кинетические схемы уравнений. Одни уравнения при наличии паров воды в продуктах горения

дополняют цепной механизм Я.Б. Зельдовича (1.6, 1.7), другие позволяют увеличить подвижность механизма образования NO при не высоких температурах (1.13...1.15) и в бедных смесях (1.18...1.21), третьи применимы только для углеводородного пламени.

Большинство из рассмотренных уравнений применимы только в углеводородном пламени, так как анализ спектроскопических исследований [152] показывает наличие в них широкого набора радикалов, оказывающих влияние на процесс образования NO: C₂, CN, CH, NH, HCN, OH, кроме того, рост концентрации O₂ в продуктах горения уменьшает содержание HCN, CN, C₂, CH и увеличивает OH. Последнее скорее всего и характеризует существенный вклад уравнений (1.16, 1.17) при горении богатых смесей.

Имеются исследования по образованию NO и при горении МВС [128, 153-157 и др.]. Параметры, характеризующие образование «термических» NO при сгорании МВС, рассмотренные в работе [154], представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Показатели выхода NO при горении МВС

Параметр	Коэффициент избытка воздуха α		
	1,0	1,2	1,4
Теоретическая температура горения, К	2218	2036	1863
Диапазон температур (характеристический) реакции образования NO, К	73	61	51
Равновесное содержание реагентов, об. % :			
O ₂	0,5	3,0	5,3
N ₂	71,5	73,3	74,0
NO	0,16	0,27	0,22
Время образования равновесного содержания, с	0,030	0,30	4,0
Время реакции, с	0,012	0,016	0,020

Анализируя таблицу 1.2 можно отметить, что при горении МВС время реакции также всегда меньше времени образования равновесной концентрации. Следовательно, выход «термических» NO при горении МВС будет определяться

по уравнению (1.12) значениями максимальной температуры в зоне горения и отношением времени реакции ко времени установления равновесия.

Горение предварительно подготовленных ламинарных смесей ПГ максимальное содержание «термических» NO характеризуется коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 0,90 - 0,95$ [157]. В диффузионном турбулентном пламени максимальное содержание «термических» NO соответствует $\alpha = 1,1 - 1,2$, а уравнение $C_{NO_x} = f(\alpha)$ имеет более слабую, но довольно существенную зависимость от α [137]. Как было уже сказано, по физической сущности NO_x подразделяются на три группы – термические, быстрые и топливные реакции, протекающие с участием аминов и цианов, которые можно определить к реакциям образования последних двух групп NO_x . Рассмотрим возможные механизмы их образования.

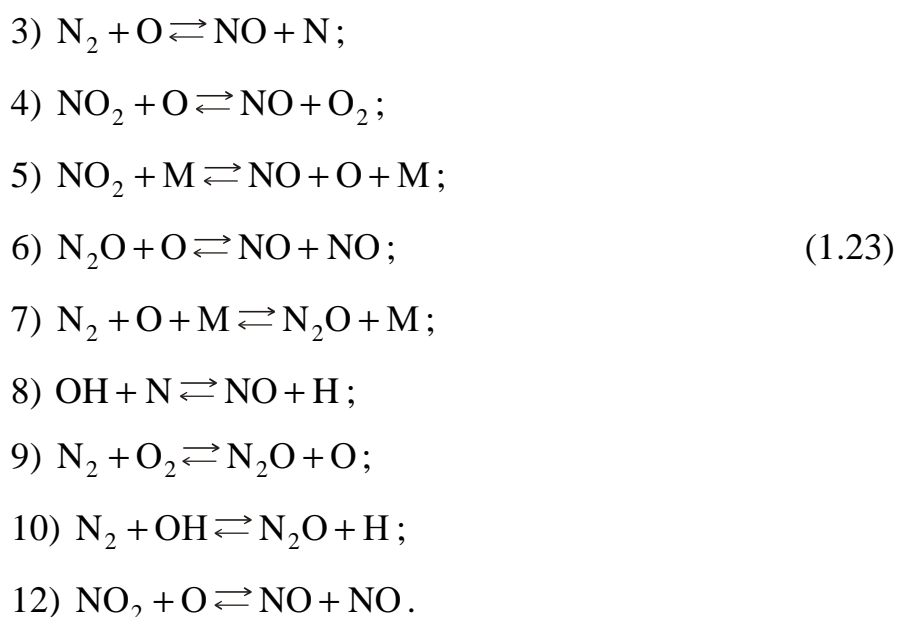
При расчете NO_x в КС дизеля многие исследователи пользовались как цепным механизмом Я.Б. Зельдовича, так и различными комбинациями дополненного кинетического механизма Я.Б. Зельдовича, которые учитывали образование NO по реакциям с участием различных радикалов, гемиоксида N_2O и по уравнению бимолекулярного механизма:



В анализе процесса образования NO в ЦД некоторые исследователи применяли и бимолекулярный механизм. Причем иногда используя указанный механизм ученые получали довольно не плохое схождение расчетных и экспериментальных данных по содержанию NO [158]. Но представленные расчеты, выполненные В.А. Звоновым [21], для условий приближенных к процессу горения в ЦД показывают, что бимолекулярный механизм вносит порядка 10% в общий процесс образования NO, а рост α (коэффициент избытка воздуха) приводит к увеличению роли бимолекулярного механизма.

Лавоие с сотрудниками и Винфрид [138, 159] предложили схему уравнений образования NO с участием высших и низших оксидов:

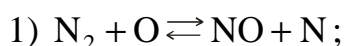


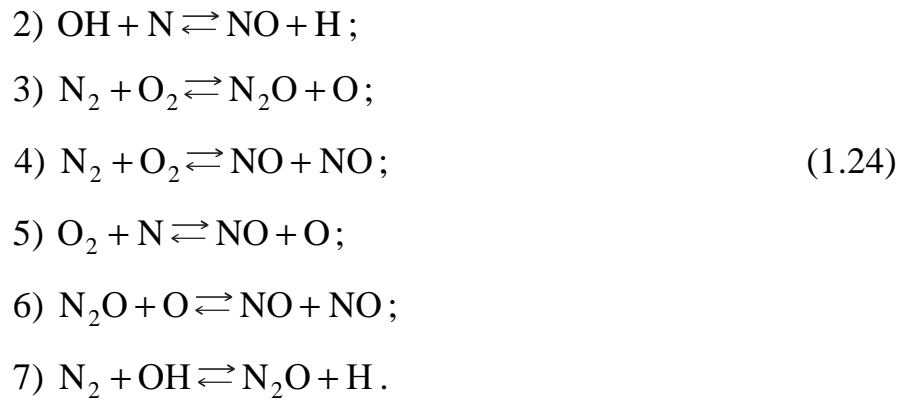


В указанной схеме партнером в тройном соударении М может участвовать любая частица в реакционной зоне, поскольку она нужна только для отвода энергии. Доказано [21, 160 и др.], что в КС дизеля при максимальной температуре цикла из всех образующихся NO_x более 90% приходится на оксид NO. Следовательно, в схеме уравнений (1.23) элементарные реакции с участием NO_2 можно не учитывать и это не будет обуславливать заметной ошибки. Например, в работе [161] рассмотрена химически равновесная смесь продуктов горения с параметрами ($T = 2200 \text{ K}$, $p = 2 \text{ МПа}$, $\alpha = 1$), в которой содержание NO составляло 1180 ppm, а NO_2 - 1 ppm.

Уравнение 1 из схемы (1.23) реагирует недостаточно быстро, поскольку для его реакции необходимы тройные соударения, и, следовательно, также характеризуется не большим вкладом в представленном механизме. Уравнению же 8 из представленной схемы (1.23) придается большее значение, особенно при наличии высокого давления $p = 20 - 50 \text{ МПа}$ [159].

Таким образом, из анализа представленных данных кинетическая схема реакций, наиболее достоверно описывающая процесс образования NO в условиях сгорания в дизелях, может быть представлена совокупностью следующих кинетических уравнений:





Первые два уравнения представленной схемы используются при расчетах процесса образования NO в дизеле в работах [21, 160, 161 и др.], позже авторами указанная схема (1.24) будет дополнена уравнением 7 [21].

В других исследованиях, например Лавоие с сотрудниками [138], используют для получения в продуктах сгорания содержания NO схему уравнений 1-6 дополненного кинетического механизма Я.Б. Зельдовича с участием радикала OH и геммоксида N_2O , а бимолекулярный механизм не учитывают. Таким образом, из представленного материала хорошо видно о наличии различий во взглядах на схемы уравнений, определяющих содержание NO в ЦД.

Постоянное совершенствование вычислительной техники и открытия химических наук приводят ученых-исследователей к созданию новых более сложных схем образования NO, состоящих из 100–200 и более химических уравнений [162-166]. Подобная тенденция наблюдается и в области прикладных наук. В работах Э. Нашленаса и В.И. Смайлиса [130] для получения данных по содержанию NO в ЦД использовали кинетическую схему из 48 обратимых уравнений.

Формирование кинетической схемы уравнений процесса образования NO должно основываться на принципе разумной достаточности, опираясь при этом на строгий количественный анализ, характеризующий вклад каждой реакции на результирующий выход базовых компонентов реагирующей системы.

Ответ на затронутый вопрос попытался дать в своей работе Н. Нельсон [147]. Для углеводородного топлива дополненный кинетический механизм Я.Б. Зельдовича достаточно хорошо подходит при расчете содержания NO в топливо-воздушных смесях любого состава. При горении смеси углеводородного то-

плива при $\alpha = 0,65$ для зоны образования «термических» NO (послепламенная зона) и при $\alpha = 0,85$ для зоны образования «топливных» и «быстрых» NO (зона пламени) механизм Зельдовича показывает удовлетворительные результаты, а при $\alpha > 0,65 - 0,85$ механизм Я.Б. Зельдовича дает уже отрицательный результат, поскольку не учитывает схему важных уравнений образования NO с участием цианаминных радикалов.

Анализ представленных материалов позволяет сделать **вывод** о характерных особенностях процесса образования «термических» NO при горении углеводородного топлива в ЦД:

1. Из всех образующихся NO_x в ЦД преобладает NO, выход которого на порядок больше остальных оксидов азота.

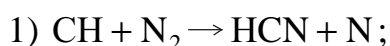
2. Время нахождения компонентов в области максимальной температуры меньше равновесного, что снижает подвижность реакции. Если в зоне горения равновесная концентрация NO не успевает образовываться, то реакция останавливается, определяя при этом содержание NO в ОГ вследствие резкого охлаждения КС в процессе расширения.

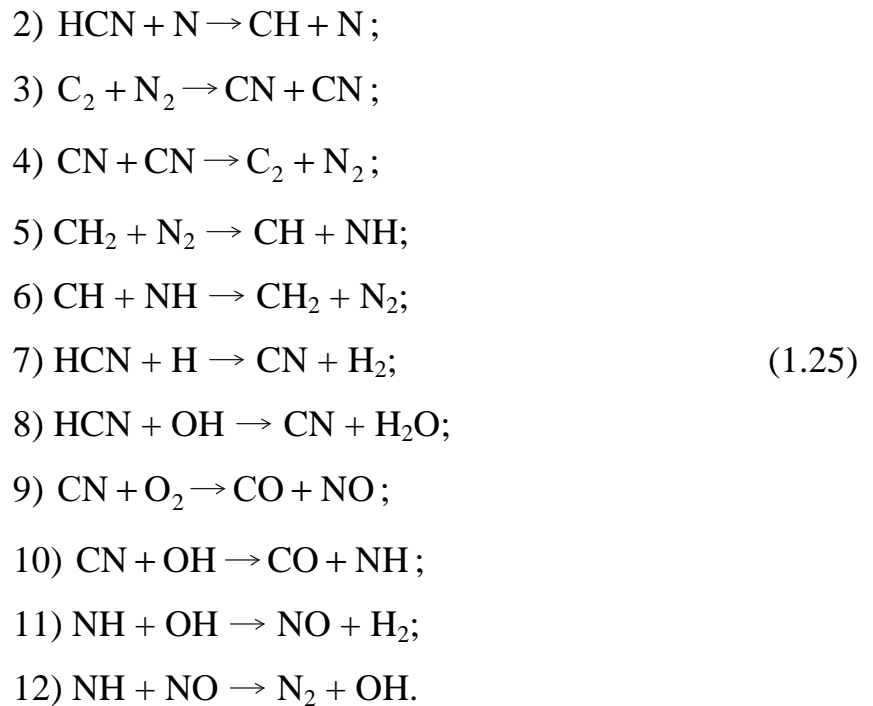
3. На содержание NO сильное влияние оказывает турбулентный поток, в пламени которого выход NO менее зависит от α , чем в ламинарном.

4. Показатели процесса оказывают существенное влияние на выход NO с ОГ. Как правило, улучшение процесса сгорания увеличивает концентрацию NO.

5. В температурном уровне менее 2000K в образовании NO принимают участие активные центры, такие как CN, HCN, NH, NH_2 , C_2 и др. Преобладание конкретной кинетической схемы в общем процессе образования NO зависит от физико-химических условий, вида топлива и состава смеси.

Механизм образования быстрых NO_x . Процесс образования быстрого NO в углеводородном пламени можно объяснить присутствием сверхравновесных концентраций O, H, OH и связыванием молекул N_2 углеводородными радикалами CH, C_2 , HCN.





Уравнения 1-6 схемы (1.25) предложены С.П. Фенимором [140, 155], уравнения 7-12 использовал Р.С. Гаррис с соавторами [167] с целью объяснения образования NO при сгорании смеси $\text{CH}_4 - \text{O}_2 - \text{N}_2$. Экспериментально подтверждено присутствие высокого содержания углеводородных радикалов HCN в различных пламенах. В работе [156] проведены измерения температуры и концентрации NO, HCN, OH и H ($\alpha = 0,79$, $T_{\max} = 2085$ K) в предварительно перемешанном пламени $\text{CH}_4 - \text{O}_2 - \text{N}_2$, представленные на рисунке 1.8.

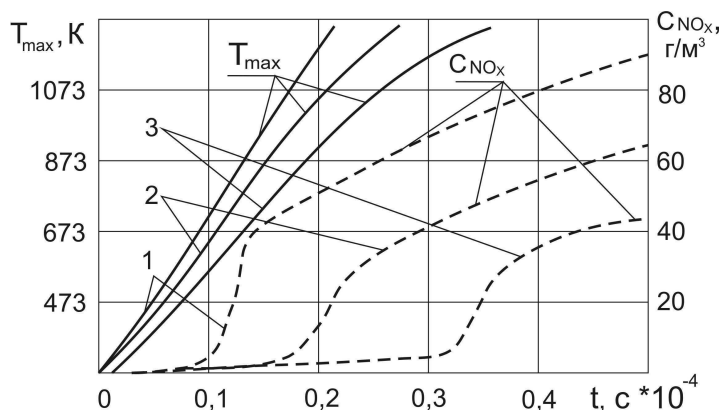


Рисунок 1.8 - Образование «быстрых» NO в начальных сечениях фронта пламени ПГ ($T_0 = 293$ K) [156]: 1 – $\alpha = 1,08$; 2 – $\alpha = 1,23$; 3 – $\alpha = 1,45$

В работе Ф. Бахмайера [168] показано, что большое содержание HCN отмечено в богатом пламени, а при повышении α содержание HCN уменьшается.

По исследованиям Т. Миянчи [169], NO формируется за короткое время в начале зоны горения ламинарного пламени (либо в корне турбулентного факела), поэтому они и получили название «быстрых» NO. Нельзя не заметить и наличие сверхравновесных концентраций O, H, OH.

Наличие сверхравновесных концентраций O, H, OH наблюдалось и в работах С.П. Фенимора, П.С. Мальте и Д. Сатарониса [155, 156, 170]. Полученные ими данные показывают, что концентрация O, H, OH на 1-2 порядка превышает равновесные значения в зоне горения и составляет 0,1-1,0% (таблица 1.3). Из данных таблицы 1.3 можно отметить, что увеличение концентраций O, H, OH над их равновесными значениями минимально для смесей при $\alpha \approx 1$.

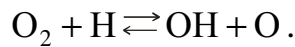
Таблица 1.3 – Максимальная концентрация O, H, OH в зоне горения МВС при атмосферном давлении [170]

Концентрация, %	Коэффициент избытка воздуха α				
	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
O	0,10	0,22	0,29	0,3	0,28
H	0,88	0,89	0,70	0,48	0,34
OH	0,41	0,65	0,74	0,73	0,68
Отношение максимальной концентрации к равновесной:					
O/[O]	250,0	55,0	13,8	12,0	16,5
H/[H]	15,7	14,4	18,4	40,0	85,0
OH/[OH]	11,4	6,1	2,5	3,3	4,3

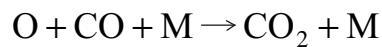
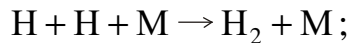
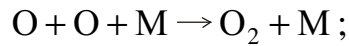
Для отношения OH/[OH] минимальное значение получается при $\alpha = 1$, для O/[O] – при $\alpha = 1,1$, для H/[H] – при $\alpha = 0,9$. Авторы [155, 156, 170] экспериментально установили, что концентрации O, H, OH в пламени ПГ и дизельного топлива с ростом температуры не всегда повышаются, а иногда даже происходит снижение. Естественно это, как показано в исследованиях [155, 170], ведет к отрыву расчётных условий образования NO от реальных.

П.С. Мальте [156] для того, чтобы рассчитать концентрации O, H, OH предлагает в области горения между атомами и радикалами O, H, OH и ста-

бильными компонентами CO , H_2 , CO_2 и H_2O за счёт быстрых бимолекулярных реакций создать частичное равновесие:



Тримолекулярные уравнения рекомбинации



протекают более медленно, чем уравнения (1.26), и не смещают значения локальных концентраций компонентов в зоне горения.

Исследования Т. Миянчи [169] показывают, что из уравнения (1.25) определяющую роль в окислении N_2 в области горения даёт уравнение 5 взаимодействия CH_2 с N_2 . Д. Матсуи [171] установил, что суммарный выход NO при сгорании CH_4 пропорционален содержанию CH вне зависимости от состава смеси и α . Более детальное экспериментальное изучение динамики процесса образования «быстрых» NO сделано А.И. Сигалом, В.И. Крыжановским, В.Г. Ляскоровским, Н.А. Гуревичем, Н.А. Чигирем [128, 172-174].

Среднее значение скорости образования «быстрых» NO , например для смеси с $T_0 = 293 \text{ K}$ и $\alpha = 1,1$ равняется $W_{\text{быстр}} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ и больше на порядок скорости образования «термических» NO : $W_{\text{терм}} = 2 \cdot 10^4 \text{ г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$. Среднее время нахождения смеси в опыте равнялось 1–4 мс, а образование «быстрых» NO укладывалось за время 0,1–0,4 мс. Поэтому авторы сделали предположение, что NO , определяемые в начальной зоне пламени, имеют не термический характер, а связаны непосредственно с процессом горения. Чтобы проверить это предположение авторы работы [172] исследовали NO и NO_2 в потоке с внешним нагревом воздуха и временем нахождения в печи, приближенным к условиям процесса горения топлива в ЦД. Оказалось, что количество «термических» NO при внешнем

нагреве воздуха в диапазоне температур 1600–1800К равняется 4–9 мг/м³. Следовательно, оказалось, что в открытом ламинарном пламени углеводородного топлива не малое количество NO образуется по «быстрому», а не по «термическому» процессу.

На рисунке 1.9 представлены результаты исследований И.Я. Сигала [128], характеризующие выход NO от состава смеси в углеводородном пламени ПГ. Анализ рисунка 1.9 показывает, что горение хорошо перемешанных газов с воздухом (кривая 1) приводит значения максимума выхода NO в зависимости от α почти в стехиометрическую область соотношений горючего и окислителя. Диффузионное же горение (кривая 2) слабо влияет на выход NO при изменении соотношений топлива и окислителя [154].

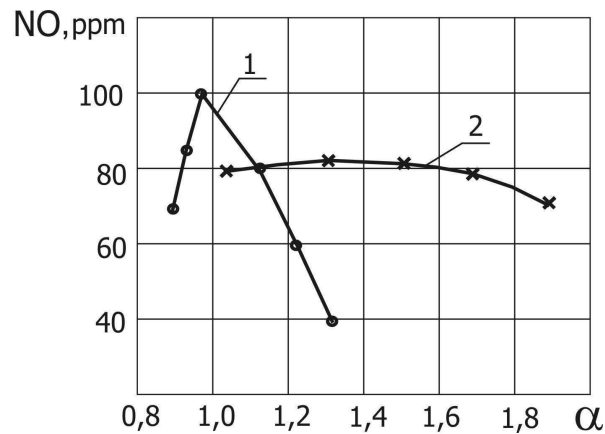


Рисунок 1.9 – Содержание NO в продуктах горения ПГ в зависимости от α [154]: 1 – полное предварительное перемешивание; 2 – предварительное перемешивание отсутствует

Горение ПГ сдвигает концентрацию NO в сторону богатой смеси, что может быть косвенным подтверждением гипотезы С.П. Фенимора об образовании NO посредством реагирования N₂ воздуха с углеводородными радикалами HCN, CN, CH и т.д. Увеличение α приводит к уменьшению углеводородных радикалов, что видимо и является причиной снижения содержания NO при сгорании обеднённых смесей CH₄ с воздухом.

Поиском способов уменьшения концентрации «быстрых» NO занимались и А.И. Сигал с В.Н. Крыжановским [172]. Они провели опыты двухступенчатого горения ПГ и установили, что снижение α от 1,0 до 0,75 приводит к уменьшению

выхода NO в первой ступени до 20% от уровня концентрации NO в нерасслоённой смеси. Концентрация NO во второй ступени увеличивается таким образом, что суммарное содержание NO остается на уровне 100 мг/м^3 .

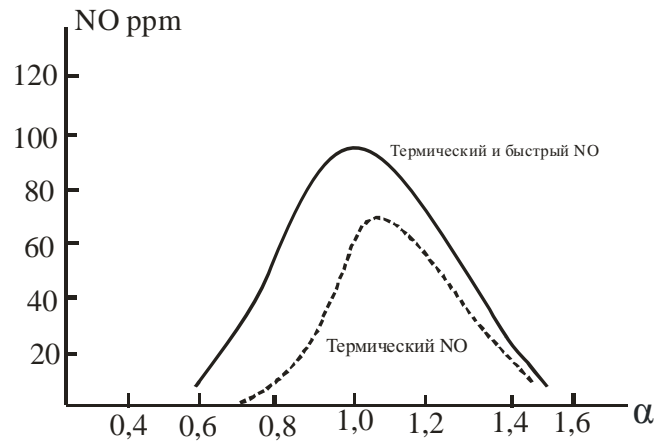


Рисунок 1.10 – Содержание NO в реакторе смешения в зависимости от α [175]

Горение метана в реакторе смешения при различных значениях α приводит к следующей зависимости образования NO (рисунок 1.10). Поскольку расчеты зависимости NO были выполнены для механизмов Зельдовича (термического) и Фенимора (полного), то разницу между «термическими» и «полными» NO можно списать на счет механизма образования «быстрых» NO [175].

Развивая исследования в работах [128, 155, 168, 169, 172, 175-177] и следуя мнениями констатируем следующие **выводы**:

1. Быстрое окисление N_2 во фронте пламени углеводородного топлива – достоверно и надежно установленный факт.
2. Наиболее характерные признаки процесса образования «быстрых» NO в пламени углеводородного топлива:
 - скоротечность процесса;
 - сосредоточение зон образования NO в начальных и сравнительно небольших участках фронта пламени;
 - меньшая зависимость по сравнению с «термическими» образования «быстрых» NO от температуры горения;
 - смещение максимальной концентрации NO в зону богатой смеси и достаточно мощная ее зависимость от состава.

3. Суммируя признаки пунктов 1 и 2, можно констатировать, что образование «быстрых» NO начинается у периметра фронта пламени с продвижением вглубь в зоне температур около 1000К.

4. Концентрация «быстрых» NO при горении углеводородного топлива соответствует $100 - 120 \text{ мг/м}^3$.

5. Наиболее вероятной схемой образования «быстрых» NO в углеводородном пламени (метан, метанол, этанол) является схема С.П. Фенимора.

6. Механизм образования «быстрых» NO для условий высокотемпературного горения углеводородного топлива в ЦД не является определяющим фактором. Поскольку, принимая за уровень концентрации «быстрых» NO параметры пункта 4 $(\text{NO})_{\alpha} = 100 - 120 \text{ мг/м}^3$ и сопоставляя эти значения со средним уровнем концентрации NO_x в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 $(\text{NO}_x)_{\text{ог}} = 2000 - 3000 \text{ мг/м}^3$, то получим приближенное значение относительной доли «быстрых» NO в районе 3–6%.

Резюмируя представленный материал можно отметить, что процесс образования «быстрых» NO органически построен на процессе горения углеводородного топлива (метан, СТЭ), следовательно, создание расчетной модели, включающей кинетическую схему реакций образования «быстрых» NO в КС дизеля, работающего на альтернативном топливе, возможно только в пределах общего кинетического механизма окислительного процесса топлива. Это одно из важных и принципиальных отличительных особенностей процесса образования «быстрых» и, конечно же «термических» оксидов азота.

Механизм образования топливных NO_x . На современном этапе исследований нет единого мнения о вкладе связанного азота топлива в общую эмиссию NO_x с ОГ углеводородного топлива.

Хорошо известны способы (описаны выше) уменьшения концентрации NO_x в продуктах сгорания, которые направлены в основном на угнетение реакций образования NO из азота воздуха. Но имеются исследования [135, 178-181], показывающие, что не малое влияние на общее содержание NO_x в ОГ имеют и

«топливные» NO. Так, при сгорании топлива, содержащего химически связанный азот, в топке парогенератора выброс NO_x увеличивался в среднем в 2 раза, по сравнению с топливом, не содержащим химически связанного азота [135].

Изучению влияния азотосодержащих соединений топлива на общий выход NO_x посвящено достаточно исследований [131, 178, 179, 181-184 и др.].

Концентрация азота в разных топливах содержится в широком диапазоне. Так, согласно данным работы [132] в тяжелом мазуте может содержаться от 0,3 до 1,4% химически связанного азота (N_T). Концентрация N_T в нефти, даже самой богатой им, редко переваливает за 1% , что пропорционально примерно 10% соединений N_T [185]. Здесь необходимо добавить, что КППГ практически не содержит азотистых соединений [54].

Основная масса соединений азота в нефти - это высокомолекулярные нейтральные вещества, характеризующиеся достаточно сложным строением. В результате перегонке нефти они могут частично разлагаться и образовывать простые соединения основного характера. Структура строения соединений N_T , присутствующих в топливных фракциях, изучена в исследованиях Я.Б. Черткова, З.А. Саблиной, А.Ф. Добрянского и др. [185-187].

Дизельное топливо содержит N_T , который связан с органической структурой топлива. Концентрация его может колебаться до 0,01% от горючей массы топлива [188]. Если N_T содержащийся в топливе при горении перейдет в NO по принципам стехиометрии, то содержание «топливных» NO может достигать нескольких процентов от суммарного выброса NO_x . Поэтому вопросы трансформации топливного N_T играют небольшую, но все же достаточно принципиальную роль. Процесс формирования «топливных» NO пока еще не изучен до уровня, четко определяющего его вклад в общую эмиссию выброса NO_x с ОГ дизеля в зависимости от вида используемого топлива. Так, известны работы [128, 135, 178], исследователи в которых полагают, что соединения азота топлива при увеличении температуры окисляются и разлагаются быстрее молекулярного азота воздуха, вследствие меньших (в 2–3 раза) затрат энергии на отсоединение атомов N_T от азотосодержащих соединений, чем на диссоциацию N_2 . По результатам

исследований А.А. Введенского [189], энергия связи $N = N$ в молекуле N_2 равняется 716 кДж/моль, связи $O - O - 494$ кДж/моль, $H - H - 430$ кДж/моль, $C - H - 360$ кДж/моль, $C - C - 264$ кДж/моль, $C - N - 210$ кДж/моль.

Из-за малой энергии активации уравнений термического разложения соединений азота топлива N_T образование «топливных» NO возможно и при относительно не высоких температурах. По данным работы [183] «топливные» NO образуются при температуре 520 – 570 К.

Процесс образования NO из азота топлива при сгорании является достаточно сложным механизмом. Известны исследования [179, 180], авторы которых предполагают, что с увеличением температуры азотосодержащие соединения топлива распадаются с выделением радикалов с единичными атомами N_T типа RN или RNO , превращающиеся далее в NO вне зависимости в каком виде (оксид либо какое другое соединение) они существуют. В работе [128] сказано, что N_T топлива сначала формируется в виде радикалов HCN , CN , NH , а далее уже в NO .

В исследованиях Д.В. Турнер [190] отмечает, что после формирования азотосодержащих соединений RN далее они участвуют в конкурирующих реакциях, приводящих к образованию «топливных» NO или N_T , а уравнение (1.28) при недостатке окислителя (восстановительная зона) реагирует быстрее уравнения (1.29):



Получение значений степени превращения N_T топлива в оксид довольно сложная задача, так как переход химически связанного N_T в «топливные» NO находится в зависимости зависит от структуры топливовоздушной смеси [131, 179], композиции азотосодержащих элементов и их массовой концентрации в топливе [179, 184], а также от температурного режима [191] и величины, характеризующей скорость нагревания [155].

Однако разные ученые-исследователи воздействие указанных показателей оценивают противоречиво. Отличаются и мнения оценки процента перехода N_T в «топливные» NO . Так, в работе [190] эта величина составляет порядка 50% неза-

висимо от концентрации N_T , а в исследованиях [191], процент перехода β уже равняется 40–60% при количестве связанного $N_T = 0,2-0,4\%$ и причем при снижении N_T достигает 100% .

Снижение процента перехода β при росте N_T отмечено в работах [155, 192]. Интересны данные и о влиянии на процент перехода β различных технических способов, снижающих образование NO из азота воздуха [184]. Так, РОГ уменьшает «термические» NO, но никак не воздействует на β . Впрыскивание воды в ЦД уменьшает также «термические» NO и незначительно β . Так же в работе [184] отмечено, что пониженные температуры уменьшают степень перехода β .

Большая часть рассмотренных исследований имеет констатирующий характер, подведение итогов опыта осуществляется формально по эмпирическим и полумпирическим зависимостям. Например, в исследованиях Е. Кайзера [184] ограничились аппроксимирующими выражениями для β в узком интервале изменения $\alpha = 1,05-1,15$:

$$\beta = (0,251 - 0,214 \ln N_T) \pm 0,5; \quad 0,03 < N_T < 0,6 \%; \quad (1.30)$$

$$\beta = 0,35 \pm 0,05; \quad 0,6 < N_T < 1,0 \% .$$

Эти зависимости объединяют результаты опытов диффузионных пламен в плавильных печах [184], паровых котлах и лабораторных стендах, в которых проходило испытание углеводородного топлива с искусственной и естественной концентрацией азота [191].

С.П. Фенимор [128, 155] исследовал кинетику окисления связанного азота с помощью подаваемых в газовое пламя пиридинов, аммиака, метиламина и получил уравнение:

$$\frac{C}{[C_{NO}]} = 1 - \exp\left\{-\frac{[C_{NO}] + C_{NO}}{2 \cdot [C_{NO}]}\right\}, \quad (1.31)$$

где C_{NO} – количество NO, полученного окислением всего связанного азота до оксида.

Выражение (1.31) доказывает возможность увеличения концентрации связанного азота в топливе до момента, соответствующего достижению равновесного

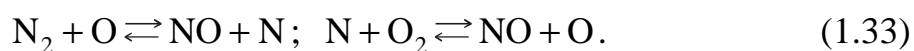
образования NO.

Горение углеводородных топлив, имеющих следующий состав: CH_4 – 0-88,7%, C_2H_2 – 0-88,7%, H_2 – 8-98,7%, N_T – 1%, W – 1%, исследовал П.В. Росляков [165] и провел расчётные исследования выхода «топливных» NO, в результате которых был сделан вывод об уменьшении скорости образования «топливного» NO с ростом содержания метана.

В.В. Померанцев и Н.В. Ветрова [135] сделали попытку учесть аналитически воздействие N_T на процесс образования NO. В работе представлен анализ условий образования NO_x базирующихся на представлении роли N_T как первопричины дальнейшего развития цепного механизма Я.Б. Зельдовича. Авторы предположили, что освобождающийся при термическом процессе N_T , находится преимущественно в лабильном состоянии и является функцией его концентрации в топливе

$$\text{N}_T = \beta \cdot \frac{\text{N}_T \cdot 273}{14 \cdot V_T \cdot T} \quad (1.32)$$

и характеризует процесс течения цепных реакций:



Концентрацию атомов кислорода определяли из условия равновесия уравнения $\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$.

В работе [178] отмечено, что в этих уравнениях (1.33) величина скорости изменения содержания атомов азота и кислорода обусловлена как величина постоянная $d\text{N}/d\tau = -d\text{O}/d\tau = 0$, что не учитывает концентрацию атомов кислорода в результате процесса диссоциации CO_2 и H_2O . Сомнение о правильности применения условия квазистационарной концентрации для N показывает и то, что для полного окисления N_T необходимо время малой величины 2–3 мс, что описано в работе [183] при горении C_2H_4 и C_3H_8 с добавками $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}$.

В других исследованиях В.В. Померанцева с сотрудниками, например в работе [132], уже учтено изменение содержания атомов азота в процессе формирования N_T . Представленная исследователями схема и аналитические уравнения,

основанные на цепном механизме Я.Б. Зельдовича, с допущением о не высоком вкладе скорости обратных реакций (1.33) достаточно точно характеризуют процесс изменения концентрации реагирующих компонентов при окислении N_T . Но авторы исключили из общего рассмотрения уравнение $NO + N \rightarrow O + N_2$, на существенном вкладе которого настаивали многие ученые [182, 193], и тем самым не учли взаимодействие процесса образования «топливных» NO с процессом образования N_2 .

Анализируя изложенный материал по изучению процессов образования топливных NO_x при горении углеводородного топлива и подводя краткие итоги, можно констатировать следующие **выводы**:

1. Топливные NO образуются во фронте пламени до образования «термических» NO.
2. По сравнению с «термическими» NO «топливные» слабо зависят от температуры.
3. Степень перехода азота топлива в NO увеличивается с ростом коэффициента избытка воздуха α .
4. На образование «топливных» NO азотосодержащие соединения не оказывают существенного значения.
5. С увеличением массовой концентрации азота в топливе происходит снижение степени перехода азота топлива в NO.
6. При горении углеводородного топлива с количеством связанного азота $N_T > 0,1\%$ азотосодержащие соединения, частично окисляясь до NO, являются дополнительным источником образования NO и могут внести солидный вклад в суммарную концентрацию NO_x в ОГ.

1.3 Моделирование физико-химических процессов образования оксидов азота в дизеле

Требования к экономическим и экологическим показателям дизелей непрерывно ужесточаются. Эти показатели в значительной степени зависят от совер-

шенства рабочего процесса дизеля и, в особенности, от качества процесса сгорания топлива. Высококачественным следует считать своевременное и полное сгорание, которое обеспечивает максимально возможную топливную экономичность дизеля при допустимых уровнях его тепломеханической напряжённости и токсичности отработавших газов. Качество сгорания зависит от множества факторов. Правильно их учесть при доводке рабочего процесса дизеля очень трудно. В этой ситуации наиболее радикальным и эффективным средством решения задачи является применение математической модели смесеобразования и сгорания, учитывающей все существенные факторы.

Какими основными свойствами должна обладать модель, и располагаем ли мы моделью с такими свойствами? Она должна позволять описывать комплекс процессов: подачу топлива, распад топливной струи на капли, движение свободной струи, её взаимодействие со стенками камеры сгорания (КС), испарение, воспламенение и горение с образованием токсичных продуктов. Комплексностью и приспособленностью к решению задач конструирования отличается модель, разработанная Н.Ф. Разлейцевым. Однако приемлемость многих принятых в этой модели допущений, на наш взгляд, нуждается в экспериментальной проверке.

Модель обсуждаемых процессов целесообразно использовать при постановке и решении математической задачи оптимизации. Ввиду многофакторности системы моделируемых процессов задача оптимизации может иметь большую размерность. Это означает, что её решение потребует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому модель должна быть по возможности «быстродействующей», следовательно, простой. Пользующиеся наибольшей популярностью в мире модели и программные комплексы KIVA (Los Alamos), FIRE (AVL), VECTIS (Ricardo), STAR – CD (Computational Dynamics Ltd.) довольно объёмные и дорогие, кроме того не всегда дают достоверные результаты [194].

Большинство применяющихся в отечественной практике моделей характеризуют процессы, происходящие в ЦД. Подобное моделирование не может согласовать выбор конструктивных и регулировочных параметров дизеля (параметров топливной аппаратуры, КС и заряда цилиндра) и сформировать адекватную схему

образования вредных веществ. Для этого нужна модель, описывающая локальные процессы. Ведь известно, что именно локальные процессы горения определяют эмиссию окислов азота, сажи, окиси углерода, несгоревших углеводородов, альдегидов и других вредных компонентов отработавших газов. Отдельные работы, посвященные «локальному» моделированию смесеобразования и горения, во-первых, пока не доведены до решения обсуждаемых практических задач, во-вторых, изложенные в них результаты моделирования не в полной мере подтверждены экспериментами.

Итак, очевидна необходимость разработки математической модели внутрицилиндровых процессов в дизеле, включая процессы воспламенения и горения, приспособленной для решения указанных выше практических задач, обладающей необходимой комплексностью, локальностью описания процессов, приемлемым уровнем сложности. Следует располагать средствами для проверки её адекватности. Прежде всего, необходимо получить возможность расчёта топливной экономичности дизеля (например, выраженной индикаторным КПД) и количества образующегося в цилиндре основного компонента токсичных продуктов - окиси азота. Для этого модель должна позволять рассчитывать изменяющиеся во времени поля температуры и концентрации кислорода, не задействованного в окислении топлива.

Для объяснения физического процесса образования NO_x в цилиндре ДВС В.И. Смайлсом [195] предложена классификация следующих физических моделей: гомогенных смесей, стехиометрических слоев, объёмные многозональные.

Модели гомогенных смесей используются для расчета механизма образования NO в бензиновых ДВС [196], модели стехиометрических слоев – в дизелях [197-200], модели объёмные многозональные – в дизелях и бензиновых ДВС с расслоением заряда [201, 202].

К моделям гомогенных смесей относят модель П. Эйза и Д.С. Гиббе [158]. Основой модели стехиометрических слоев служит положение о сгорании основной массы топлива в стехиометрических слоях, которое теоретически и экспериментально подтверждено исследованиями Я.Б. Зельдовича и Ю.Б. Свиридова

[126, 203]. Основы этой модели рассмотрены в публикациях В.А. Звонова и В.В. Фурсы [21, 199]. Многозональные модели считаются наиболее перспективными, поскольку учитывают локальные физические условия при горении топлива. Многозональные модели широко используют в своих исследованиях В.И. Смайлис, Р.И. Мехтиев и др. [195, 202].

Имеется значительное количество исследований не только в нашей стране, но и за рубежом, направленных на создание физико-математических моделей механизма образования NO_x в дизелях [21, 52, 201, 158, 198-207 и др.].

В работах Т.Ю. Саловой [205, 206] с целью определения содержания NO_x в ОГ дизеля применяются методы моделирования с помощью термодинамического анализа технологических процессов и математического программирования. Автор представляет модели реального процесса в виде множества различных вариаций действительного неравновесного механизма при движении к конечному равновесному состоянию. Термодинамическое равновесие системы с помощью математического моделирования Т.Ю. Салова описывает следующим выражением:

$$\sum_j c(x_j) dx_j + \sum_i \lambda_i \cdot \varphi_i = 0, \quad (1.34)$$

где x , c , φ , λ – координата, действующая сила, деформация связей и множитель соответственно, j , i – индексы силы связи.

Модели конечных равновесий строятся при условиях $T, P = \text{const}$ с определением минимального значения энергии Гиббса:

$$\min \left[G(x) = \sum_j G_j(x) \cdot x_j \right]; \quad G_j = f_j(x); \quad x_j \geq 0; \quad A \cdot x = b, \quad (1.35)$$

где $A = [a_{ij}]$ – матрица концентраций элементов, находящихся в компонентах системы; $x = (x_1, \dots, x_n)^m$ – величина модалных концентраций компонентов; $b = (b_1, \dots, b_n)^m$ – величина выхода моделей элементов.

Использование рассмотренной модели позволяет определять возможное содержание NO_x при разных условиях горения топлив [208, 209].

В материалах конгресса CIMAC 2010 рассмотрена оценка выбросов NO_x на

основе модели Хайдера и механизма Зельдовича [148]. Диаграмма разброса экспериментальных данных построена по результатам, полученным при испытаниях варианта двигателя в открытой камере (рисунок 1.11).

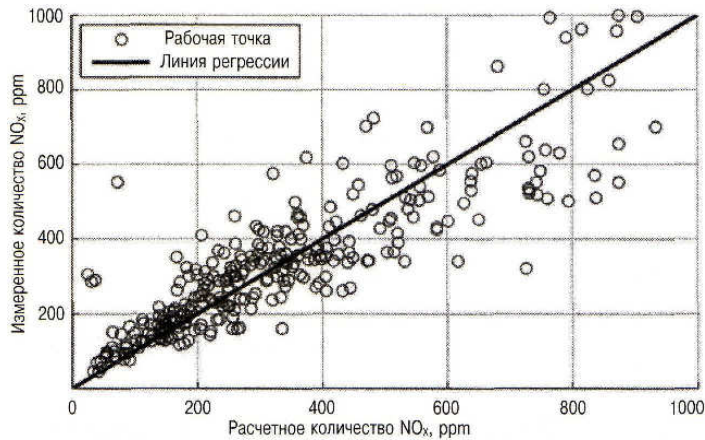


Рисунок 1.11 – Расчетная (ось X) и измеренная концентрация NO_x для открытой КС (расчет выполнен по модели Хайдера/Зельдовича) [148]

В исследованиях Л.А. Новикова [210, 211] рассмотрены программные комплексы, позволяющие проводить численное моделирование механизма образования NO . Процесс вычисления содержания NO заключается в получении значений термодинамически равновесных компонентов, кроме NO и N , продуктов горения. Далее рассчитанные значения концентраций компонентов и температуры можно использовать для численного интегрирования уравнения первого порядка:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = W_{\text{NO}}. \quad (1.36)$$

W_{NO} задаётся следующими выражениями, полученными из расширенного механизма Я.Б. Зельдовича:

$$W_{\text{NO}} = \frac{2 \cdot k_1[\text{O}] \cdot [\text{N}_2]}{1 + k_{-1}[\text{NO}] \cdot b / (k_{-2}[\text{O}_2])} - \frac{2 \cdot k_2[\text{NO}] \cdot [\text{O}]}{1 + k_{-2}[\text{O}_2] / (k_{-1}[\text{NO}] \cdot b)}, \quad (1.37)$$

где k_i, k_{-i} – константы скоростей прямой и обратной i -той реакции,

$$b = \left\{ 1 + \frac{k_3[\text{OH}]}{k_{-2}[\text{O}_2]} \right\}^{-1}. \quad (1.38)$$

С целью оптимизации соотношений содержания кислорода в составе смеси и количества рециркулируемых ОГ дизеля 4Ч 9,5/11,0 проведено численное моделирование, результаты которого представлены на рисунке 1.12.

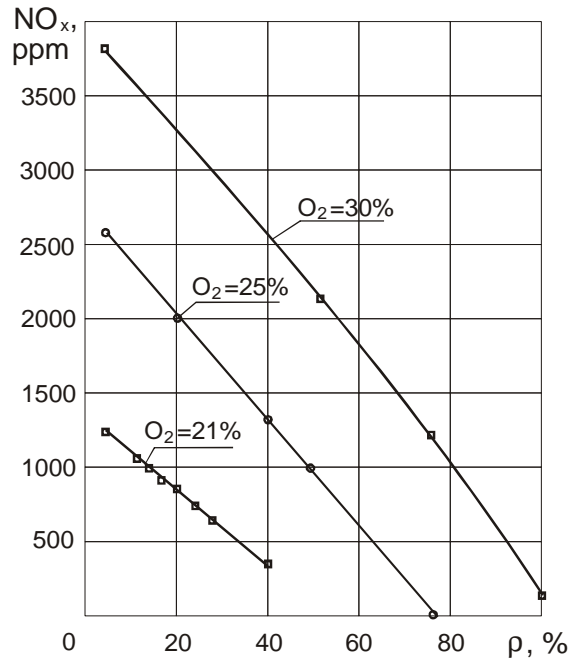


Рисунок 1.12 - Изменение концентрации NO_x в зависимости от изменения концентрации кислорода и степени РОГ дизеля 4Ч 9,5/11,0 при N_e = 4,96 кВт и n = 1500 мин⁻¹ [210, 211]

В работе Р.В. Малова [212] расчет содержания NO_x в ОГ дизеля описан следующим образом. За исходное взято следующее уравнение скорости образования NO:

$$\frac{dC_{NO}}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{C_{O_2}}} \exp\left(-\frac{86000}{RT}\right) \left[\frac{64}{3} C_{O_2} C_{N_2} \exp\left(-\frac{43000}{RT}\right) - C_{NO}^2 \right], \quad (1.39)$$

где C_{O₂}, C_{N₂}, C_{NO} - концентрации кислорода, азота и оксида азота, кмоль/м³.

Принимая во внимание, что $\tau = \varphi/6n$, приняв за начало отсчета угла п.к.в. - в.м.т. интегрирование при начальных параметрах $\varphi = 0$, C_{NO} = 0 уравнения (1.39) дает следующий вид:

$$C_{NO} = \frac{K}{6n} C_{O_2} C_{N_2} \exp\left(-\frac{E_{обп}}{RT_z}\right) \varphi_z. \quad (1.40)$$

Используя известное соотношение

$$C_{O_2} = \frac{0,21(\alpha - 1)L_0 g_e N_e k}{\eta_v 60nV_h} \quad (1.41)$$

и считая C_{N₂} = 3,4 · 10⁻², кмоль/м³ = const, уравнение для расчета содержания оксидов азота переписано в виде, кмоль/м³:

$$C_{NO} = 8 \cdot 10^{10} \varphi_z \sqrt{\frac{(\alpha-1)}{\eta_v} g_e \frac{N_e k}{V_h n^3} \exp\left(-\frac{E_{обр}}{RT_z}\right)}. \quad (1.42)$$

Формула дает возможность оценить примерное содержание NO в ОГ дизеля.

В работах В.А. Звонова [21, 213] разработана методика расчета содержания оксидов азота в четырехтактных дизелях с неразделенной КС. С целью проведения расчетов содержания NO в ОГ приводится следующая формула:

$$r_{NO\text{обр}} = \frac{7,0 \cdot 10^{13} e^{\frac{38020}{T_{пс2}}} p_2 r_{N_2} r_O \Delta\varphi}{24,94 n T_{пс2}}, \quad (1.43)$$

где $T_{пс2}$ - температура продуктов сгорания в конце шага расчета.

На рисунке 1.13 представлены результаты расчетов содержания NO_x в цилиндре дизеля 6ЧН 21/21.

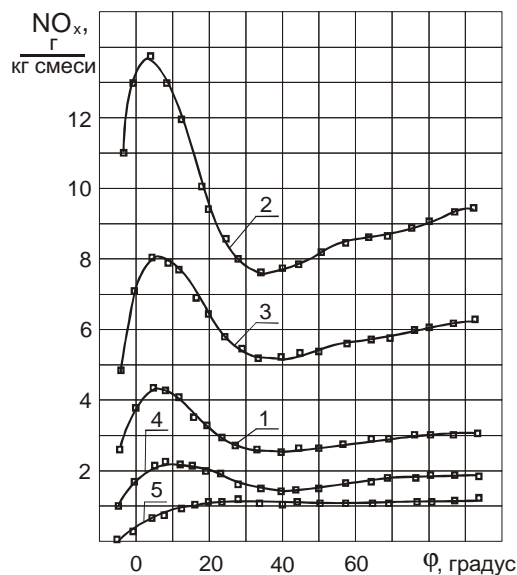


Рисунок 1.13 - Результаты расчета содержания NO в цилиндре дизеля 6ЧН 21/21 на режиме номинальной мощности ($N_e = 736$ кВт, $n = 1500$ мин⁻¹) [21, 213]:
1 – в бедной смеси; 2 – в зоне основного горения; 3 – в стехиометрической смеси; 4 – в богатой смеси; 5 – суммарное по объему цилиндра

В.А. Звоновым [21, 213] так же разработана методика расчета содержания оксидов азота в продуктах сгорания по 18 компонентам: O, O₂, O₃, H, H₂, OH, H₂O, C, CO, CO₂, CH₄, N, N₂, NO, NO₂, NH₃, HNO₃, HCN. Для определения содержания указанных компонентов составлена система из 18 уравнений (14 уравнений равновесия, три уравнения материального баланса и уравнение Дальтона). Урав-

нения равновесия:

$$\begin{aligned} K_1 &= p_{\text{O}}/p_{\text{O}_2}^{1/2}; K_2 = p_{\text{O}_3}/p_{\text{O}_2}^{3/2}; K_3 = p_{\text{H}}/p_{\text{H}_2}^{1/2}; K_4 = p_{\text{H}_2}^2 p_{\text{O}_2}/p_{\text{H}_2\text{O}}^2; \\ K_5 &= p_{\text{OH}}/p_{\text{O}_2}^{1/2} p_{\text{H}_2}^{1/2}; K_6 = p_{\text{C}} p_{\text{O}_2}/p_{\text{CO}_2}; K_7 = p_{\text{C}} p_{\text{O}_2}^{1/2}/p_{\text{CO}}; K_8 = p_{\text{C}} p_{\text{H}_2}^2/p_{\text{CH}_4}; \\ K_9 &= p_{\text{N}}/p_{\text{N}_2}^{1/2}; K_{10} = p_{\text{N}} p_{\text{O}}/p_{\text{NO}}; K_{11} = p_{\text{O}_2}^{1/2} p_{\text{NO}}/p_{\text{NO}_2}; K_{12} = p_{\text{N}_2}^{1/2} p_{\text{H}_2}^{3/2}/p_{\text{NH}_3}; \\ K_{13} &= p_{\text{NO}}^3 p_{\text{H}_2\text{O}}/p_{\text{HNO}_3}^2 p_{\text{NO}}; K_{14} = p_{\text{C}} p_{\text{N}_2}^{1/2} p_{\text{H}_2}^{1/2}/p_{\text{HCN}}, \end{aligned}$$

где p – парциальные давления соответствующих компонентов; $K_1 \dots K_{14}$ – константы.

Три выражения материального баланса построены на принципах неизменного отношения числа атомов отдельных веществ во время реагирования. При формировании выражений использованы отношения:

$$\alpha = S_{\text{C}}/S_{\text{O}}; \beta = S_{\text{O}}/S_{\text{N}}; \gamma = S_{\text{C}}/S_{\text{H}}, \quad (1.44)$$

где S – число атомов соответствующих веществ.

Для реакции горения C_8H_{18} при $\alpha \approx 1$:

$$\alpha_p = 0,32; \beta_p = 0,26595; \gamma_p = 0,444. \quad (1.45)$$

Далее введена поправка в величины α_p и γ_p , поскольку элементарный состав топлива отличается от состава октана:

$$x\text{C} + y\text{H} + z\text{O} + w\text{N} = n\text{CO}_2 + m\text{H}_2\text{O} + p\text{N}_2, \quad (1.46)$$

где $x = n$; $y = 2m$; $z = 2n + m = 2x + y/2$.

Отсюда

$$\gamma_p = x/y; \alpha_p = \frac{1}{2 + 1/2\gamma_p}. \quad (1.47)$$

Уравнения материального баланса представлены в виде:

$$\begin{aligned} \alpha_p (p_{\text{O}} + 2p_{\text{O}_2} + 3p_{\text{O}_3} + p_{\text{OH}} + p_{\text{H}_2\text{O}} + 3p_{\text{HNO}_3} + p_{\text{CO}} + 2p_{\text{CO}_2} + 2p_{\text{NO}_2} + p_{\text{NO}}) = \\ = p_{\text{C}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CH}_4} + p_{\text{HCN}}; \\ \beta_p (p_{\text{NO}_2} + p_{\text{N}} + 2p_{\text{N}_2} + p_{\text{NO}} + p_{\text{NH}_3} + p_{\text{HNO}_3} + p_{\text{HCN}}) = \\ = p_{\text{O}} + 2p_{\text{O}_2} + 3p_{\text{O}_3} + p_{\text{OH}} + p_{\text{H}_2\text{O}} + 3p_{\text{HNO}_3} + p_{\text{CO}} + 2p_{\text{CO}_2} + 2p_{\text{NO}_2} + p_{\text{NO}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_p (p_H + 2p_{H_2} + p_{OH} + 2p_{H_2O} + 4p_{CH_4} + 3p_{NH_3} + p_{HNO_3} + p_{HCN}) = \\ = p_C + p_{CO} + p_{CO_2} + p_{CH_4} + p_{HCN}. \end{aligned}$$

В качестве 18-го уравнения представлено уравнение Дальтона, устанавливающее взаимосвязь между суммарным давлением смеси и парциальным давлением отдельных веществ:

$$\begin{aligned} p = p_O + p_{O_2} + p_{O_3} + p_H + p_{H_2} + p_{OH} + p_{H_2O} + p_C + p_{CO} + p_{CO_2} + \\ + p_{CH_4} + p_N + p_{N_2} + p_{NO} + p_{NO_2} + p_{NH_3} + p_{HNO_3} + p_{HCN}. \end{aligned} \quad (1.48)$$

Применяя представленные выше 18 выражений, определяют равновесную величину состава продуктов сгорания. Далее исходная система из 18 уравнений приведена к системе из четырех уравнений с четырьмя неизвестными, например, O_2 , H_2O , CO_2 , N_2 :

$$F(A, B, C, D) = 0;$$

$$G(A, B, C, D) = 0;$$

$$H(A, B, C, D) = 0;$$

$$J(A, B, C, D) = 0.$$

Для решения данной системы применен метод Ньютона, и система представлена в виде:

$$F = F_0 + F_A \delta A + F_B \delta B + F_C \delta C + F_D \delta D = 0;$$

$$G = G_0 + G_A \delta A + G_B \delta B + G_C \delta C + G_D \delta D = 0;$$

$$H = H_0 + H_A \delta A + H_B \delta B + H_C \delta C + H_D \delta D = 0;$$

$$J = J_0 + J_A \delta A + J_B \delta B + J_C \delta C + J_D \delta D = 0.$$

Данная система линейных уравнений может решаться относительно δA , δB , δC , δD . Расчетные (по условиям равновесия) и экспериментальные зависимости концентраций отдельных компонентов продуктов сгорания в цилиндре дизеля 1Ч 12/14 с камерой в поршне от угла п.к.в. представлены на рисунке 1.14.

И.М. Кханом [133] разработана модель, позволяющая проводить расчет образования NO в ЦД используя концентрационные и температурные поля опытных и расчетных зависимостей для законов топливоподачи, распространения

фронта пламени и горения. Но при использовании этого метода отмечено существенное различие в расчётных и экспериментальных концентрациях NO.

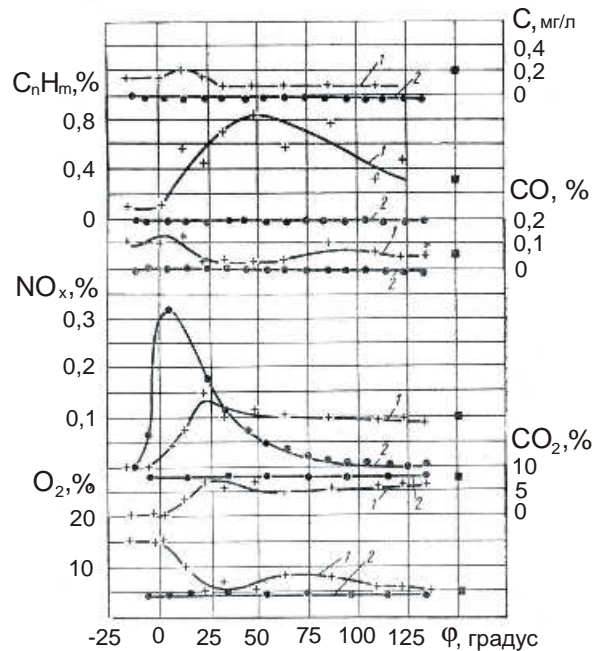


Рисунок 1.14 - Влияние угла п.в.к. дизеля 1Ч 12/14 на содержание токсичных веществ и кислорода в цилиндре при $n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,4 \text{ МПа}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 34^\circ$ [21]:
1 – опытные данные; 2 – расчетные данные; ■ - содержание на выпуске

С целью сближения экспериментальных и расчетных значений требовалось увеличение константы скорости реакции $N_2 + O \rightarrow NO + N$ не менее чем в пять раз, что естественно в кинетике образования NO неприемлемо. Из данных работы [21] можно отметить рассмотренные там испытания определения экспериментально корреляционных зависимостей средних значений по всему объему КС α от локальных, позволяющих получить совпадение расчетных и опытных значений NO. Модель образования NO, основанная на принципе выгорания одной топливной капли, тоже не дала необходимого результата по совпадению расчетных и опытных данных.

В работе [53] рассмотрена инженерная методика фирмы «Вяртсиля», позволяющая провести приближенный анализ воздействия давления P , температуры T и α (коэффициент избытка воздуха) в цилиндре на скорость изменения содержания NO_x в ОГ дизеля:

$$\frac{dNO}{d\tau} = A p \frac{\alpha - 1}{\alpha} e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (1.49)$$

В работах А.Р. Кульчицкого [20, 198, 214] изложен метод расчета концентрации NO_x при работе дизеля с РОГ. В методе принято, что скорость изменения содержания NO_x в точке окончания фазы кинетического сгорания P_{\max} пропорциональна скорости изменения содержания NO_x в ОГ в целом. Также обусловлено, что при работе с РОГ и без неё, при равенстве цикловой подачи и частоты вращения дизеля, локальные области выдерживают свою форму, которая зависит от законов распыливания и смесеобразования. При этом происходит лишь изменение концентрации кислорода в локальной зоне и предполагается, что охват объема со стехиометрическим отношением топлива и воздуха в локальной зоне осуществляется независимо от ее места расположения. Для расчета концентрации оксидов азота выведено следующее уравнение:

$$\left(\frac{d\text{NO}}{d\tau} \right)_{\text{КС}} = v_{\Sigma_e} G, \quad (1.50)$$

где G – величина соотношения массы газа в локальной зоне и в КС; v_{Σ_e} – количество образовавшихся молекул NO в единицу времени, определяемое по выражению:

$$v_{\Sigma_e} = k v_{\Sigma}, \quad (1.51)$$

где k – коэффициент пропорциональности, равный произведению концентраций O_2 за фронтом пламени и N_2 :

$$k \cong 0,16 \frac{\alpha'_1 - 1}{\alpha'_1}. \quad (1.52)$$

Величина соотношения массы газа в локальной зоне и в КС определяется по выражению:

$$G = \frac{M_{\text{лз}}}{M_{\text{ц}}}, \quad (1.53)$$

где $M_{\text{лз}}$ и $M_{\text{ц}}$ – массы смеси в локальной зоне и в цилиндре, определяемые по уравнениям:

$$M_{\text{лз}} = b_{\text{ц}} H_u, \quad M_{\text{ц}} = b_{\text{ц}} \alpha'_1, \quad (1.54)$$

где $b_{\text{ц}}$ – величина цикловой подачи.

Результаты расчета $\left(\frac{dNO}{d\tau}\right)_{КС}$ в относительных единицах для дизеля 6Ч 18/22 представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Результаты расчета $(dNO/d\tau)_{КС}$ для дизеля 6Ч 18/22

ρ , %	α'_1	O_2 , %	$T_{лз}$, К	$\Delta(NO_x)$, %
0	2,0	21,0	3500	0
4	1,92	20,1	3390	-7,8
8	1,84	19,3	3310	-13,7
12	1,76	18,5	3230	-20

Известны методы, учитывающие температурный градиент (Махе-эффект) на содержание NO. Определение концентрации NO в ОГ осуществляется с помощью высокотемпературных диссоциаций [138, 139, 215 и др.]. Нашли применение и способы определения NO в ДВС с неоднородным зарядом [21, 207, 213].

Сейчас для получения расчетных данных по концентрации NO в ЦД распространены 4 категории способов: с помощью равновесного содержания реагирующего вещества, цепной механизм Я.Б. Зельдовича, дополненный механизм Я.Б. Зельдовича и с помощью принципа частичных равновесий. Способы с помощью равновесного содержания реагирующего вещества применяется в основном в вопросах исследования геометрии КС [216]. Дополненный механизм Я.Б. Зельдовича используют при расчете динамических параметров образования NO. Практическое применение необходимых кинетических механизмов для вычислительного алгоритма обуславливается физическими условиями протекающих процессов. Процесс, протекающий при постоянных значениях температуры, позволяет дать аналитическое решение дифференциальных уравнений, описывающих механизм образования NO [126, 128, 135, 178].

В сложной кинетической схеме с постоянным изменением физических условий развитие механизма формирования NO можно описать с помощью системы с кинетическими дифференциальными уравнениями, решаемую с помощью

численных методов. Для того чтобы упростить вычислительный алгоритм все дифференциальные уравнения системы с некоторыми допущениями приводят к единому, которое определяет концентрацию необходимого нам вещества. К таким допущениям системы, которая характеризует механизм образования NO, относят принципы квазистационарной концентрации [126, 217] для N, O, N₂O и др. На следующем этапе делают допущение о достижении химического равновесия углеводородными реакциями, протекающими в области пламени, с одновременным завершением выделения тепла. Допущение делается на основании отличия (около двух порядков) скоростей послепламенных и пламенных уравнений [139].

Из-за того, что реакции окисления углеводородов обгоняют реакции окисления N₂, действительная концентрация компонентов в продуктах сгорания отличается от равновесной. Но, проведенные исследования [139] показывают, что отличие сравнительно небольшое и при расчете образования NO применяют принцип равновесных концентраций, вступающих в реакцию веществ O₂, N₂, O, OH, N₂O, N, а не их действительные значения, что не оказывает существенного влияния на итоговые значения концентрации NO. В результате численного интегрирования одних дифференциальных уравнений, определяющих концентрацию NO, и параллельного решения целого блока алгебраических и нелинейных зависимостей с целью расчета равновесной смеси продуктов горения в каждый момент времени, подобные допущения ложатся в основу существующих методов расчета NO в ЦД.

Способы с принципами частичных равновесий используют при учете воздействия «быстрых» NO на итоговую концентрацию NO_x [128, 134]. Эти способы основаны на механизме, в котором быстрые бимолекулярные реакции во фронте пламени обеспечивают принципы локального равновесия между постоянными веществами и радикалами OH, O, H и др. В настоящее время на основе теории горения и химической кинетики разрабатывают способы, позволяющие вычислять сложные кинетические схемы дифференциальных зависимостей, которые включают в себя 200 – 400 уравнений [218-222].

Для описания предпламенных процессов известна кинетическая модель [223], представляющая собой теоретическую основу методики расчёта пространственно-временных параметров рабочей смеси ЦД в фазу периода задержки воспламенения. Использование рассмотренной модели в практической деятельности посредством учёта тепловых и цепных движений допламенных уравнений и связи их с локальным α характеризуется возможностью определения координат областей с горючей смесью и временным моментом зарождения пламени. Модель позволяет с достаточной точностью провести расчёт последующего распространения пламени и в дальнейшем учитывать воздействие уровня завершённости локального предпламенного преобразования на процессы горения топлива.

Адекватное локальное моделирование горения в дизеле требуется для решения многих практических вопросов. Оно необходимо, например, для расчёта процесса формирования вредных веществ в продуктах горения, таких как NO. Дело в том, что константы равновесия реакций образования NO существенно зависят от локальных температур. На скорость этих реакций также влияют локальные концентрации кислорода, не участвующего в окислении углеводородов топлива. Поэтому, правильно рассчитав кинетику горения, можно определить средства влияния на соотношения скорости развития уравнений, на структуру ОГ, их температуру и, конечно, на содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания дизелей.

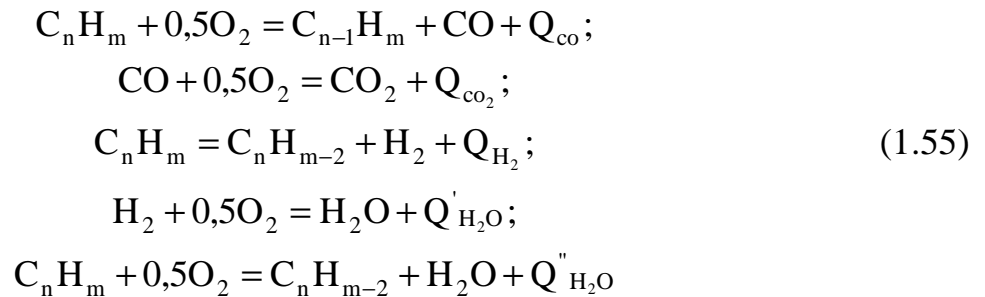
Сложная цепная реакция горения состоит из множества простых всевозможных взаимодействий, в результате которых образуются различные радикалы, активные частицы и относительно устойчивые промежуточные продукты. Поскольку невозможно точно описать элементарные реакции, то следует использовать брутто-схему химической реакции, позволяющую описать минимальное число промежуточных веществ и элементарных стадий [224]. Ввиду отмеченной выше важности оценки локальных температур, целесообразно смоделировать двухстадийный процесс горения, стадии которого различаются температурами. Первую стадию авторы [224] представляют в виде реакций формирования промежуточных элементов CO и H₂, вторую – с конечными продуктами CO₂ и H₂O. Раз-

дельное описание указанных двух стадий позволит определить пространственно-временные характеристики температуры реагирующей системы точнее, чем в одностадийной модели.

Таблица 1.5 - Тепловые эффекты реакций (1.55), кДж/моль

Q_{CO}	Q_{CO_2}	Q_{H_2}	Q'_{H_2O}	Q''_{H_2O}
122	285	-36	242	206

Стехиометрические соотношения реакций и их тепловые эффекты (таблица 1.5) заимствованы из работы Н.Ф. Разлейцева [225]:



При составлении соответствующих кинетических уравнений для каждой реакции требуется определить константу реакции и входящую в неё энергию активации. Были приняты некоторые допущения. Ввиду незначительности роли обратных реакций в образовании основных продуктов в расчёт принимались только прямые реакции. В первом приближении принято отсутствие влияния температуры реагирующей системы на тепловой эффект. Считается, что процессы активации проходят в результате обычных парных столкновений молекул. Следовательно, уравнения рассматривают как бимолекулярные. Гетерогенностью и каталитическим характером процессов на данной стадии работ можно пренебречь. В качестве «представительной» молекулы углеводородов в расчётах принята молекула гептана C_7H_{16} .

В результате представлена схема кинетических зависимостей, причем каждую можно записать в общем виде:

$$\frac{d[C]}{dt} = A\sqrt{T}[C_a][C_b]\exp\left(-\frac{E}{R_\mu T}\right), \tag{1.56}$$

где A - постоянный коэффициент для данного уравнения; $[C]$, $[C_a]$, $[C_b]$ – концентрации, рассчитываемых продуктов реакции и исходных веществ, кмоль/м³.

Предэкспоненциальный множитель константы каждой реакции определён с использованием молекулярно-кинетической теории газов по результатам расчёта числа парных столкновений реагирующих молекул. Встаёт вопрос оценки энергии кажущейся активации E . Известно правило Поляни о связи E с тепловым эффектом реакции Q . Для реакций, протекающих при участии свободных радикалов, академик Н.Н. Семёнов установил эту связь в количественном виде. Она выражена двумя линейными зависимостями - для экзотермических и эндотермических реакций [217, 226]. Однако эти зависимости применимы лишь для малых и умеренных тепловых эффектов. При большом количестве теплоты по формулам получается отрицательная энергия активации, что, по словам Семёнова, - бессмыслица (Бенсон и Альфасси предлагают в этом случае принимать $E=0$). Поэтому предложена гипотеза о том, что нулевой энергии активации соответствует тепловой эффект, равный энергии разрыва внутримолекулярной связи. В результате найдена функция $E(Q)$ в виде

$$E = 5,1 \cdot 10^4 \cdot \exp(-9,1 \cdot 10^{-6} Q) \quad (\text{при } Q \geq 0); \quad (1.57)$$

$$E = 5,1 \cdot 10^4 \cdot \exp(-9,1 \cdot 10^{-6} Q) - Q \quad (\text{при } Q \leq 0). \quad (1.58)$$

Исследуемая связь представлена на рисунке 1.15. Здесь указаны области и экзотермических, и эндотермических реакций. Ломаная линия 1 и опытные точки взяты из работы Семёнова [217, 226]. Предложенная зависимость изображена линией 2.

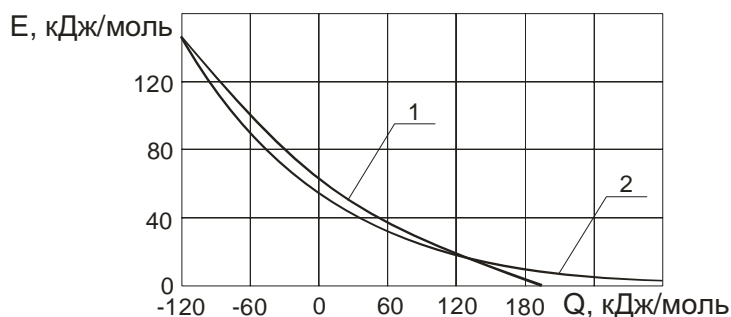


Рисунок 1.15 - Связь между энергией и тепловым эффектом реакций [217, 226]:
1- по формулам Н.Н. Семенова; 2- по предложенным формулам

Главное преимущество новой зависимости - возможность оценки энергии активации для реакций со значительным тепловым эффектом, свойственным реакциям горения в дизеле. С использованием выражений (1.57 и 1.58) вычисляются константы кинетических уравнений (1.55).

Предлагаемая упрощённая математическая модель горения в дизеле позволяет, по крайней мере, различить по кинетике реакции системы (1.56) в расчётах первого приближения. Применение модели для конкретных условий потребует уточнения констант её уравнений при помощи экспериментов.

При моделировании эмиссии NO_x можно выделить схемы с образованием «термических», «быстрых» и «топливных» NO . Основная причина возникновения «быстрых» NO состоит в наличии в пламени сверхравновесной концентрации атомов и радикалов O , C , OH , CH , CH_2 , CN и др. В условиях дизеля количество образующихся «быстрых» оксидов азота невелико. Считается, что их выход не превышает 3–6% от общей концентрации NO_x , вследствие невысокой продолжительности нахождения реагирующих веществ в области пламени, что позволяет многим ученым не учитывать наличие уравнений образования «быстрых» NO .

«Топливные» NO характеризуются способностью формироваться при невысоких температурах. Механизм их становления по сравнению с «термическими» находится в меньшей зависимости от температуры. Но концентрация определяется содержанием N_T , который в дизельном топливе составляет всего 0,024–0,08% (по другим данным 0,007–0,01 % [128]). Кроме того, процент конвертации N_T в NO намного ниже 100%. Превалирующая роль «термического» механизма образования NO_x доказана Я.Б. Зельдовичем. Он доказал, что при определенной постоянной температуре концентрация NO не зависит от состава рабочей смеси и соответствует:

$$\text{NO} \approx \sqrt{[\text{N}_2][\text{O}_2']}, \quad (1.59)$$

где $[\text{O}_2']$ - содержание O_2 в продуктах горения. Независимость химической специфики от каких-либо факторов показывает на важный дополнительный аргумент

в пользу термической теории окисления азота.

Для описания этого процесса обычно используется так называемый расширенный механизм Зельдовича:



Наиболее медленной и, следовательно, определяющей содержание NO соответствует уравнение (1.60), скорость которого обусловлена концентрацией атомов O_2 . Величина же концентрации напрямую зависит от содержания свободных молекул O_2 в продуктах сгорания.

Механизм формирования NO, представленный с помощью системы стехиометрических зависимостей (1.60–1.62), характеризуется сложными химическими реакциями. Кинетические модели таких реакций формируются на блоке существенных допущений, в частности, на принципе кинетической независимости стадий реакции. В общем виде модель может быть записана так:

$$\begin{aligned} d[\text{NO}]/d\tau &= (d[\text{NO}]/d\tau)_1 + (d[\text{NO}]/d\tau)_2 + (d[\text{NO}]/d\tau)_3, \\ (d[\text{NO}]/d\tau)_1 &= k_{f1}[\text{O}][\text{N}_2] - k_{b1}[\text{NO}][\text{N}], \\ (d[\text{NO}]/d\tau)_2 &= k_{f2}[\text{N}][\text{O}_2] - k_{b2}[\text{NO}][\text{O}], \\ (d[\text{NO}]/d\tau)_3 &= k_{f3}[\text{N}][\text{OH}] - k_{b3}[\text{NO}][\text{H}], \end{aligned} \quad (1.63)$$

где k_{f1} , k_{f2} , k_{f3} - константы прямых и k_{b1} , k_{b2} , k_{b3} -константы обратных реакций по соответствующим уравнениям (1.60-1.62). При использовании системы (1.63) значения констант уравнений формирования NO взяты из программного модуля STAR – SD [20]. Локальная концентрация N_2 и O_2 определяется из расчёта показателей процесса сгорания и смесеобразования, количества поступившего в цилиндр N_2 воздуха и сохранившегося после окисления горючей смеси O_2 с учетом занятости части пространства КС конечными и промежуточными продуктами горения. Содержание атомов O_2 определяется из условия его равновесия с молекулярным кислородом:

$$[\text{O}] = 12,6 \cdot 10^3 [\text{O}_2]^{0,5} T^{-0,5} \exp(-31100/T). \quad (1.64)$$

Радикалы OH являются неустойчивыми (лабильными) промежуточными продуктами (интермедиатами) реакций горения, участниками многочисленных элементарных физико-химических процессов. Они выполняют функцию активных центров и обладают серьезной реакционной восприимчивостью. Радикалы OH как лабильные интермедиаты не накапливаются в реагирующем механизме, а принимают активное участие в разветвлении его цепей. Поскольку рассмотрение кинетики со всеми известными реакциями с участием или образованием OH невозможно, следовательно, при расчёте скоростей образования OH использована редуцированная схема химической реакции окисления атомарного водорода молекулярным кислородом, в котором равновесная концентрация атомарного водорода учтена по выражению, аналогичному предложенному Вестенбергом. Для расчётов первого приближения получено уравнение

$$d[\text{OH}]/dt = 0,277 \cdot 10^{15} [\text{O}_2][\text{H}_2] T^{-0,5} \exp(-8,29 \cdot 10^6 / T). \quad (1.65)$$

Итак, полученная система для расчёта горения и образования оксида азота содержит 11 кинетических уравнений. Очевидно, что при работе с данной моделью (так же, как с моделью любого другого уровня сложности) придётся подбирать константы уравнений по экспериментальным данным о текущем составе газов в цилиндре, их концентрации, а также о температурных полях.

Пользуясь результатами цифрового моделирования в изотермической кинетической системе (при сгорании смесей CH_4 и O_2 , H_2 и O_2 , C_3H_8 и O_2) Т.Ю. Салова [227] представила процесс формирования NO в дизеле с помощью граф-модели, изображенной на рисунке 1.16.

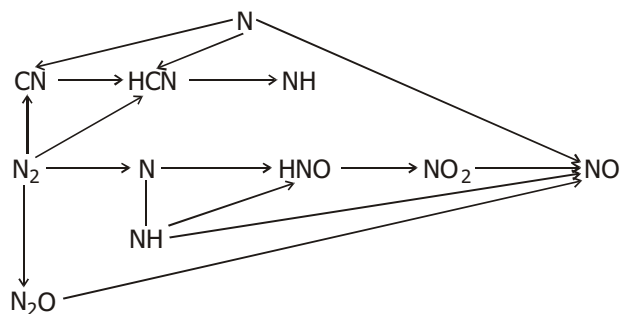


Рисунок 1.16 - Граф-модель формирования NO в ЦД [227]

Векторы граф-модели характеризуют основные реакции, определяющие

концентрацию NO в ЦД.

Анализируя представленные физико-кинетические процессы и модели формирования и образования NO необходимо сделать **вывод**, что нет достаточно полной оценки о составе компонентов и радикалов, принимающих участие в образовании NO в ЦД, работающего на альтернативном виде топлива (метан, метанол, этанол, СТЭ и др.). Следовательно, необходимо проведение научных исследований с целью разработки механизма процесса образования NO в ЦД при работе на различных альтернативных топливах: газообразных, таких как метан, и жидких (СТЭ).

1.4 Основные направления развития способов снижения содержания оксидов азота в дизелях и перспективы их применения

Существует значительное количество различных способов снижения содержания NO_x с ОГ дизелей. Для снижения NO_x изменяют организацию и состав подачи топлива, рабочий процесс, регулируют топливную аппаратуру, подают водяной пар или воду в КС, используют водо-топливные эмульсии; применяют РОГ, межцилиндровый перепуск ОГ, абсорбционную и адсорбционную очистку ОГ, каталитическую нейтрализацию и др. Все указанные способы по организации действия можно разделить на две группы: 1-я группа – уменьшение образования NO_x в процессе горения топлива, 2-я группа – снижение содержания NO_x уже в ОГ после завершения реакций горения. Применяя тот или иной способ снижения NO_x необходимо принимать во внимание не только эксплуатационные показатели работы дизеля, но и экономическую эффективность от применения данного метода.

Снижение NO_x изменением топливоподачи и рабочего процесса дизеля. Широко известно, что для снижения содержания NO_x в выбросах дизелей используют регулировку топливной аппаратуры. В материалах конгресса СИМАС 2013 имеются сведения о влиянии длительности впрыска топлива в дизеле на

концентрацию NO_x в ОГ (рисунок 1.17). Исследования выполнялись на экспериментальной установке, моделирующей рабочий процесс дизеля с помощью гидродинамических параметров и моделей некоторых сопутствующих физических процессов [228].

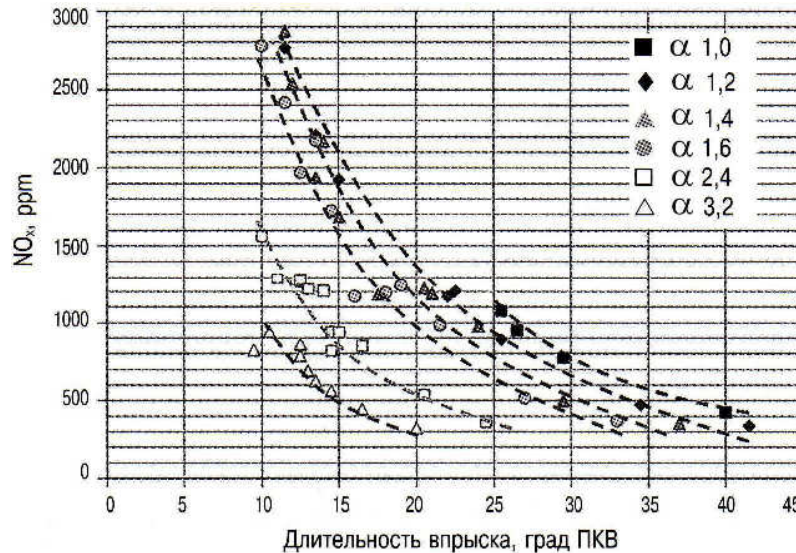


Рисунок 1.17 – Зависимость концентрации NO_x от длительности впрыска топлива при различных значениях α [228]

В работе [22] рассмотрен дизель, ТНВД которого имеет ход плунжера 11 мм, благодаря чему происходит уменьшение NO_x на 20% и C_nH_m до 50%. При этом отмечено содержание на том же уровне оксидов углерода, но увеличение дымности ОГ. При испытаниях дизеля, оснащенного данным ТНВД и штатным турбокомпрессором фирмы «Швитцер» получено снижение NO_x на 47,7%, CO - на 24,2% и C_nH_m - на 24,3% при сохранении неизменным эксплуатационного расхода топлива.

Находят применение и различные схемы управлением топливоподачей, которые реализуют современные интегрированные законы управления у.о.в.т. [229-231]. Так, в МГТУ имени Н.Э. Баумана с целью снижения оксидов азота проведены исследования систем автоматического управления и регулирования дизелей. [230]. Так же в МГТУ имени Н.Э. Баумана [162] для снижения локальных концентраций оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля традиционный гетерогенный процесс сгорания заменяется альтернативным, частично гомоген-

ным процессом, осуществляемым посредством многократного за цикл впрыскивания топлива (рисунок 1.18).

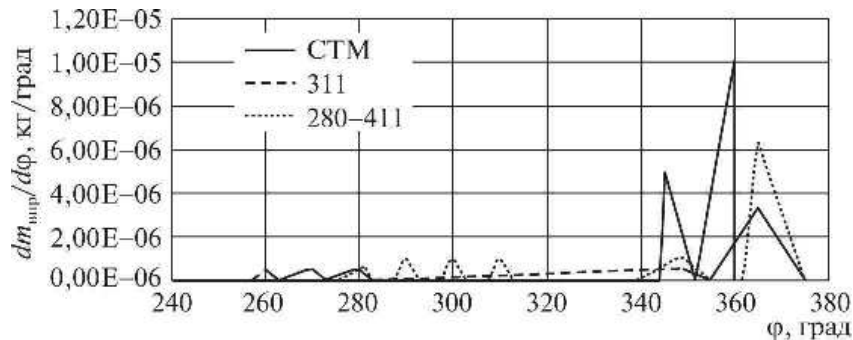


Рисунок 1.18 – Исследуемые характеристики впрыскивания топлива: СТМ - Characteristic Timescale Model [162]

Результаты численных экспериментов по исследованию влияния многократного впрыскивания на экологические показатели двигателя показали, что реализация частично гомогенного сгорания позволяет значительно уменьшить концентрацию оксидов азота и интенсивность процесса образования сажи. При этом локальные образования оксидов азота и твердых частиц сажи в камере сгорания моделировались с использованием расширенного термического механизма Я.Б. Зельдовича и стандартной кинетической модели образования сажи соответственно [162].

Автоматическое управление системой топливоподачи на дизеле 4ЧН 11,0/12,5 (уменьшение $\Theta_{\text{впр}}$ на номинальном режиме до 15° , на режиме холостого хода до 8° до в.м.т.) снижает NO_x в ОГ до 48% [231]. При этом происходит незначительный рост удельного эффективного расхода топлива (1,0-1,5%), но увеличивается выбросы оксидов углерода и суммарных углеводородов.

Создаются электронные системы топливоподачи, функционирующие от единого электронного блока. Так, при оптимизации дизеля 8Ч 12,0/12,0 по $\Theta_{\text{впр}}$ (снижение на 8°) отмечено уменьшение NO_x в ОГ до 14% [230].

В работе [232] при эксплуатации мобильной техники в местах с ограниченным воздухообменом (теплицы, животноводческие фермы, склады), рекомендуют для дизеля 4Ч 11,0/12,5 устанавливать следующие значения топливоподающей аппаратуры: $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$, $q_{\text{ц}} = 56 \text{ мм}^3/\text{цикл}$, $P_{\text{впр}} = 17,5 \text{ МПа}$. Благодаря этому

выполняются нормы по ГОСТ 17.2.2.05-97 для NO_x , по ГОСТ 12.1.005-88 для бенз(а)пирена, но происходит рост выбросов сажи и оксида углерода.

Применение в дизеле 4Ч 10,5/12,0 двухстадийного способа подачи топлива с впрыскиванием первой дозы в цилиндр при завершении процесса выпуска, второй – при завершении процесса сжатия, а также реализацией эффекта внутренней РОГ за счет уменьшения продолжительности открытого положения выпускного клапана снижает на номинальном режиме NO_x на 15%, СО на 12%, сажу на 45% [233].

Для снижения NO_x в дизелях могут применяться различные присадки, топлива, подаваемые на впуске. Так, Академией Прикладных Исследований создана присадка к дизельному топливу, позволяющая уменьшить содержание NO_x до 60%, твердых частиц до 20% и C_nH_m до 50% [234, 235].

В работе [236] описаны многокомпонентные композиции присадок, оптимальное сочетание компонентов которых дает экологический эффект. Эффективность присадок исследовалась по стендовым и эксплуатационным показателям следующих дизелей: 8Ч 12,0/12,0, 8Ч 13,0/14,0, 4Ч 11,0/12,5, 4Ч 8,89/10,1, 1Ч 8,5/11,0. Применение многокомпонентных композиций присадок на вышеуказанных дизелях приводит к снижению сажи до 65% и до 35%.

На образование NO_x сильное влияние оказывает у.о.в.т. [237]. На рисунке 1.19 изображена зависимость влияния удельного расхода топлива при изменении $\Theta_{\text{впр}}$ на относительные удельные выбросы NO_x [21].

Влияние $\Theta_{\text{впр}}$ на концентрацию NO_x в ОГ дизеля Д-240 изображено на рисунке 1.20 [22]. Анализируя представленные данные, достаточно легко заметить, что содержание NO_x в ОГ дизелей увеличивается с ростом $\Theta_{\text{впр}}$ на всех исследуемых режимах работы. Так, наглядно эту зависимость можно проследить на графиках содержания NO_x в ОГ современных дизелей «Deutz», представленных на рисунке 1.21 [54]. С увеличением нагрузки происходит рост NO_x до значений

среднего эффективного давления $P_e = 0,5 - 0,6$ МПа, а далее после достижения максимальных значений снижается.

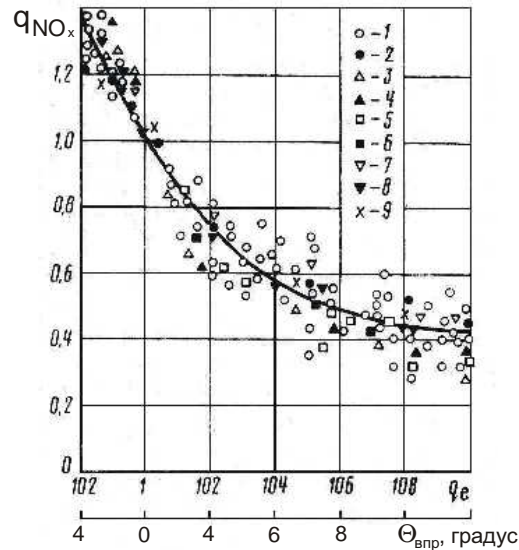


Рисунок 1.19 - Зависимость относительных удельных выбросов NO_x от удельного расхода топлива при изменении $\Theta_{впр}$ [21]: 1 – ЯМЗ – 236; 2 – ЯМЗ – 238; 3 – 1Ч13/14л; 4 – 1Ч13/14ц; 5 – Д – 130; 6 – М/4; 7 – Д – 108; 8 – СМД – 14; 9 – Д – 21

Таким образом, можно предположить, что рост NO_x при нагрузке, соответствующей 70 – 85% от максимальной ($P_e = 0,5 - 0,6$ МПа), связан с повышением максимальной осредненной температуры цикла T_{max} , а при увеличении нагрузки до максимальных значений на скорость формирования NO_x в большей степени оказывает содержание кислорода в заряде цилиндра.

Анализ работ [20-23, 26-34] показывает незначительное изменение NO_x с повышением частоты вращения, либо имеется тенденция к снижению, что, скорее всего, объясняется уменьшением времени на протекание «нужных» реакций образования оксидов азота в КС дизеля. Рассматривая же частоту вращения холостого хода, снижение NO_x достигается вследствие уменьшения максимальных значений осредненной температуры цикла.

Уменьшить концентрацию NO_x в дизеле можно изменив рабочий процесс, например степень сжатия ϵ . Увеличивая степень сжатия можно повысить температуру впускного заряда, что приведет к ускорению подготовки топливовоздушной смеси и интенсификации процессов смесеобразования и сгорания. Таким об-

разом, воздействуя степенью сжатия при впрыскивании топлива на процессы вихреобразования, можно оказывать влияние и на скорость смесеобразования. Уменьшая ϵ происходит менее интенсивное смешивание топлива и сгорание при меньшей T_{\max} в КС, что естественно приводит к снижению NO_x .

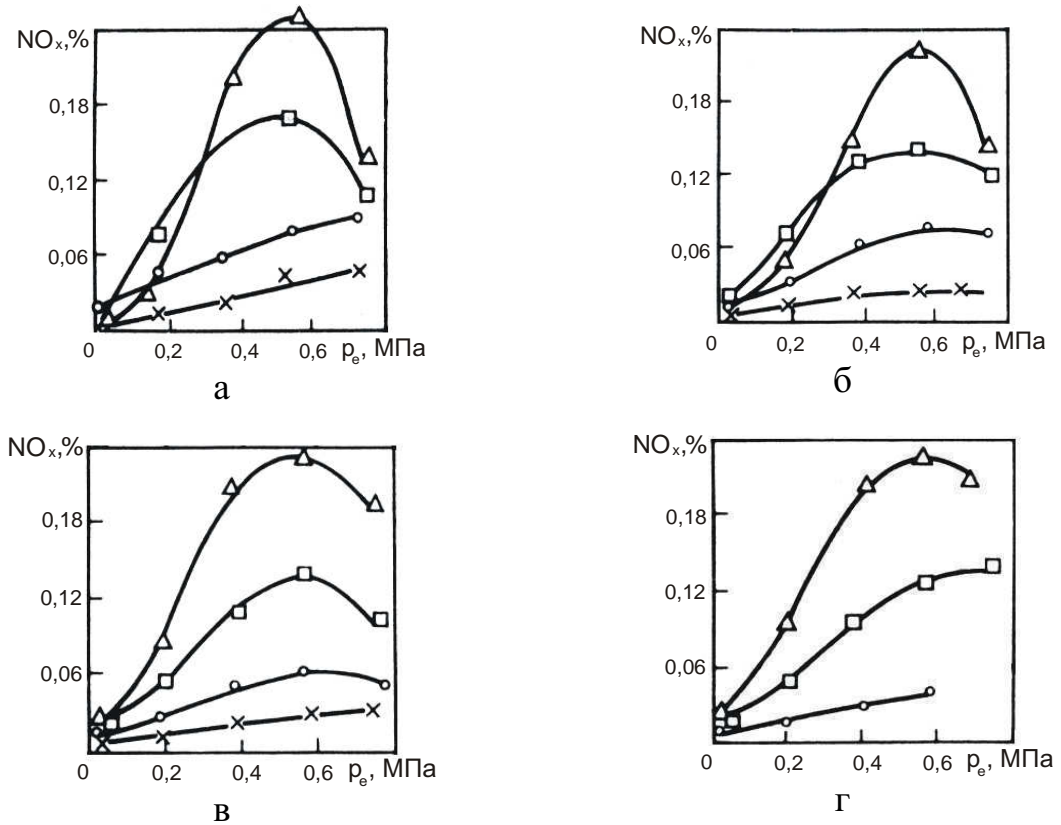


Рисунок 1.20 - Содержание NO_x в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от $\Theta_{\text{впр}}$ [22]: а – $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$; в – $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; г – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$;
 Δ – $\Theta_{\text{впр}} = 30$ градусов; \square – $\Theta_{\text{впр}} = 26$ градусов; \circ – $\Theta_{\text{впр}} = 18$ градусов;
 \times – $\Theta_{\text{впр}} = 9$ градусов

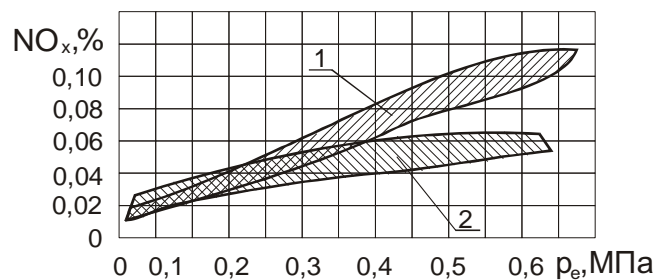


Рисунок 1.21 - Содержание NO_x в ОГ дизелей «Deutz» [22]:

- 1 - дизель F12L413 при $n = 1000 - 2500 \text{ мин}^{-1}$ (непосредственный впрыск топлива);
 2- дизель F8L413 при $n = 1000 - 2650 \text{ мин}^{-1}$ (разделенная КС)

В последнее время для улучшения мощностных, экономических и экологических показателей дизелей активно применяют турбонаддув. Турбонаддув понижает температуру воздушного заряда, а, следовательно, и температуру сгорания, что пропорционально выбросам с ОГ NO_x . Кроме того, применение на дизелях с турбонаддувом охлаждения наддувочного воздуха на впуске позволяет не только повысить коэффициент наполнения, но и приводит к еще большему снижению содержания NO_x .

Нельзя не отметить, что применение турбонаддува повышает коэффициент избытка воздуха α и эффективно снижает дымность ОГ. Кроме того, на единицу мощности может происходить одновременное снижение NO_x , оксида углерода CO и суммарных углеводородов C_nH_m (рисунок 1.22) [54].

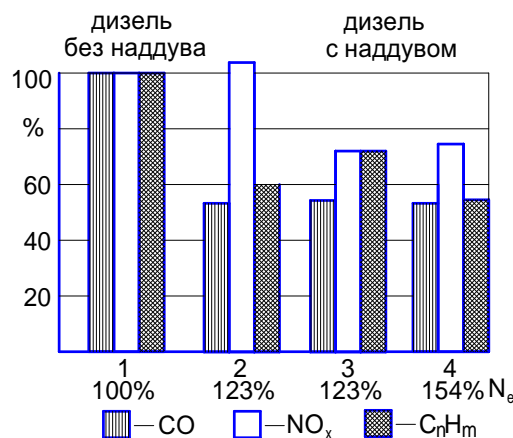


Рисунок 1.22 – Токсичность ОГ дизелей [54]: 1 – дизель без наддува; 2 – дизель с наддувом; 3 и 4 – дизель с охлаждением наддувочного воздуха

Анализируя данные (рисунок 1.22), видно, что применение наддува приводит к значительному снижению оксида углерода CO (около 50%) и практически не зависит от установленной максимальной нагрузки, но вызывает рост содержания NO_x в ОГ, снизить который можно охлаждением наддувочного воздуха.

Известен ряд исследований двигателей с воспламенением от сжатия, работающих на гомогенной рабочей смеси, подтверждающих перспективность реализации цикла Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) для достижения требуемых показателей токсичности ОГ, в первую очередь, для получения предельно низких выбросов NO_x [238-241]. Так в исследовании [238] для снижения

содержания NO_x рассмотрен принцип работы двигателя Z-engine, который сочетает в себе основные преимущества двухтактных и четырехтактных двигателей. На рисунке 1.23 приведена его индикаторная диаграмма.

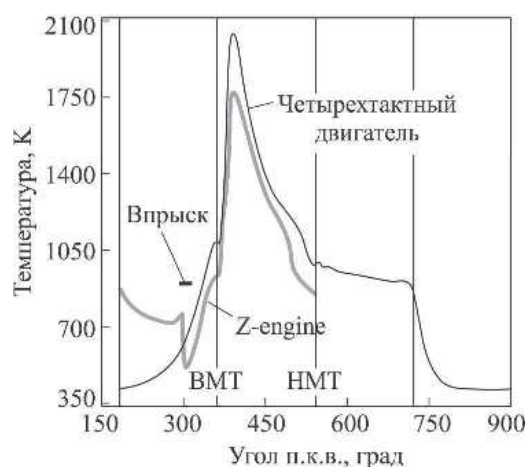


Рисунок 1.23 – Индикаторные диаграммы двигателя Z-engine с HCCI-процессом [238]

Имеется значительное количество исследований, в которых для снижения NO_x с ОГ дизелей применяют так называемые малотоксичные рабочие процессы. Где наряду с совершенствованием топливоподачи и применением всевозможных регулировок предлагается введение многочисленных изменений в конструкцию дизеля (изменение КС, конструкции форсунок, ЦПГ, различных деталей и механизмов двигателя, применение различных покрытий деталей ЦПГ, повышение качества определенных деталей и всего двигателя и др.) [93, 242-252 и др.].

Изменить показатели рабочего процесса дизеля в плане снижения оксидов азота можно введением в цилиндры воды и эмульсий, что позволяет снизить максимальную температуру в зоне горения и, следовательно, уменьшает выбросы NO_x [22, 54, 214, 253 и др.]. Так, известно применение в транспортном дизеле стабилизированных водотопливных эмульсий, позволяющих уменьшить выбросы NO_x и сажи в 2,0 и 2,5 раза соответственно [54]. В работе [22] описаны исследования дизелей 12ЧН 13,0/14,0 и 2Ч 10,5/12,0 с подачей воды во впускной трубопровод. Так, при подаче 40% воды (по массе) от расхода топлива в дизель 12ЧН 13,0/14,0 происходит снижение NO_x около 30%. Подача воды в размере

100% (по массе) от расхода топлива в дизель 2Ч 10,5/12,0 приводит к снижению NO_x в 2 раза, но при этом происходит увеличение выбросов C_nH_m , сажи и CO .

Подача водотопливной смеси в дизеле 4Ч 11,0/12,5 обеспечивает уменьшение NO_x до 6 раз, при росте других токсичных компонентов (в основном продуктов неполного сгорания) и удельного эффективного расхода топлива в среднем на 6% [253]. В работе [214] изучено влияние структуры водотопливной эмульсии на экологические и экономические показатели дизеля с помощью экспериментальной установки (рисунок 1.24). В качестве топлива использовались летнее дизельное топливо и два вида эмульсии одинакового состава (с объемным содержанием воды 17% и содержанием смесового эмульгатора 0,5%), приготовленные с помощью мембран с порами 0,20 и 0,45 мкм.

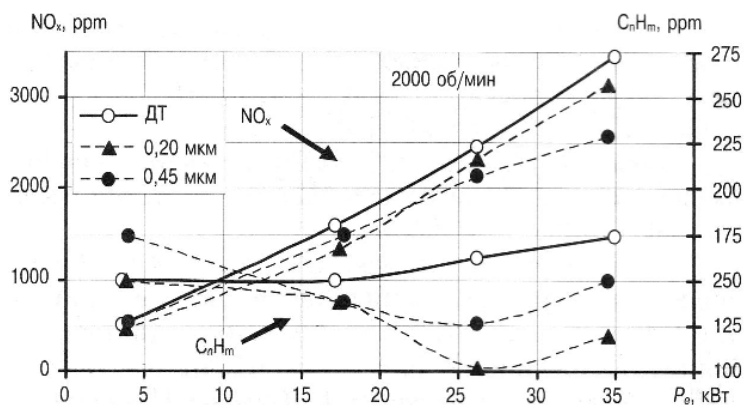


Рисунок 1.24 – Влияние концентрации NO_x и C_nH_m на мощность двигателя на разных скоростных режимах [214]

В ЦНИДИ проведены испытания дизелей 6Ч 18,0/22,0 и 6Ч 15,0/18,0 на водо-топливных эмульсиях с содержанием воды в топливе до 40%. В результате исследований получено снижение NO_x до 30% и сажесодержания почти в 3 раза, но отмечено, что применение водо-топливных эмульсий на малых нагрузках дает обратный результат по суммарной токсичности ОГ [54].

Анализируя представленный материал необходимо сделать **вывод**, что впрыск воды достаточно эффективен в плане снижения NO_x , но вызывает рост в ОГ продуктов неполного сгорания топлива, а изменение, совершенствование систем топливоподачи и рабочего процесса приводят к снижению NO_x в пределах 30-35%, но при этом практически в большинстве случаев происходит увеличение

выбросов других вредных веществ, кроме того, применение малотоксичных рабочих процессов всегда связано с серьезными изменениями конструкции дизелей, что, безусловно, влияет на экономические показатели их работы.

Снижение NO_x применением рециркуляции отработавших газов. В ряде работ [201, 245, 254-267 и др.] с целью уменьшения вредных выбросов с ОГ в первую очередь NO_x применяется РОГ. Так, применение рециркуляции в дизелях 6Ч 18,0/22,0 и 6Ч 12,0/14,0 позволяет снизить содержание NO_x в ОГ на 36% [268]. Известно применение в дизеле 4Ч 9,5/11,0 рециркуляции, газы которой обогащаются кислородом с помощью баллона. При степени рециркуляции $\rho=30\%$ происходит повышение содержания O_2 в заряде более 20%. Выбросы NO_x при этом снижаются на 40% [201].

В.А. Звоновым [21] проведены исследования по влиянию степени рециркуляции на содержание NO_x в ОГ дизелей с различными способами смесеобразования, представленные на рисунке 1.25.

В таблице 1.6. представлены некоторые эффективные и экологические показатели безнаддувного дизеля с КС в поршне типа ЦНИДИ при работе с оптимальной степенью рециркуляции ρ [195].

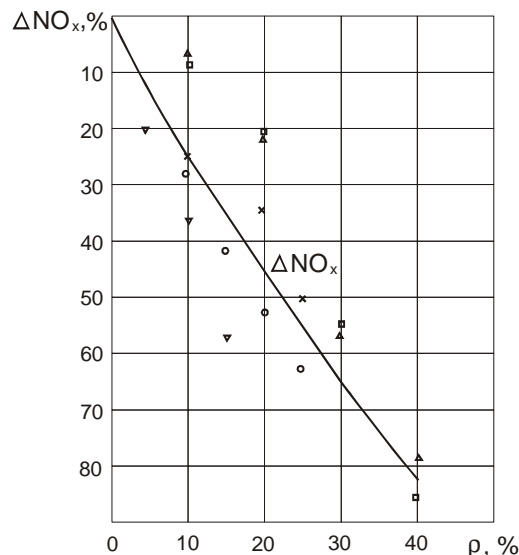


Рисунок 1.25 – Содержание NO_x в ОГ дизелей в зависимости от степени РОГ [21]

Анализируя представленные данные (таблица 1.6) видно, что наибольшее снижение NO_x приходится на малые и средние нагрузки.

Таблица 1.6 - Показатели безнаддувного дизеля с КС в поршне типа ЦНИДИ при работе с оптимальной степенью рециркуляции ρ [195]

Показатели	Малые нагрузки	Средние нагрузки	$P_e > 0,5$ МПа
Повышение часового расхода топлива, %	1...2	2...5	5...8
Повышение температуры ОГ, %	40...45	25...30	20
Снижение количества ОГ, %	65...75	20...60	15...18
Повышение СО в ОГ, мг/л	нет	0,5...1	1...1,5
Снижение NO_x в ОГ	в 4...7 раз	в 2...4 раза	в 2 раза

В работе [257] представлены исследования, согласно которым показано положительное влияние РОГ не только на уменьшение выбросов NO_x с ОГ, но и на снижение износа поршневых колец вследствие снижения максимальной температуры цикла и уменьшения коррозионного износа за счет снижения содержания NO_x .

С целью сокращения содержания оксидов азота в ОГ газодизеля 6Ч 15/18 разработана и испытана система РОГ [268] (рисунок 1.26). Результаты экспериментальных исследований газодизеля 6Ч 15/18 с РОГ представлены в таблице 1.7.

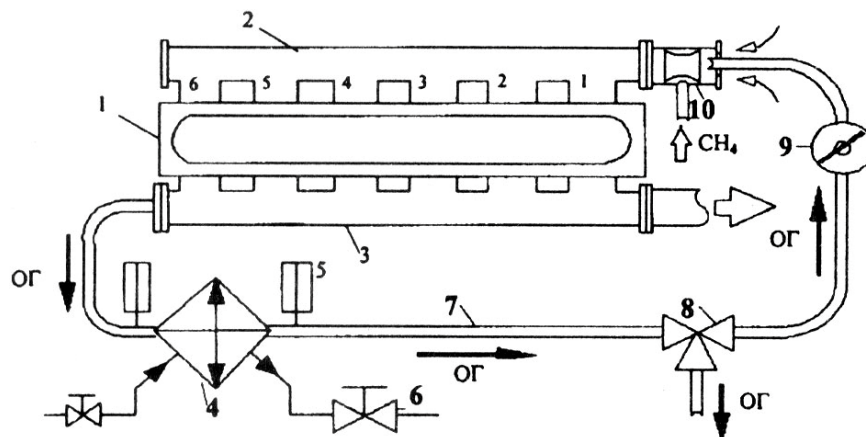


Рисунок 1.26 - Схема системы РОГ [268]: 1 – газодизель; 2 – впускной коллектор; 3 – выпускной коллектор; 4 – теплообменник; 5 – термометр; 6 – дроссельный вентиль; 7 – магистральная труба системы перепуска ОГ; 8 – трехходовой кран отбора проб газа; 9 - регулировочная заслонка; 10 – газовоздушный смеситель

Таблица 1.7 - Результаты экспериментальных исследований
газодизеля 6Ч 15/18 с РОГ [268]

Режим	α	NO _x , ppm CO ₂ , O ₂ , %	ρ , %	Снижение NO _x , %
Газ + ДТ 30%, $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$	2,18	NO _x = 448 CO ₂ = 6,13 O ₂ = 11,6	0	3
Газ + ДТ 30% + РОГ 50%, $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$	1,99	NO _x = 353 CO ₂ = 6,7 O ₂ = 10,7	8,6	25

На рисунке 1.27. представлены результаты исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5 с РОГ [22]. Анализируя данные, представленные на рисунке 1.27 видно, что повышение ρ снижает выбросы NO_x, причем это снижение увеличивается с ростом нагрузки дизеля. В общем можно отметить, что кривые содержания NO_x похожи на параболы, максимальные значения которых наблюдаются в области минимальных степеней РОГ. Необходимый эффект от РОГ обуславливается повышением теплоемкости смеси, снижением концентрации кислорода и скорости окисления N₂, что вызывает снижение максимальной температуры и, соответственно, снижение NO_x.

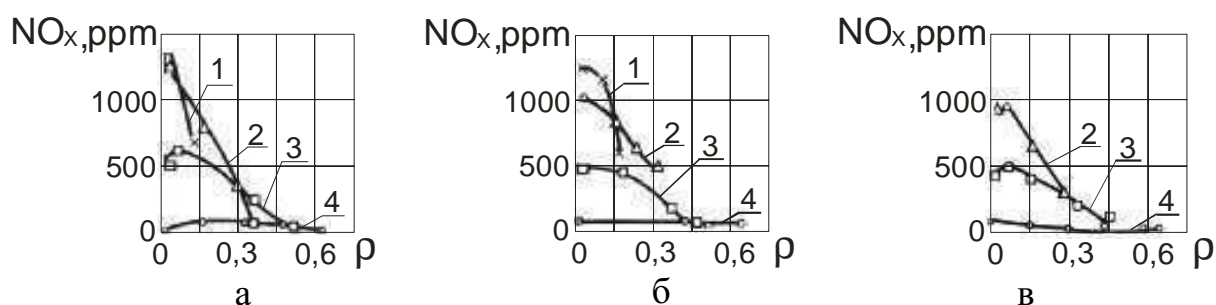


Рисунок 1.27 - Содержание NO_x в зависимости от степени РОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 [22]: а - $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$; в - $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; 1 - $p_e = 0,03 \text{ МПа}$; 2 - $p_e = 0,185 \text{ МПа}$; 3 - $p_e = 0,37 \text{ МПа}$; 4 - $p_e = 0,555 \text{ МПа}$

Изменение содержания теплоемкости и кислорода в смеси достигается разными способами (рисунок 1.28): классической РОГ; применением внутренней РОГ за счет изменения перекрытия клапанов; увеличением остаточных газов и др. [20].

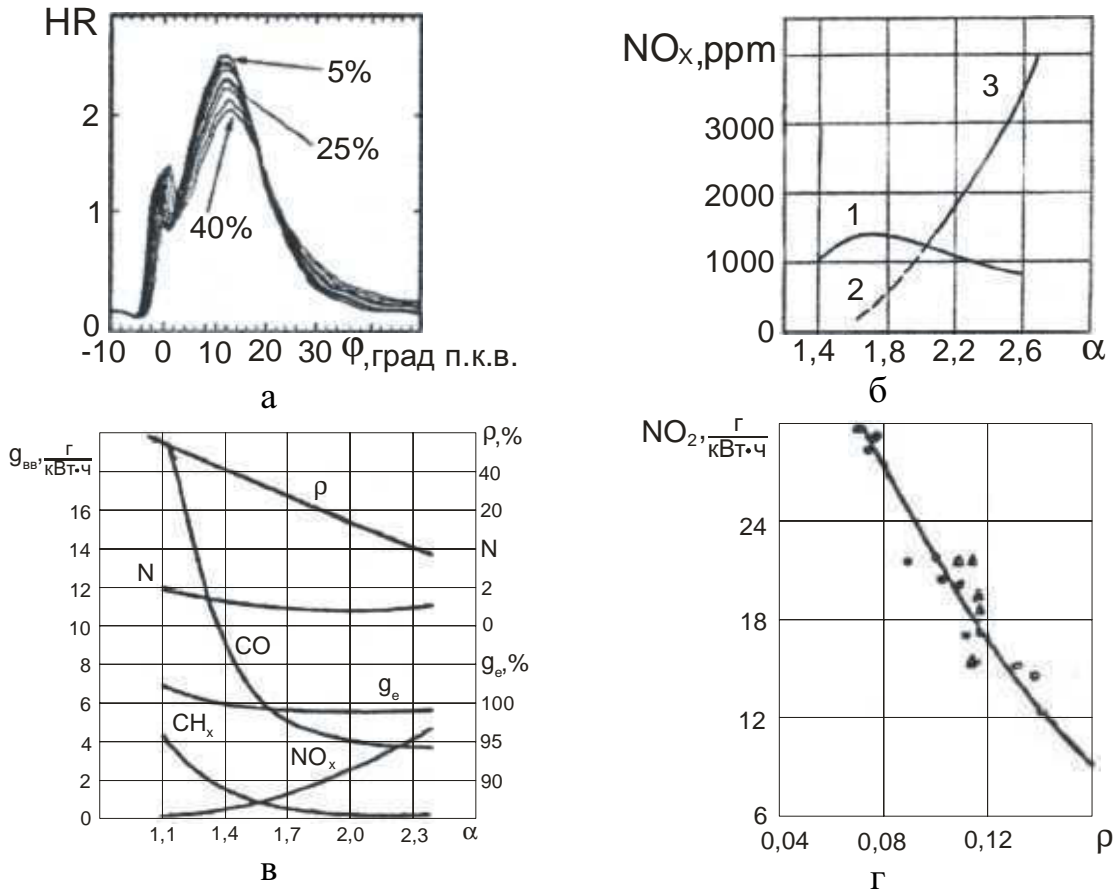


Рисунок 1.28 - Способы организации РОГ и влияние ее на параметры работы дизеля [20]: а – на тепловыделение в КС; б – на изменение NO_x в ОГ с обогащением воздушного заряда кислородом (3) или азотом (2); исходное содержание NO_x (1); в – на эффективные параметры и содержание токсичных компонентов; г – на содержание NO₂ в зависимости от степени рециркуляции

Рециркуляция ОГ как эффективное средство снижения NO_x в большинстве случаев вызывает увеличение продуктов неполного сгорания топлива, сажесодержания в ОГ и ухудшение экономических параметров дизеля. Суммарные же углеводороды C_nH_m при применении РОГ зависят как от организации рабочего процесса в дизеле, так и от способа РОГ. Поэтому наряду с применением РОГ обычно применяют и другие методы борьбы с токсичностью, например регулирование у.о.в.т. (рисунок 1.29) [20].

Фактический коэффициент рециркуляции соответствует $\rho = 0,08 - 0,12$. Превышение оптимального значения степени рециркуляции вызывает увеличение C_nH_m и других компонентов неполного сгорания топлива, а также дымности ОГ. Кроме того, это приводит к падению мощности и ухудшению топливной эконо-

мичности, что особенно резко усиливается при значении ρ свыше 0,20. Тем не менее, при настройке системы EGR за счет учета стандартизованного испытательного цикла (по которому должен проверяться двигатель или автотранспортное средство) возможно существенное превышение указанных цифр (рисунок 1.30) [20].

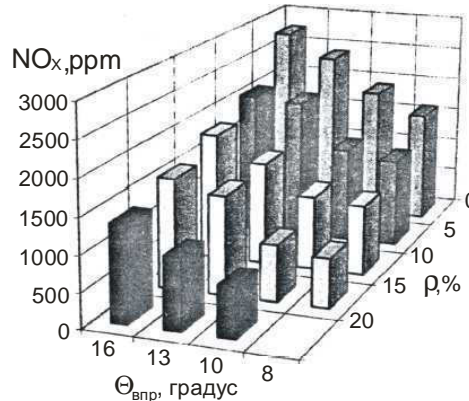


Рисунок 1.29 - Оценка совместного влияния коэффициента рециркуляции ОГ ρ и изменения у.о.в.т. на содержание NO_x в ОГ дизеля [20]

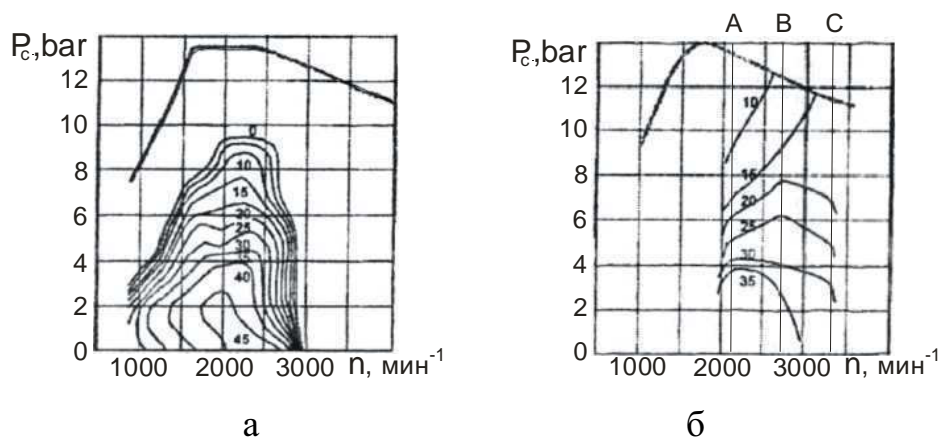


Рисунок 1.30 - Настройка системы EGR, обеспечивающая максимальную эффективность при испытаниях по циклам [20]: а – ETC для категории LDV; б – ESC для категории LCV

Необходимо отметить, что при максимальных нагрузках и близких к максимальным необходимо снижать степень подачи рециркулируемых газов вследствие невысоких значений коэффициента избытка воздуха, в противном случае это приводит к ухудшению параметров процесса горения и росту компонентов неполного сгорания топлива. Необходимо также учитывать и методику определения выбросов токсичных компонентов с ОГ. Так, согласно Правил ЕЭК ООН249-02 на двух режимах (номинальном и при максимальном крутящем моменте), максимальные величины значений коэффициента весоности - 0,25 и 0,1 соответственно.

Поэтому, долевым вклад этих двух режимов в общие удельные выбросы токсичных веществ может достигать 65-75% для NO_x , 70-75% для CO и около 50% для C_nH_m . Следовательно, небольшое снижение содержания токсичных компонентов в ОГ на этих двух режимах может дать существенный вклад на общее снижение токсичности ОГ.

Рассматривая РОГ как способ снижения NO_x в ОГ дизеля нельзя не отметить исследования ученых, направленные на применение РОГ в комплексе с другими методами снижения токсичности [20-22, 53, 54, 254, 265, 269 и др.]. Так, в работе [269] рассмотрен метод, предназначенный для одновременного уменьшения NO_x и дымности ОГ, который состоял из РОГ и системы Common rail. Система Common rail имела общую емкость с дизельным топливом, которое было постоянно подведено к форсункам и находилось под давлением 150 – 200 МПа. За счет высокого давления обеспечивалось улучшенное качество смесеобразования, более полное сгорание и уменьшение выбросов CH_x , CO и сажи. Увеличенные температуры NO_x понижались за счет РОГ.

Анализируя представленные способы снижения NO_x в дизелях и перспективы их применения необходимо сделать **вывод**, что будущее все таки за комплексным подходом снижения токсичности ОГ дизеля, где есть возможность снизить не только основные токсичные компоненты, но и минимизировать использование нефтяного топлива, возможно уменьшая при этом объем отработавших газов дизеля, например за счет РОГ.

Снижение NO_x нейтрализацией отработавших газов. Широкое распространение для снижения оксидов азота получили различные системы нейтрализации ОГ, в которых используется комбинация из благородных металлов, восстанавливающих NO_x до N_2 [175, 270-279 и др.]. Основным инструментом, обеспечивающим достаточно хорошую работу нейтрализатора ОГ, - это λ -датчик, определяющий концентрацию O_2 в ОГ. Как только в ОГ λ -датчик распознает O_2 , происходит увеличение скорости подачи топлива с помощью электронной схемы об-

ратной связи дизеля. Если же в ОГ O_2 не детектируется, то электронный блок наоборот уменьшает скорость подачи топлива [175].

В работе [278] рассмотрены стендовые испытания дизеля 1С15/16 с палладиевым катализатором АПК-2 (1,5–2,0%Pd). Величина нейтрализации таким катализатором составляет для CO - 60-80% и для NO_x - 20-40%.

Использование каталитического нейтрализатора на основе пористых проницаемых каталитических блоков на дизеле КамАЗ-740, установленного примерно по центру расстояния от дизеля до глушителя, приводит к снижению NO_x в 2,03–2,05 раза, CO в 1,42–1,45 раза, C_nH_m в 1,44–1,31 раза, твердых частиц в 2,49–2,50 раза [280].

Для дизелей, устанавливаемых на грузовых автомобилях FL6 и FM9 Volvo были предложены фильтры для нейтрализации ОГ, основанные на комбинации сажевых фильтров и окисляющего каталитического нейтрализатора [53, 54]. При этом отмечено снижение C_nH_m и сажи на 80-90%, NO_x на 24-36%.

В ФГУП «НАМИ» с участием АО «НПО Турботехника» и ООО «Экоальянс» разработали систему нейтрализации и испытали на дизеле Д-243 (рисунок 1.31). С помощью накопительной системы нейтрализации с каталитическим покрытием LNT4 происходит снижение NO_x в ОГ дизеля Д-243 на 40-50% [274].

Немецкой фирмой Emitek разработана технология, при которой осуществляется подогрев каталитического нейтрализатора с помощью мощного электрического сопротивления, что позволило улучшить степень восстановления NO_x . Катализатор при этом начинал действовать в интервале температур 250-300°C, а время подогрева достигало нескольких минут и зависело от тягового класса автомобиля и условий его эксплуатации. Наиболее применяемый с этой технологией катализатор 6С (или Emitek) устанавливался на автомобили BMW. Так же необходимо отметить и каталитические нейтрализаторы Edekt компании Delfai и Puma компании Korning, использовавшиеся для нейтрализации ОГ во время пуска холодного двигателя [53, 54].

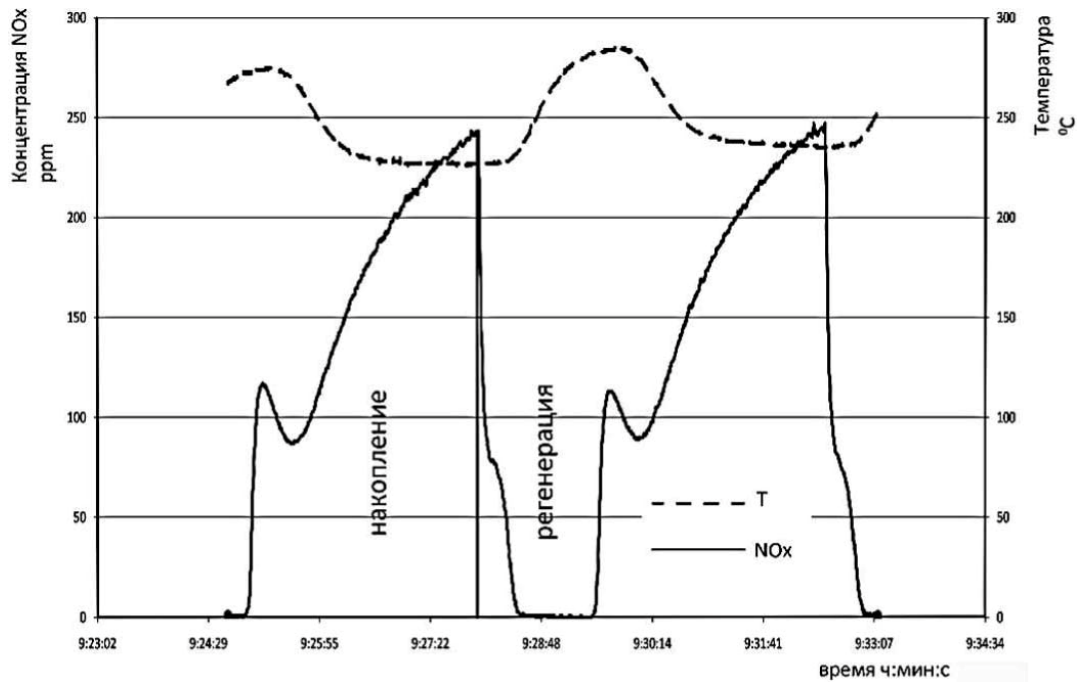


Рисунок 1.31 - Результаты испытаний каталитического покрытия LNT4 [274]

В компании «Toyota» имеются материалы о разработке системы очистки ОГ, названную «DPNR». Эта система с помощью микропористого керамического фильтра, который покрыт накапливающим азот материалом, и катализатора на основе платины нейтрализует NO_x и частицы сажи. При работе ДВС на бедной смеси происходит окисление частиц сажи кислородом, который образуется при реакции NO и O_2 в процессе образования NO_x . Система очистки «DPNR» позволяет снизить содержание NO_x до 80%, но существенным ее недостатком является то, что она применима лишь только для дизелей, которые работают с системой «Common rail» [281].

Для снижения NO_x нашли также применение и жидкостные нейтрализаторы ОГ. Жидкостные нейтрализаторы барботажного типа активно использовались на дизелях самосвалов БелАЗ–540А, МАЗ–503А, КрАЗ–256Б, МоАЗ–6401, «Кирунатрак» (Швеция), бульдозерах Д–108 и Д–135, дизельном оборудовании Канады, Японии, Франции, США и других стран. Так, жидкостный нейтрализатор барботажного типа позволял очистить ОГ от NO_x до 20%, от сажи до 10–30%, от альдегидов до 50–100% [22, 54, 282-285 и др.].

Достаточно распространен способ, основанный на восстановлении NO_x различными аммиачными растворами [145, 284-288 и др.]. Так, компания Daimler Chrysler разработала способ нейтрализации ОГ – Selective Catalytic Reduction (SCR), который состоял из жидкостного каталитического нейтрализатора, где происходило восстановление NO_x до N_2 . Для этого в нейтрализатор подавался специальный аммиачный реагент AdBlue. А компания Total взамен AdBlue разработала реагент на водной основе. С помощью системы SCR осуществлялась нейтрализация в ОГ NO_x до 80–90% не ухудшая при этом по сравнению с РОГ показатели рабочего процесса дизеля [284].

Известно применение нейтрализаторов Denox [285], в которых осуществляется подача углеводородного топлива либо мочевины $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ в выпускную систему. Достижимый уровень восстановления по NO_x при этом достигал 30–45%. В работе [175] рассмотрен метод, при котором происходит селективное некаталитическое восстановление NO_x до N_2 . При этом аммиак NH_3 добавляют в ОГ, где происходит реакция с радикалами OH и образуется NH_2 . Оксид азота NO взаимодействует с NH_2 с образованием H_2O и N_2 .

Достаточно широко нейтрализацию ОГ применяют в комплексе с другими методами снижения токсичности [218, 272, 289-291 и др.].

Так, на дизеле 4ЧН13/15 применены системы и каталитической нейтрализации и РОГ. Результаты исследования токсичности указанного дизеля представлены на рисунке 1.32. Снижение оксидов азота составило 27,4%, углеводородов – 49,4%, оксида углерода – 32,6% и твердых частиц – 37,5% [289].

В работе [269] рассмотрен способ нейтрализации NO_x с помощью применения РОГ (9%) совместно с фильтром-нейтрализатором (ЦНИДИ) на дизеле 6Ч15/18 и НПФ «Нейтраль-ЭКО» – на дизеле 6Ч18/22. Испытания дизеля 6Ч18/22 по винтовой характеристике показали уменьшение вредных веществ в ОГ, в т.ч. NO_x на 35% (рисунок 1.33).

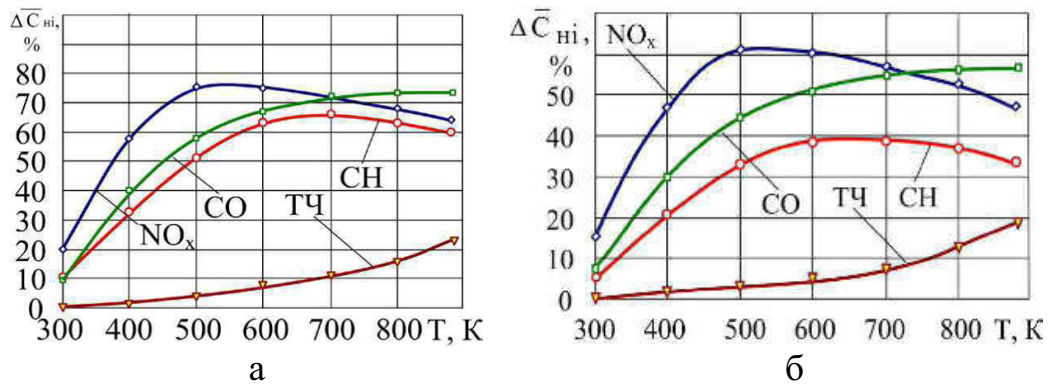


Рисунок 1.32 - Влияние температуры ОГ в нейтрализаторе на степень преобразования вредных веществ в ОГ дизеля 4ЧН13/15 при работе с системой нейтрализации и РОГ [289]: а – $n = 1350 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1850 \text{ мин}^{-1}$

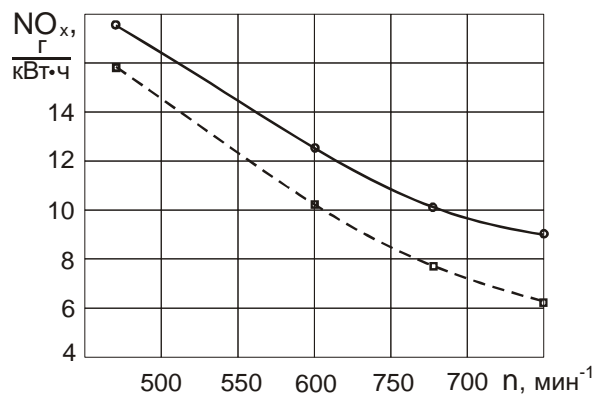


Рисунок 1.33 - Удельные выбросы NO_x в ОГ дизеля 6Ч18/22 в зависимости от изменения частоты вращения [269]: \circ — \circ – ДП; \square — \square – ДП с РОГ при $\rho=0,09$

Анализируя представленный материал необходимо сделать **вывод**, что для восстановления NO_x аммиачными растворами рекомендуется поддерживать высокую температуру ($900\text{-}950^\circ\text{C}$), кроме того, возможны выбросы не прореагировавшего аммиака, поэтому это способ не нашел широкого распространения. Что касается жидкостных нейтрализаторов, то следует заметить, что для нейтрализации всего объема ОГ необходимо размещение на силовой установке соответствующего объема реагентов, что также является определенным препятствием. Каталитические нейтрализаторы хотя и ограничены определенным ресурсом и «хорошей» стоимостью (если выполнены на основе благородных металлов) получили большее распространение, но как показывает анализ в комплексе с другими методами снижения токсичности.

Снижение NO_x применением альтернативных топлив. Не однозначное воздействие на процессы образования NO_x оказывает и состав топлив, приме-

няемых в дизелях. В связи с высокой волатильностью на нефтяном рынке и ухудшающейся экологической обстановкой все чаще проводятся научные разработки, направленные на снижение токсичности ОГ, в частности NO_x , и поиск различных альтернативных видов топлива, таких как природный газ, спирты и их эмульсии, биотоплива, эфиры, сжатые и сжиженные газы, электричество, солнечная энергия, аммиак, жидкий азот, водяной пар, водоросли и т.д. [22, 53, 54, 293-350 и др.].

Рассмотрим наиболее перспективные, позволяющие надежно снизить не только содержание NO_x в ОГ, но и практически весь спектр токсичных компонентов с сохранением мощностных и экономических показателей дизеля, учитывая при этом практическое применение данного топлива в настоящее время.

Компания Ballard Power System представила метод снижения NO_x в ОГ дизеля с помощью водорода [53, 54]. Метод заключался в добавке к дизельному топливу водородосодержащего синтез-газа, который получался прямо на автомобиле из углеводородного топлива с помощью генератора синтез-газа. Поскольку водородному топливу присуще высокая экологическая чистота, то при внедрении данного метода можно было бы получить ощутимый эффект в улучшении экологических показателей ДВС, а так же повысить их топливную экономичность.

Но внедрение водорода в качестве альтернативного топлива ограничено нерешенным вопросом хранения его на борту автомобиля, поскольку водород обладает низкой энергоплотностью, а его объемная теплопроизводительность будет уступать большинству газообразных и жидких топлив. Кроме того, некоторые исследователи [220] считают, что хранение водорода на автотранспортном средстве нерационально вследствие габаритов баллонов, их массы и взрывоопасности. Следовательно, целесообразно оснащение борта автомобиля установкой, вырабатывающей водород, например, из углеводородного топлива. Варианты прямого сжигания водорода в ДВС по экологическим характеристикам и КПД уступают применению его в виде топливных элементов. Производство экологически чистых автомобилей, работающих на водороде, на данный момент превышают желаемые затраты более чем в 10 раз [307].

Компании Cummins Westport Inc. (Канада), SunLine Transit Agency (США), DAF (Голландия) модернизировали восьмицилиндровые наддувные дизели автобусов CF85.380 и CF85.430 для работы на водородно-метановой смеси «вотан» (водород 20% + метан 80%). В результате проведенных исследований в ОГ испытуемых дизелей получено снижение NO_x на 28% и уменьшение уровня шума [53, 54].

На данный момент дизели – это основная энергетическая установка тракторов, самоходных машин, автомобилей большой мощности, поэтому перевод их на альтернативное топливо представляет, несомненно, особый интерес. А для обеспечения конвертации обратно в дизель хорошо подходит газодизельный процесс [330, 331 и др.]. ПГ из всех доступных заменителей жидких нефтяных моторных топлив характеризуется как наиболее полноценное топливо, перевод дизеля на которое не требует серьезных конструктивных изменений у серийных дизелей. Кроме того, важное преимущество газодизеля в его двухтопливности, что увеличивает и запас хода автомобиля. Не нуждается ПГ и в технологической переработке (кроме сушки), а количество разведанных его запасов, достаточно разветвленные магистральные газопроводы, отводы, подземные газохранилища, городские газовые сети – это фундамент готовой инфраструктуры для газоснабжения автомобильного парка страны. КПГ на сегодняшний день считается достаточно перспективным альтернативным видом топлива. Необходимо также выделить, что КПГ относят к экологически чистым топливам, приоритетность которых признана во многих странах мира [332-365].

В работе [52] рассмотрены вопросы, связанные с конвертированием дизелей в газовые, газожидкостные и двухтопливные двигатели. При этом изучены вопросы конструктивных и регулировочных факторов на образование NO_x в КС конвертированного на ПГ дизеля. Так, отмечено преимущество эффективных характеристик газового двигателя с ω -образной КС, но при рассмотрении образования оксидов азота (рисунок 1.34), эта камера обладает наихудшими характеристиками.

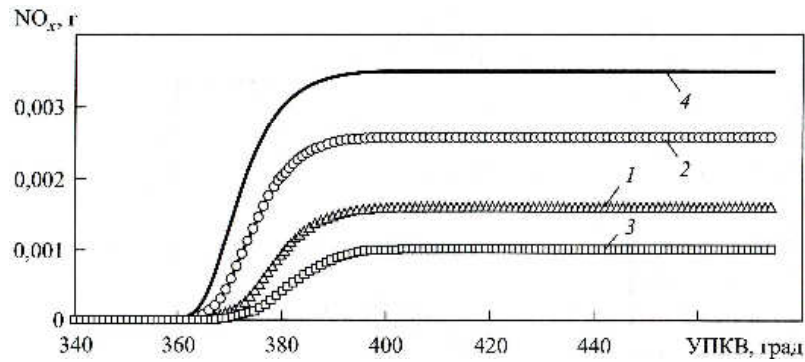


Рисунок 1.34 – Изменение массы образовавшихся за цикл NO_x в цилиндре газового двигателя в зависимости от формы КС (режим номинальной мощности) [52]:
1 – симметричная; 2 – смещенная; 3 – коническая; 4 - ω-образная

Рассматривая интенсивность вихревого движения заряда на образование NO_x в цилиндре газового двигателя автор [52] отмечает, что значения локальных концентраций оксидов азота в процессе сгорания обуславливаются значениями локальных температур, а также локальных коэффициентов избытка воздуха. Это подтверждается графиком изменения усредненных по всему объему цилиндра концентраций NO_x (после начала сгорания область образовавшихся NO_x для варианта с вихревым числом 2 почти в 5 раз больше, чем для остальных случаев, рисунок 1.35).

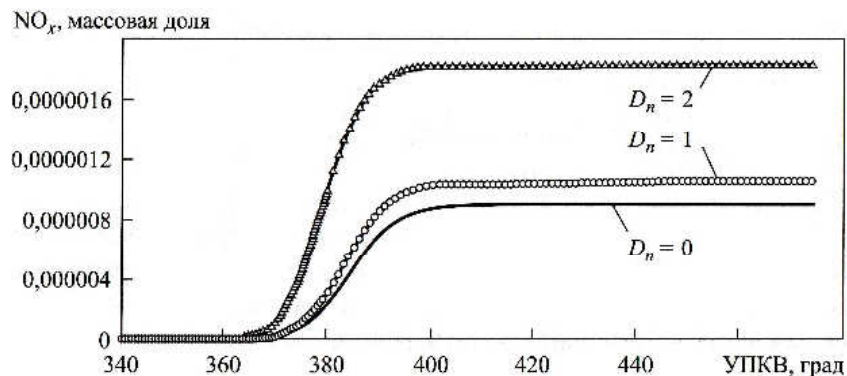


Рисунок 1.35 – Суммарные концентрации образовавшихся за рабочий цикл NO_x в цилиндре газового двигателя с симметричной КС в зависимости от интенсивности вихревого движения (D_n – вихревое число) заряда (режим частичной нагрузки $N_e=156$ кВт; $n=1550$ мин⁻¹) [52]

На ОАО «КамАЗ» использование КПГ позволило довести токсичность ОГ двигателей до уровня стандартов Евро-4, Евро-5. При этом отмечается, что экологическое преимущество метана заключается в более низком содержании вредных и канцерогенных веществ в ОГ – оксидов азота и углерода, суммарных углеводо-

родов, бензаприрена, сажи по сравнению со штатным нефтяным топливом [348-350]. В работе [351] описана газодизельная технология «OSKAR-N DIESEL SAS», позволяющая продлить ресурс двигателя за счет снижения давления в ТНВД, сэкономить нефтяное топливо путем замещения ПГ и довести токсичность ОГ до уровня стандартов Евро-4, Евро-5.

При стендовых испытаниях газодизелей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 были получены данные об отсутствии снижения мощностных показателей, а степень замещения штатного нефтяного топлива газовым составила 70-75% [53, 54].

На базе Вятской ГСХА исследованы и разработаны газодизельные модификации: 4Ч 11,0/12,5 и 4ЧН 11,0/12,5. Газовый анализ ОГ по ГДП показал не только надежное снижение сажесодержания, но и оксидов углерода [23, 335, 366-370]. Но не всегда применение ПГ приводит к снижению содержания NO_x в ОГ. Так, имеются исследования, где при переходе на ГДП происходит рост NO_x в ОГ. Seriously вопросами применения КПП в качестве моторного топлива в дизелях занимаются в МГТУ им. Н.Э. Баумана, НАТИ, МАДИ, ВНИИГАЗ, НАМИ и др. [371, 372]. Так, в совместном проекте НАМИ с НИЦИАМТ осуществлена разработка газодизеля Tatra T-3-929 рабочим объемом 15,8 л и степенью сжатия 16,5 для самосвала Tatra 815C2. При этом расход топлива по ГДП составил 16,0 л/100 км - дизельное топливо, 24,5 м³/100 км - ПГ, а разгонные характеристики газодизеля улучшились на 11-12% [373].

За рубежом известны исследования и производство газодизельных модификаций компаниями «Sulzer» (Швейцария), Delaval Enterprise (США), Pielstik, English Electric (Великобритания), Jenbacher (Австрия) и др. [22, 23, 53, 54, 59, 71 и др.]. Так, в компании Iveco (Италия) предлагали дизели (рабочий объем 2,8 л., мощность 106 л.с.), работающие на ПГ, для небольших грузовиков Daily S. Запас хода на ПГ составлял до 360 км при этом грузовик выполнял нормы Евро-5 [53, 54].

В работе [374] рассмотрен дизель 4Ч 9,85/12,7, перевод которого для работы по ГДП вызывал увеличение содержания NO_x в ОГ до 2,8 раз (рисунок 1.36).

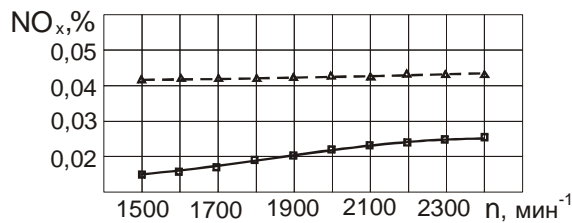


Рисунок 1.36 - Содержание NO_x в ОГ дизеля 4Ч 9,85/12,7 [374]:

— — — — ДП; — — — — ГДП

Из рассмотренного материала можно отметить основные достоинства ГДП: экономия на 60–80% жидкого нефтяного топлива за счет замещения его ПГ; увеличение эффективного кпд; меньший на 3–5 дБ уровень шума; снижение в 2–3 раза дымности ОГ; сниженный выброс дисперсных частиц; сохранение мощностных показателей на уровне ДП; несколько увеличенный запас крутящего момента на режиме при максимальном крутящем моменте; увеличение ресурса цилиндро-поршневой группы и срока службы моторного масла (вследствие меньшей дымности ОГ, что ограничивает образование твердых частиц, вызывающих абразивный износ и уменьшающих срок службы масла). Но не всегда применение ПГ приводит к снижению NO_x в ОГ, следовательно, это говорит о необходимости применения дальнейших мероприятий для устранения данного недостатка.

Не менее перспективным способом снижения токсичности и дымности ОГ дизелей по отношению к КПГ является применение в качестве моторного топлива спиртов (метилового и этилового). Поскольку метанол и этанол синтезируют из СО и H_2 , то их с уверенностью можно отнести к возобновляемым источникам энергии. Но метиловый спирт - довольно токсичное соединение, поскольку в организме человека может превращаться в формальдегид. Использование в дизелях спиртов (этилового и метилового) в чистом виде довольно проблематично из-за их отличия от нефтяного топлива, поскольку цетановое число этанола не превышает 8, у метанола – 5, вместо 50 - у дизельного топлива, следовательно у этанола и метанола низкая склонность к самовоспламенению. У этих спиртов не высокая теплота сгорания: 19,67 МДж/кг – у метанола, 26,40 МДж/кг – у этанола вместо 42,53 МДж/кг - для дизельного топлива, а теплота испарения 1,11 МДж/кг –

у метанола и 0,90 МДж/кг – у этанола против 0,25 МДж/кг – у дизельного топлива [374]. Тем не менее, имеется достаточное количество разработок по применению метилового и этилового спиртов в дизелях как в РФ, так и за рубежом [375-385 и др.]. За рубежом над вопросами использования этанола и метанола в дизелях трудятся лидирующие моторостроительные компании: Ricardo (Англия), John Deere, Caterpillar, General Motors (США), Komatsu (Япония), Burmester (Дания), Scania, Volvo (Швеция), Volkswagen, Daimler-Benz, MWM, MAN (Германия) и др. [5, 91, 240, 310-316, 320, 321, 326-329 и др.].

Анализируя научно-исследовательские работы хорошо видно, что величина улучшения экологических показателей дизелей, работающих на спиртах (этиловом, метиловом) зависит от метода и количества подаваемого спирта в дизель.

В работах [53, 54] описаны три способа подачи метилового спирта в дизель Д-2156-МТН-8 (Румыния) для грузового автомобиля. Метанол подавали в виде СТЭ на впуске с помощью форсунки и дополнительного насоса. При этом применение метилового спирта в качестве СТЭ существенно снижает в ОГ NO_x и сажу. Компанией Daimler-Benz модернизирован дизель М407h, работающий на парах метанола с принудительным воспламенением. Выбросы NO_x и C_nH_m с ОГ на испытаниях по токсичности (13-ступенчатый ездовой цикл) снизились на 25%, содержание в ОГ формальдегида снизилось в 3,5–14 раз. Проведены исследования дизеля OM 407 на предмет влияния присадок на самовоспламенение метилового спирта. В спирт добавляли 1% касторового масла, 4% триэтиленгликольдинитрата, 0,2% морфолина (антиокислительная присадка). Исследования показали снижение NO_x в ОГ на 50% и улучшение рабочих показателей на 20–25% по отношению к ДП [53, 54].

В работе [43] описаны исследования дизеля K461M1 (6ЧН 12/14) при подаче диссоциированного метанола перед турбиной за счет дополнительной системы питания. Метиловый спирт предварительно испаряли за счет теплоты ОГ и разлагали с помощью катализатора. В результате проведенных исследований получено снижение в ОГ содержания С и CH_x .

Известны исследования по влиянию метанола и этанола, в т.ч. с двойной системой топливоподачи, СТЭ в различных вариациях на экологические параметры дизеля 2Ч 10,5/12,0 [386-391 и др.].

Применение метанола в дизеле 2Ч 10,5/12,0 с помощью двойной системы топливоподачи (рисунок 1.37,а) позволяет надежно снизить в ОГ содержание NO_x до 35,4% и сажесодержание до 6,5 раз. Применение же МТЭ на дизеле 2Ч 10,5/12,0 (рисунок 1.37,б) приводит к снижению в ОГ NO_x до 57,0% и сажесодержание до 55,0%.

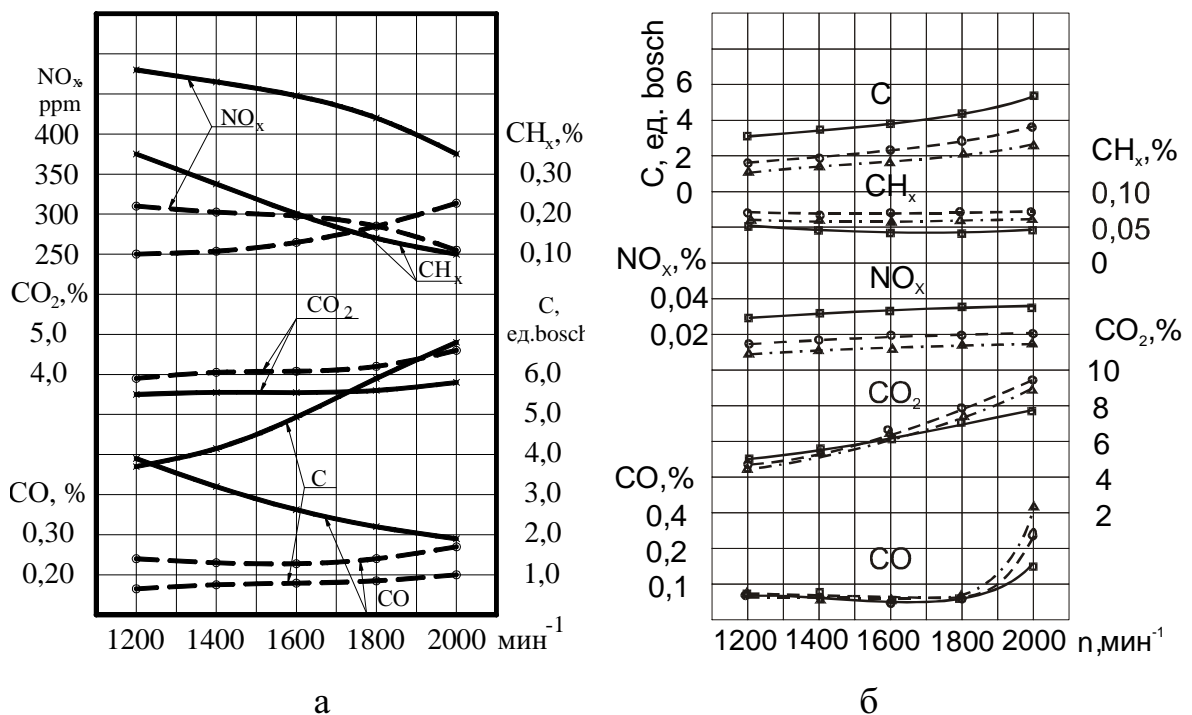


Рисунок 1.37 - Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 [390, 391]: ———— – ДП; а - - - - - работа на метаноле; б - - - - - работа на МТЭ (20% метанола); · · · · · – работа на МТЭ (35% метанола)

Параметры дизеля, снятые по внешней характеристике изображены на рисунке 1.38 [22, 374, 386]. При этом улучшение показателей экологических параметров дизеля при двойном впрыскивании можно также охарактеризовать, как и при подаче метанола на впуске.

При установке данного дизеля на автобус и проведении эксплуатационных испытаний получены следующие результаты: достигнута замена 86% дизельного топлива метиловым спиртом, увеличение эффективного кпд на 9%, сохранение динамических свойств автобуса, снижение содержания в ОГ NO_x и CH_x в 2 раза.

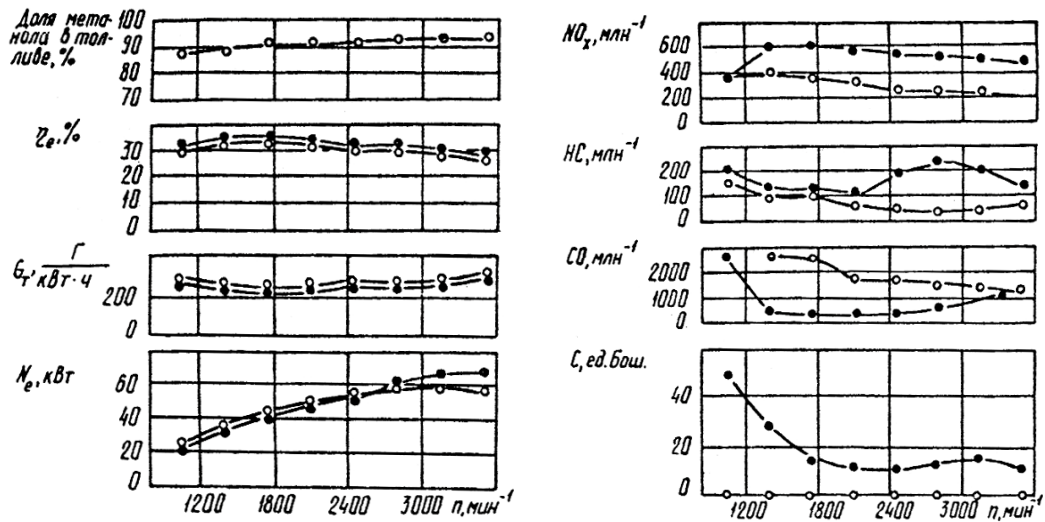


Рисунок 1.38 - Характеристики дизеля с двойным впрыскиванием (внешняя характеристика) [374]: ●—● - серийный дизель; ○—○ - дизель с двойным впрыскиванием

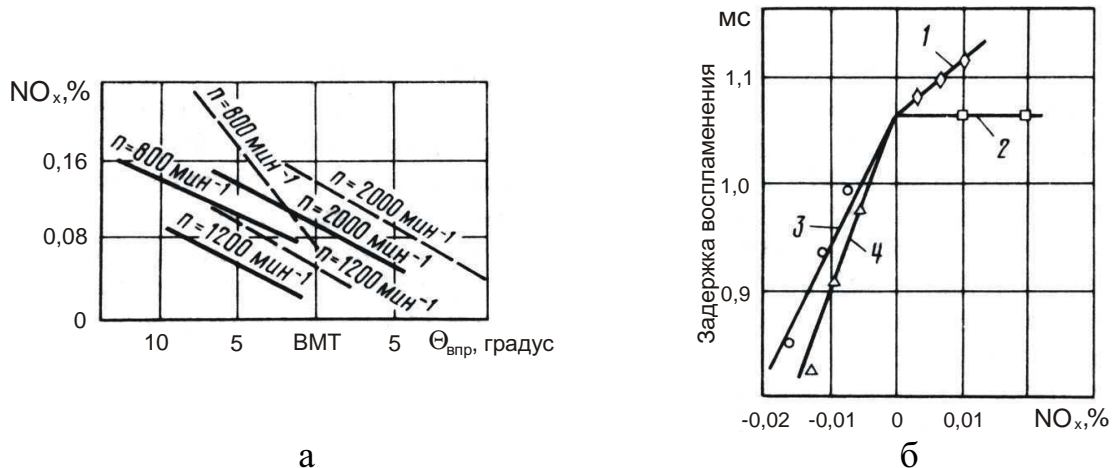


Рисунок 1.39 - Влияние топлива на концентрацию NO_x в ОГ дизеля [386]: а – влияние цетанового числа топлива на содержание в ОГ оксидов азота; ———— – цетановое число 59; - - - - - цетановое число 35; б – взаимосвязь между периодом задержки воспламенения и содержанием NO_x в ОГ дизеля; 1 – изоамиловый спирт; 2 – нитрометан; 3 – изоамиловый спирт; 4 – пероксид бутила

На рисунке 1.39 представлены данные по влиянию двух типов топлив (с цетановым числом 35 и 59) на содержание NO_x в ОГ [22, 53, 54]. Для обеспечения начала горения этих топлив в одной точке цикла момент начала впрыскивания топлива с низким цетановым числом задавался более ранним. Топливо с пониженным цетановым числом имеет большую задержку воспламенения, в связи с чем в момент начала горения в зонах обедненной смеси находится большее количество

топлива. Достигается высокий уровень максимальной температуры цикла, что приводит к большому количеству образования NO_x .

В работе [392] рассмотрен унифицированный рабочий процесс на водных растворах этанола с высоким содержанием воды в спиртоводном растворе на базе четырехтактного дизеля Д-65Н с геометрической степенью сжатия 17,3, результаты которого представлены на рисунке 1.40. Анализ рисунка 1.40 показывает, что при больших содержаниях воды наблюдается значительное снижение выбросов NO_x и CO , при этом содержание CO_2 практически не изменяется и остается в области 10%.

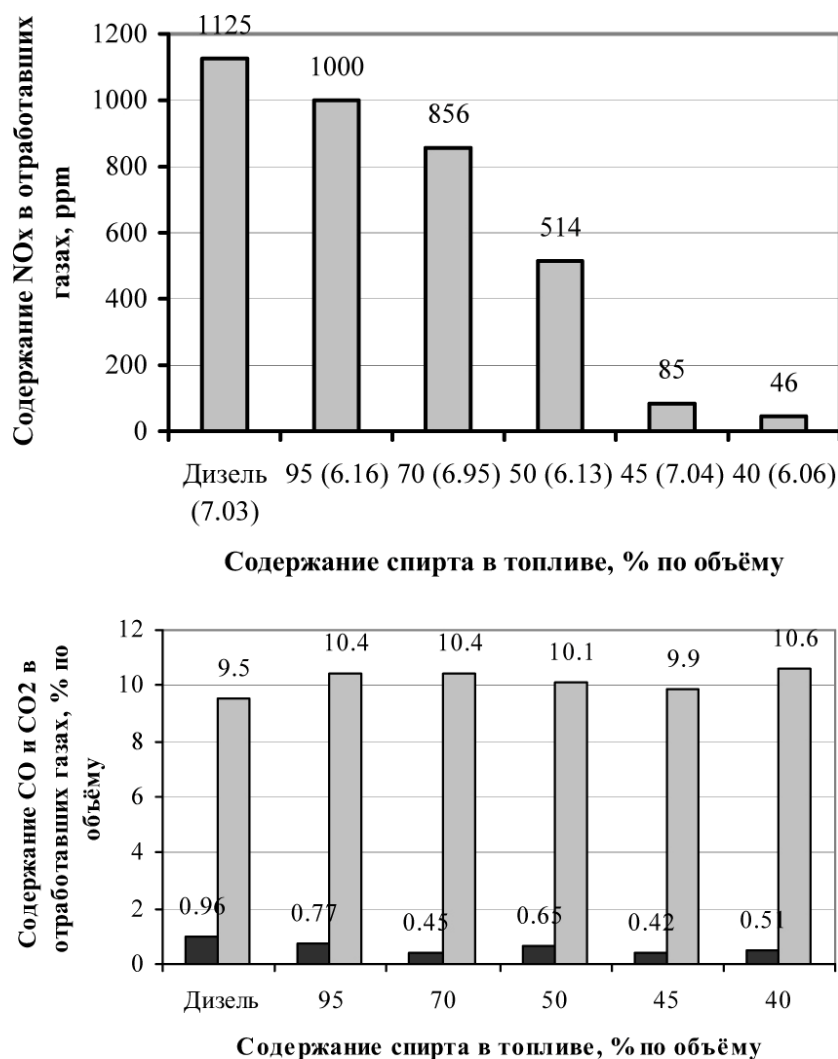


Рисунок 1.40 - Токсичность ОГ дизеля Д – 65Н в зависимости от содержания этанола в топливе (в скобках указано содержание кислорода в ОГ, %) [392]

В работе [393] представлены исследования дизеля Д-120 с зональным смесеобразованием с применением этилового спирта. По результатам исследований

(рисунок 1.41) при замещении части дизельного топлива этанолом (от 8 до 14%) было отмечено уменьшение выбросов NO_x до 11% и сажи в 1,6 раза.

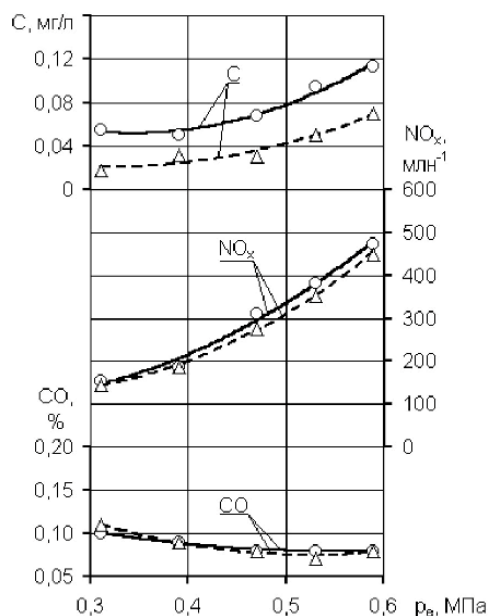


Рисунок 1.41 - Токсичность ОГ дизеля Д–120 при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ [393]:
 ——— – ДП; - - - - работа на смеси этанола с дизельным топливом

Подводя итоги рассмотрения вопросов применения альтернативных топлив в дизелях и снижения в них оксидов азота можно сделать **вывод**, что экономически целесообразным и наиболее эффективным способом снижения выбросов NO_x в ОГ дизеля – это перевод его для работы на альтернативное топливо (природный газ и спирто-топливные эмульсии), что позволяет не только снизить содержание NO_x с одновременным уменьшением всех вредных компонентов ОГ, но и улучшить показатели рабочего процесса дизеля.

1.5 Основные результаты и выводы по первой главе

Выполненный анализ перспектив применения альтернативных топлив в дизелях и исследований в них оксидов азота позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Руководствуясь Транспортной стратегией РФ до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ N 1734-р от 22.11.2008 г., Энергетической стратегией России на период до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 1715-р от 13.11.2009 г., указом Президента РФ № 899 от

07.07.2011 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ», Распоряжением Правительства РФ №767 от 13 мая 2013 г. «О расширении использования ПГ в качестве моторного топлива», итогами совещания Президента РФ В.В. Путина в Ново-Огарево с членами Правительства, состоявшегося 18 апреля 2018, в ходе обсуждения которого Президентом РФ был определен безусловный приоритет газомоторного топлива перед другими видами не сложно предположить, что будущее за экологически чистыми дизельными энергоустановками, работающими на альтернативных видах топлива не нефтяного происхождения.

Переход на новые альтернативные источники энергии является жестокой необходимостью. Ученые могут ошибаться на 50 и даже на 100 лет, однако ископаемые нефтяные топлива в какой-то момент будут исчерпаны. Потеря источников энергии такой же «конец света», как и любые другие глобальные катастрофы и беды. Та страна, ученые и специалисты которой первыми найдут оптимальное решение проблемы перехода на альтернативные источники энергии, получит доминирующее положение в мире. Особенно это важно для России с учетом огромного населения, богатейших природных ресурсов, занимаемого географического положения, климатических зон и огромных расстояний.

2. Руководствуясь Международными обязательствами России в области охраны окружающей среды, взятыми при подписании Международных договоров в области охраны окружающей среды по снижению вредных выбросов, Экологическим законодательством в РФ, нормативами по снижению токсичных компонентов в ОГ транспортных средств и двигателей внутреннего сгорания нельзя рассматривать применение альтернативных топлив только в одной плоскости, поскольку это двудеиная задача, связанная и с экологическими проблемами снижения вредных выбросов с ОГ тепловых двигателей.

3. Общая классификация способов снижения токсичности сложилась и известна достаточно давно - еще в 70-е годы прошлого века. Оксиды азота можно снижать как в процессе горения топлива, так и после завершения основных реакций горения. Имеется масса работ, анализ которых, рассмотренный в первой гла-

ве, показывает, что применение ПГ и СТЭ достаточно эффективно не только в плане снижения токсичности ОГ, но и в замещении нефтяного топлива альтернативным. Таким образом, в результате рассмотрения современного состояния проблемы токсичности, способов снижения содержания оксидов азота и механизмов их образования для перспективного решения улучшения экологических показателей дизелей необходимо применение в качестве моторного топлива ПГ и СТЭ.

4. Анализируя представленные в первой главе физико-кинетические процессы формирования и образования NO_x необходимо констатировать, что все рассмотренные схемы являются модельными, т.е. отражают реальный кинетический процесс только приблизительно, поскольку нет достаточно полной оценки о составе компонентов и радикалов, принимающих участие в образовании оксидов азота в ЦД, работающего на альтернативном виде топлива. Эти модельные схемы и используют для расчета образования NO_x в поршневых двигателях. Более подробное описание химической кинетики образования NO_x при горении традиционных топлив с воздухом на современном уровне наших знаний не возможно. Поскольку трудность заключается в том, что дизельное топливо является соединениями углеродов и водородов, в молекулах которого содержится несколько атомов углерода. А для углеводородов с несколькими атомами углерода в молекуле как указывает Франк-Каменецкий, число возможных промежуточных реакций и промежуточных продуктов сгорания столь велико, что полное кинетическое описание процесса становится невозможным, и, следовательно, необходимо используя различные модели схем выделить особенности химизма процесса образования оксидов азота в дизеле, работающем на ПГ и СТЭ.

5. Следовательно, руководствуясь пунктами 1-4 данных выводов, необходимо проведение научных исследований с целью разработки механизма процесса образования NO_x в ЦД при работе на жидких альтернативных топливах (СТЭ) и газообразных (ПГ), что позволит в свою очередь разработать математическую модель расчета содержания оксидов азота и провести с ее помощью теоретические расчеты NO_x при работе дизеля на ПГ и СТЭ.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЕ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

2.1 Особенности химизма образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ

В связи со сложным химическим процессом предпламенных реакций в ЦД, связанных с зарождением и постоянным изменением высоких локальных концентраций активных центров тепловых реакций, для точных расчетов содержания и скорости образования NO_x в цилиндре требуется рассмотрение сложной системы химических уравнений, учитывающей не только зависимость теплоемкости от температуры, но и возникающие диссоциативные изменения. Поскольку эти изменения происходят с достаточно большой скоростью, расчет содержания NO_x усложняется сдвигом равновесий диссоциации при изменении температур и давлений по объему КС. Исследуя механизмы реакций, которые приводят не к установлению стационарного состояния, а к периодическому изменению скорости реакции во времени, возможно провести достаточно точный расчет скорости образования NO_x в ЦД при работе как на штатном дизельном топливе, так и на различных комбинациях альтернативных топлив с дальнейшей возможностью воздействия на скорости развития и образования оксидов азота путем частичной или полной заменой элементарного состава базового топлива альтернативным, соответственно, с последующим расчетом скорости образования NO_x в цилиндре на этом топливе [54, 394].

Рассматривая суммарное образование и расходование компонентов во время процесса горения метана и дизельного топлива в ЦД и выделяя доминирующие механизмы, дающие наиболее весомый вклад в общий процесс образования NO_x , механизм их образования можно представить в виде определенной последовательности локального анализа путей реакций (рисунок 2.1) [395].

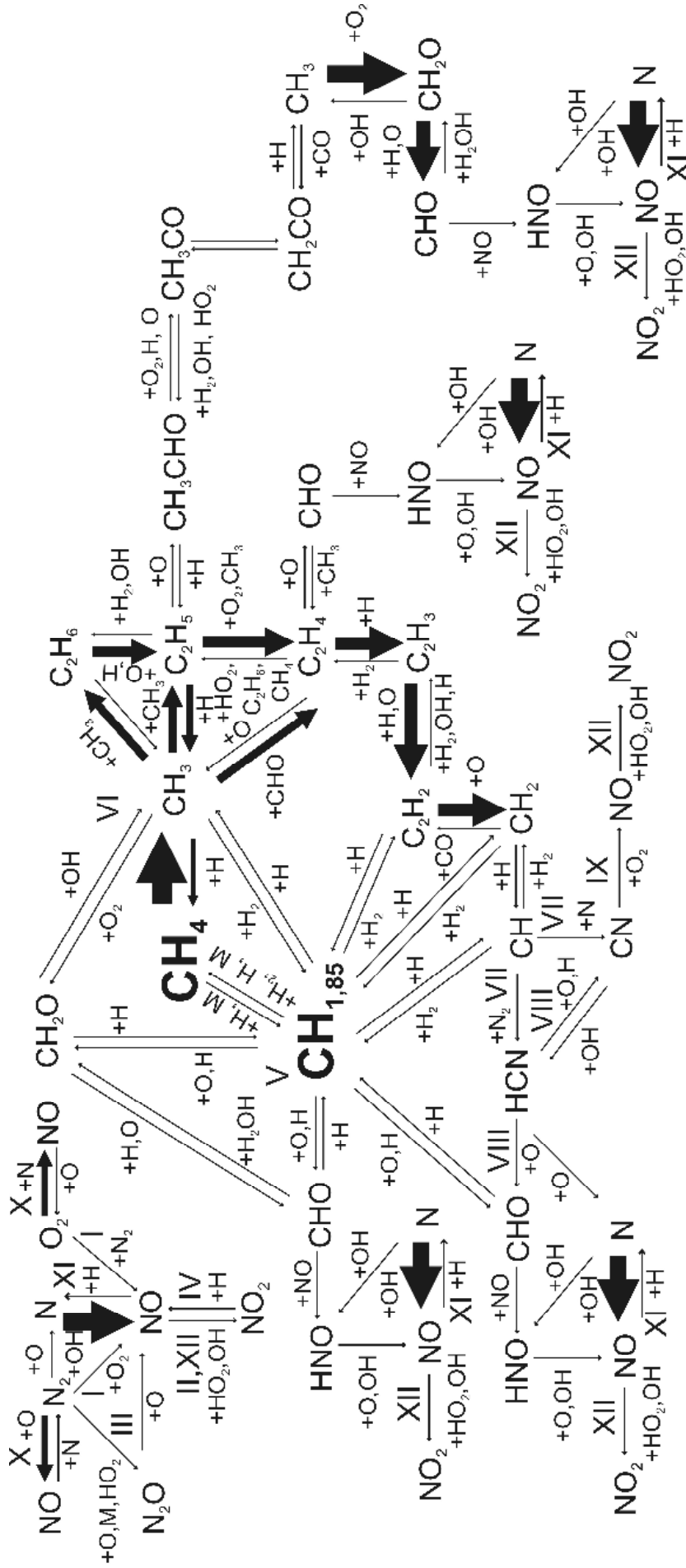


Рисунок 2.1 - Схема процесса образования NO_x в цилиндре ГД: I – образование NO по бимолекулярной реакции;

II – окисление NO до NO₂ в предпламенной зоне; III – образование и разложение геммоксида азота N₂O;

IV – образование NO за счет расхода NO₂; V – горение дизельного топлива; VI – горение метана; VII – взаимодействие молекулярного азота с углеводородными фрагментами; VIII – превращение HCN в CN;

IX – образование быстрого NO; X – образование термического NO по механизму Я.Б. Зельдовича;

XI – образование термического NO через радикалы OH; XII – окисление NO до NO₂ в зашламенной зоне

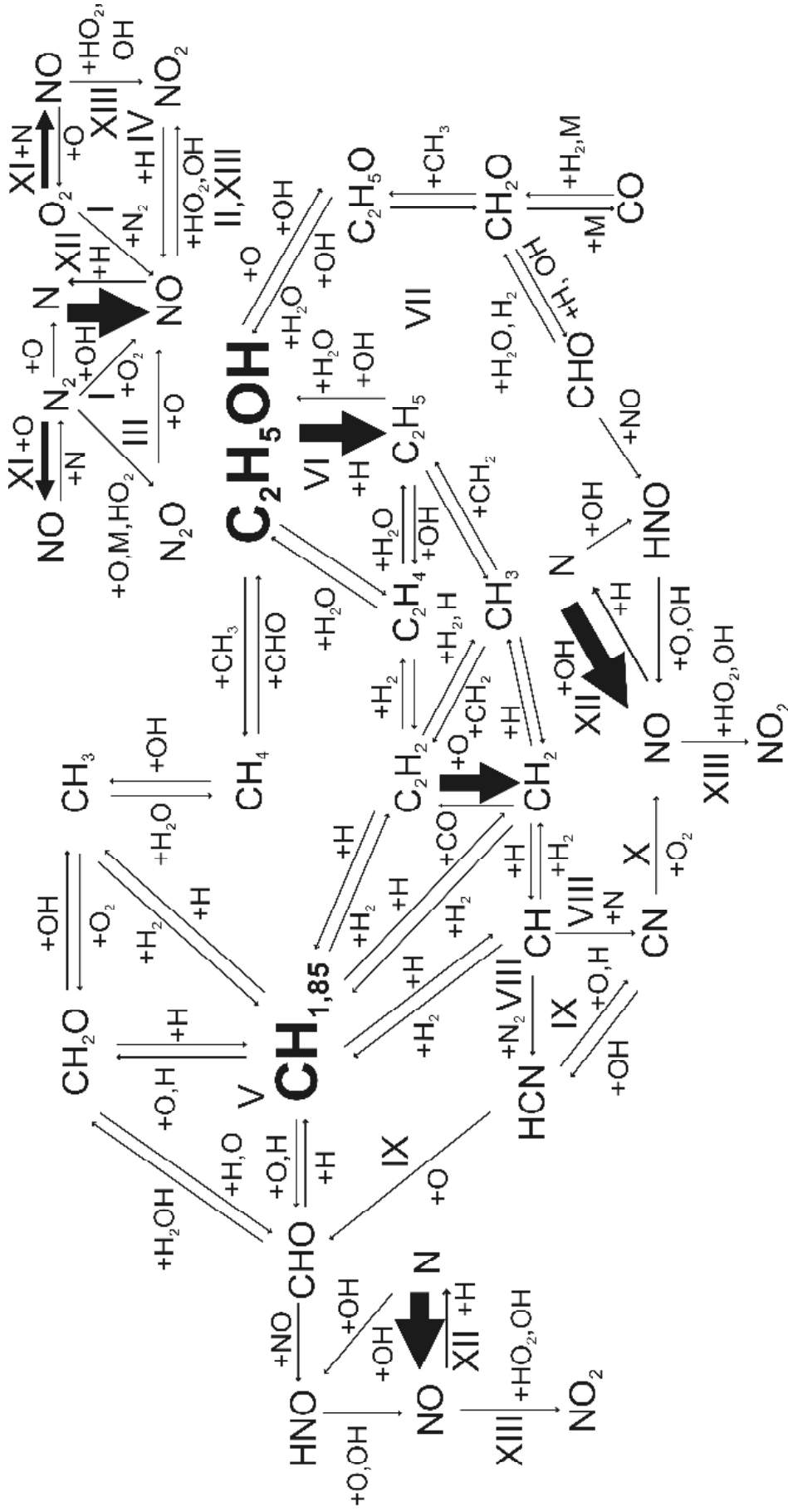


Рисунок 2.2 - Схема процесса образования NO_x в ЦД при работе на ЭТЭ: I – образование NO по бимолекулярной реакции; II – окисление NO до NO₂ в предпламенной зоне; III – образование и разложение гемикооксида азота N₂O; IV – образование NO за счет расхода NO₂; V – горение дизельного топлива; VI – термическое разложение этанола; VII – процесс окисления этанола; VIII – взаимодействие молекулярного азота с углеводородными фрагментами; IX – превращение HCN в CN; X – образование быстрого NO; XI – образование термического NO по механизму Я.Б. Зельдовича; XII – образование термического NO через радикалы OH; XIII – окисление NO до NO₂ в запыленной зоне

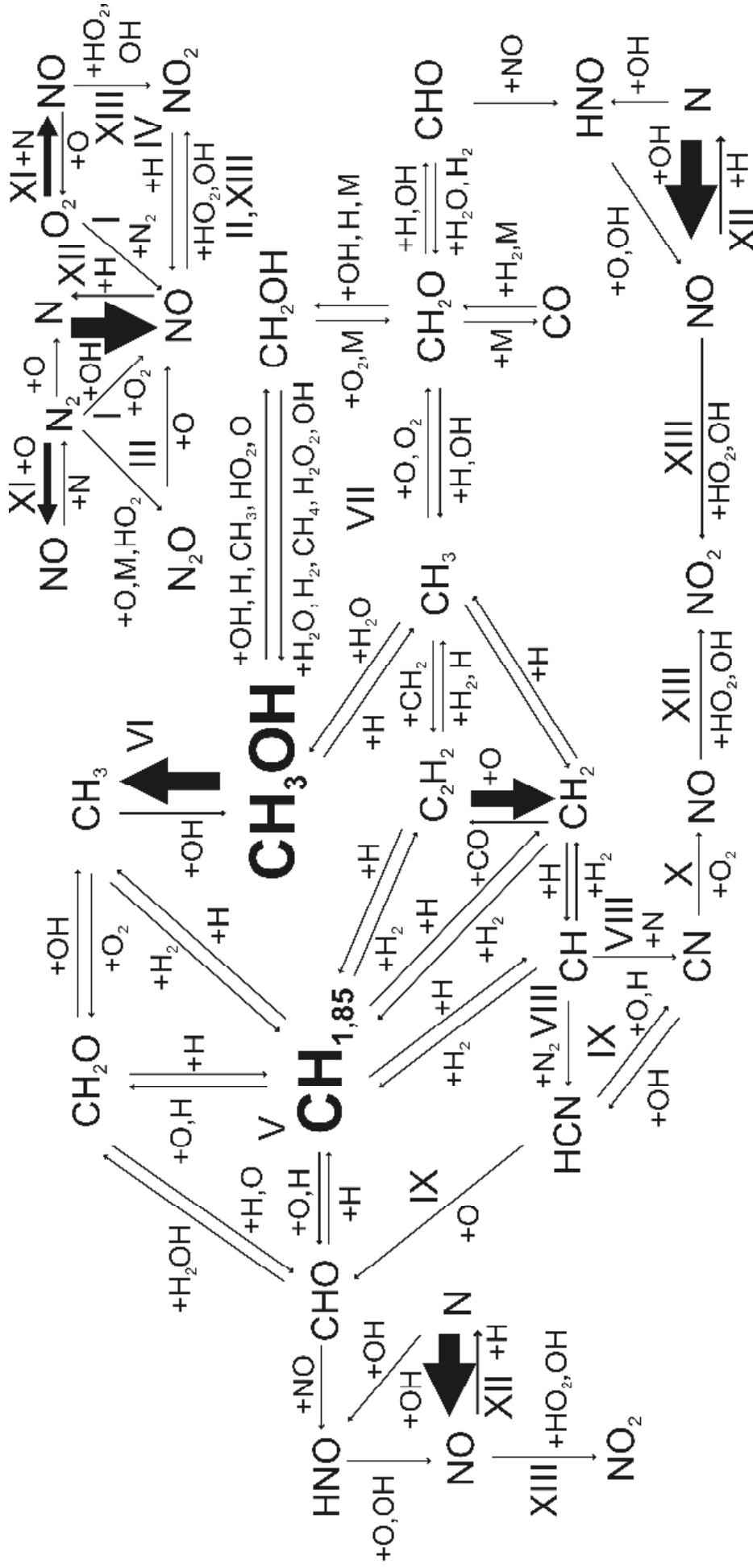


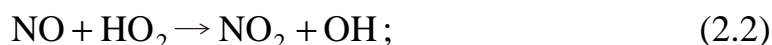
Рисунок 2.3 - Схема процесса образования NO_x в ЦД при работе на МТЭ: I – образование NO по бимолекулярной реакции; II – окисление NO до NO₂ в предпламенной зоне; III – образование и разложение геммоксида азота N₂O; IV – образование NO за счет расхода NO₂; V – горение дизельного топлива; VI – термическое разложение метанола; VII – процесс окисления метанола; VIII – взаимодействие молекулярного азота с углеводородными фрагментами; IX – превращение HCN в CN; X – образование быстрого NO; XI – образование термического NO по механизму Я.Б. Зельдовича; XII – образование термического NO через радикалы OH;

XIII – окисление NO до NO₂ в запламенной зоне

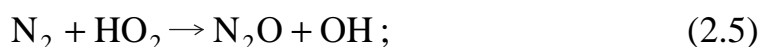
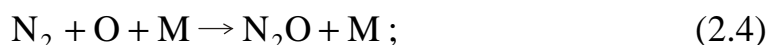
В начальной стадии горения, где образуется большое количество различных активных частиц в температурном уровне более 1000 К, при смешивании паров топлива с окислителем в ЦД происходит образование NO в результате столкновения азота с кислородом (ветвь I на рисунке 2.1) [149]



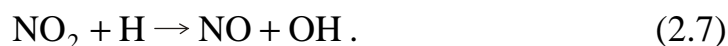
Можно предположить, что эта реакция протекает на начальном участке факела до попадания частиц в зону максимальных температур, причем сразу, образующиеся в зоне гибели атомарного водорода радикалы HO_2 и радикалы OH доокисляют образовавшийся оксид азота NO до NO_2 (ветвь II на рисунке 2.1):



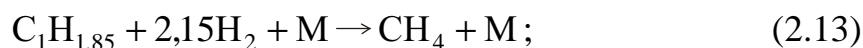
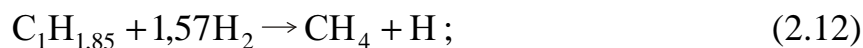
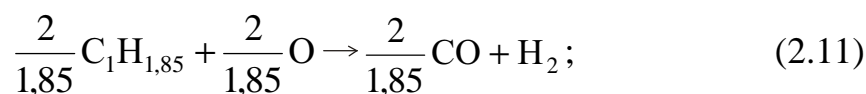
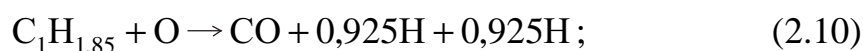
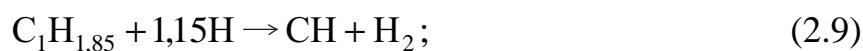
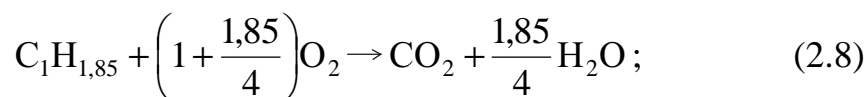
Далее при недостатке окислителя и температуре менее 1500К происходит образование «быстрых» NO по следующей схеме (ветвь III на рисунке 2.1):

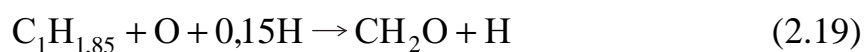
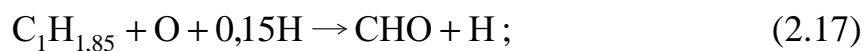
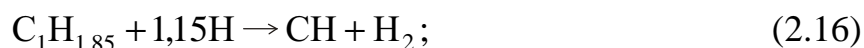
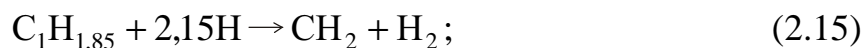
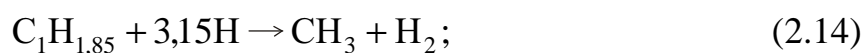


Диоксид азота NO_2 , образовавшийся при «невысокой» температуре, практически весь переходит в NO по реакции (ветвь IV на рисунке 2.1):

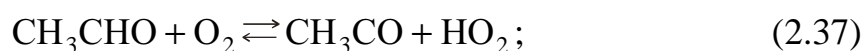
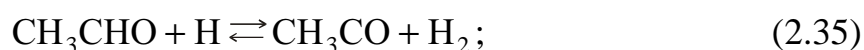
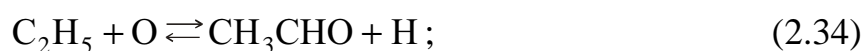
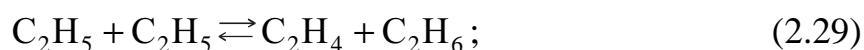
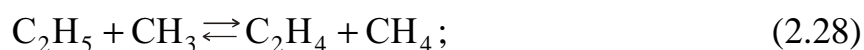
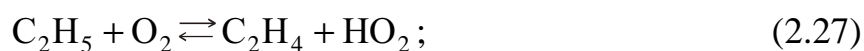
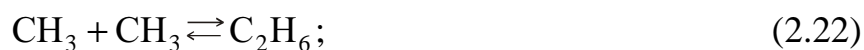


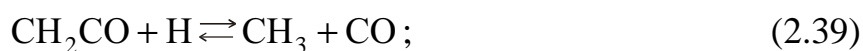
При горении дизельного топлива $\text{C}_1\text{H}_{1,85}$ (ветвь V на рисунке 2.1) [396]:





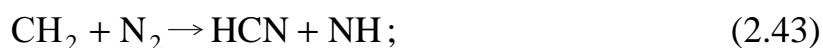
и метана CH_4 (ветвь VI на рисунке 2.1) [222, 397]:





образуется значительное количество углеводородных радикалов, которые являются дополнительными элементами образования NO.

Так, опыты Ц. Фенимора [140], проведенные на смесях углеводородных газов (метан, пропан, этилен), показали, что в зоне горения действует дополнительный механизм реакций углеводородных радикалов с азотом (ветвь VII на рисунке 2.1):



При этом радикалы типа HCN· и CN·, участвующие в последующем механизме образования «быстрого» NO, позиционируются в качестве промежуточных компонентов. Так, предполагается, что около 50% радикала HCN, образовавшегося по реакциям 2.43, 2.44 и 2.46, переходит в CN (ветвь VIII на рисунке 2.1)



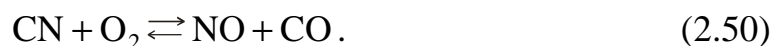
около 10% HCN переходит в CN по реакции



а около 40% превращается в азот

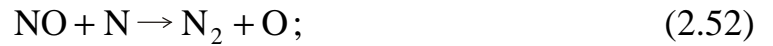


Соединения типа CN, NH окисляются, являясь дополнительным источником образования NO (ветвь IX на рисунке 2.1):



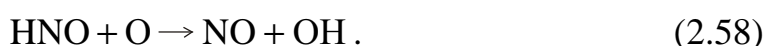
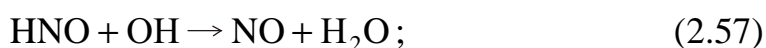
Далее образование NO происходит по цепной схеме окисления азота Я.Б. Зельдовича [126], в которой ведущую роль играет температура процесса,

оказывающая решающее влияние на концентрацию атомарного кислорода (ветвь X на рисунке 2.1):



Механизм Я.Б. Зельдовича в условиях непрерывно изменяющейся температуры в ЦД имеет две характерные области. В первой области содержание NO в продуктах сгорания определяется кинетикой ее образования, во второй – кинетикой ее разложения. Кроме того, опираясь на исследования И.Я. Сигала [128], необходимо отметить, что образование оксида азота имеет место непосредственно в зоне горения, а максимальная скорость этого процесса достигает значений в плоскости максимальных температур. Также при изучении турбулентного пламени метана И.Я. Сигал [128] утверждает, что образование NO наблюдается не за пределами зоны горения углеводородного пламени, а непосредственно в ней. При этом максимальные концентрации NO достигаются в плоскости зоны горения, в которой концентрация исходных углеводородов стремится к нулю, а концентрации промежуточных продуктов реакции достигают максимальных значений. Следовательно, при горении МВС в цилиндре газодизеля зона скорости образования NO примерно будет совпадать с зоной максимальной скорости выгорания горючих, т.е. с областью, в которой, по-видимому, следует ожидать наличие наибольшего количества атомарного кислорода, а также других активных частиц – атомов и радикалов. Кроме того, вследствие большой теплоты активации реакции O с N₂ и легкости реакций O с топливом, следует предположить, что период фактического наличия сверхтермодинамического содержания атомов O₂ при горении будет меньше необходимого для образования большого количества NO, поэтому в целом реакция окисления N₂ (2.51) пойдет уже после реакций горения топлива.

При глубоком пиролизе топлива в КС газодизеля образование NO может идти и по механизму через соединения OH, получающихся в результате низкотемпературного разложения CH₄ в локальных объемах МВС (ветвь XI на рисунке 2.1) [157]:



При избытке окислителя и максимальной температуре цикла реакции окисления CH₄ являются преобладающими и определяют температурный режим в ЦД. Необходимо отметить, что здесь доминирующим процессом является образование «термического» NO по реакциям 2.51-2.58 (ветви X, XI на рисунке 2.1).

В процессе расширения при снижении температуры осуществляется расход NO по реакциям 2.52, 2.54 и 2.56 (ветви X, XI на рисунке 2.1), а при уменьшении температуры ниже 1000 К NO активно доокисляется до NO₂ за счёт реакций 2.2 и 2.3 (ветвь XII на рисунке 2.1).

В таблице 2.1 показан полный перечень реакций представленного механизма.

Таблица 2.1 - Элементарные реакции образования NO в цилиндре ГД

№ реакции	Реакция
1	2
1	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$
2	$\text{NO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$
3	$\text{NO} + \text{OH} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}$
4	$\text{N}_2 + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{M}$
5	$\text{N}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{OH}$
6	$\text{N}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow 2\text{NO}$
7	$\text{NO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$

Продолжение таблицы 2.1

1	2
8	$C_1H_{1,85} + \left(1 + \frac{1,85}{4}\right)O_2 \rightarrow CO_2 + \frac{1,85}{4}H_2O$
9	$C_1H_{1,85} + 1,15H \rightarrow CH + H_2$
10	$C_1H_{1,85} + O \rightarrow CO + 0,925H + 0,925H$
11	$\frac{2}{1,85}C_1H_{1,85} + \frac{2}{1,85}O \rightarrow \frac{2}{1,85}CO + H_2$
12	$C_1H_{1,85} + 1,57H_2 \rightarrow CH_4 + H$
13	$C_1H_{1,85} + 2,15H_2 + M \rightarrow CH_4 + M$
14	$C_1H_{1,85} + 3,15H \rightarrow CH_3 + H_2$
15	$C_1H_{1,85} + 2,15H \rightarrow CH_2 + H_2$
16	$C_1H_{1,85} + 1,15H \rightarrow CH + H_2$
17	$C_1H_{1,85} + O + 0,15H \rightarrow CHO + H$
18	$2C_1H_{1,85} + H_2 \rightarrow C_2H_2 + 3,7H$
19	$C_1H_{1,85} + O + 0,15H \rightarrow CH_2O + H$
20	$CH_4 \rightleftharpoons CH_3 + H$
21	$CH_3 + O_2 \rightleftharpoons CH_2O + OH$
22	$CH_3 + CH_3 \rightleftharpoons C_2H_6$
23	$CH_2O \cdot + H \rightleftharpoons CHO + H_2$
24	$CH_2O + O \rightleftharpoons CHO + OH$
25	$C_2H_6 + H \rightleftharpoons C_2H_5 + H_2$
26	$C_2H_6 + O \rightleftharpoons C_2H_5 + OH$
27	$C_2H_5 + O_2 \rightleftharpoons C_2H_4 + HO_2$
28	$C_2H_5 + CH_3 \rightleftharpoons C_2H_4 + CH_4$
29	$C_2H_5 + C_2H_5 \rightleftharpoons C_2H_4 + C_2H_6$
30	$C_2H_4 + H \rightleftharpoons C_2H_3 + H_2$
31	$C_2H_3 \rightleftharpoons C_2H_2 + H$
32	$C_2H_3 + H \rightleftharpoons C_2H_2 + H_2$
33	$C_2H_3 + O \rightleftharpoons C_2H_2 + OH$
34	$C_2H_5 + O \rightleftharpoons CH_3CHO + H$
35	$CH_3CHO + H \rightleftharpoons CH_3CO + H_2$
36	$CH_3CHO + O \rightleftharpoons CH_3CO + OH$
37	$CH_3CHO + O_2 \rightleftharpoons CH_3CO + HO_2$

Продолжение таблицы 2.1

1	2
38	$\text{CH}_3\text{CO} \rightleftharpoons \text{CH}_2\text{CO} + \text{H}$
39	$\text{CH}_2\text{CO} + \text{H} \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{CO}$
40	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{O} \rightleftharpoons \text{CHO} + \text{CH}_3$
41	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{CO}$
42	$\text{CH}_2 + \text{H} \rightleftharpoons \text{CH} + \text{H}_2$
43	$\text{CH}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{NH}$
44	$\text{CH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{N}$
45	$\text{CH} + \text{N} \rightarrow \text{CN} + \text{H}$
46	$\text{CN} + \text{OH} \rightarrow \text{HCN} + \text{O}$
47	$\text{HCN} + \text{O} \rightleftharpoons \text{CN} + \text{OH}$
48	$\text{HCN} + \text{H} \rightleftharpoons \text{CN} + \text{H}_2$
49	$\text{HCN} + \text{O} \rightleftharpoons \text{CHO} + \text{N}$
50	$\text{CN} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{CO}$
51	$\text{N}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{N}$
52	$\text{NO} + \text{N} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$
53	$\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$
54	$\text{NO} + \text{O} \rightarrow \text{N} + \text{O}_2$
55	$\text{N} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H}$
56	$\text{NO} + \text{H} \rightarrow \text{N} + \text{OH}$
57	$\text{HNO} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$
58	$\text{HNO} + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$

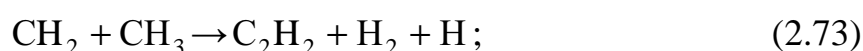
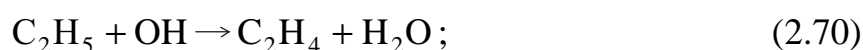
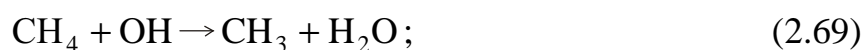
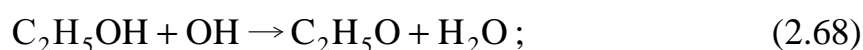
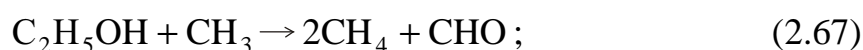
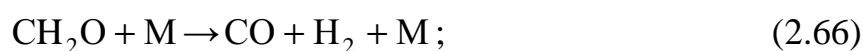
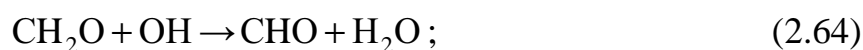
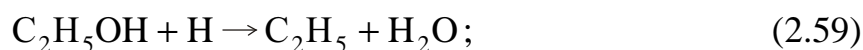
Применение СТЭ существенно влияет на характеристики процесса сгорания и тепловыделения, окисление и образование токсичных компонентов в ЦД. Особенности сгорания эмульгированных спиртов (эилового, метилового) и их термическое разложение приводят к интенсификации процесса горения, вследствие чего происходит образование достаточного количества различных радикалов, не свойственных для обычного процесса горения дизельного топлива в КС дизеля. По сравнению с углеводородами метиловый и этиловый спирты при сгорании имеют большую активность, вследствие чего предел воспламенения спирто-топливной эмульсии сдвигается в более бедную зону, а сгорание протекает достаточно устойчиво. По всей видимости, диссоциация метанола, либо этанола в диапазоне высоких температур и приводит к образованию значительного количества

активных радикалов, что облегчает начало цепных реакций и ускоряет протекание механизма окисления спирто-топливной эмульсии [398].

Основные особенности химических процессов образования NO в ЦД при горении спирто-топливных эмульсий представлены на рисунках 2.2 и 2.3.

Рассматривая горение ЭТЭ, необходимо отметить, что молекула этанола в диапазоне температур 1000-2500 К подвергается термическому распаду (цепь VI на рисунке 2.2): $C_2H_5OH \rightarrow C_2H_5 + OH$.

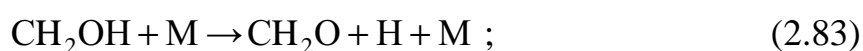
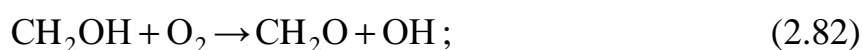
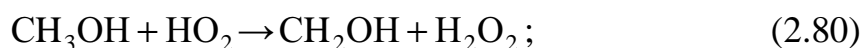
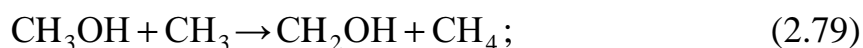
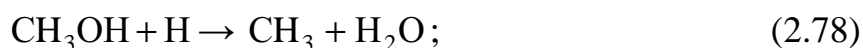
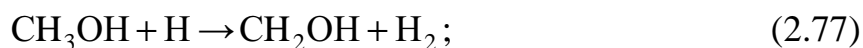
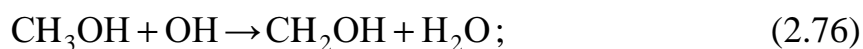
Применительно к сгоранию ЭТЭ в ЦД целесообразно выделить основные реакции, доминирующие в общем процессе окисления метанола (цепь VII на рисунке 2.2)



Механизм же горения метанола включает в себя 94 реакции [399]. Начальным является термическое разложение метанола (цепь VI на рисунке 2.3):



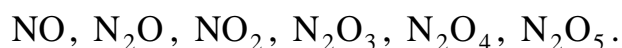
Применительно к сгоранию МТЭ в ЦД выделим основные реакции, доминирующие в общем процессе окисления метанола (цепь VII на рисунке 2.3):



В представленной схеме окисления метанола расход соединений CH_2O осуществляется по реакциям (2.64-2.66), CH_3 , CH_2 и C_2H_2 - по реакциям (2.72-2.74) схемы горения этилового спирта.

Далее процесс образования NO при работе дизеля на спирто-топливных эмульсиях протекает по реакциям (2.43-2.50). Термический пиролиз молекул этанола и метанола приводит к достаточному возрастанию роли «быстрого» механизма образования оксида азота и его вклад становится уже соизмеримым с образованием NO по тепловому механизму.

Всего же в продуктах сгорания содержатся различные NO_x , по термодинамической устойчивости которые распределяются следующим образом (по убыванию):



Таким образом, содержание NO_x в ЦД определяется не только максимальной температурой цикла, но и температурой, при которой расход NO перестает следовать за падением равновесного количества в процессе расширения, и NO

«замерзает». Температура «замерзания» реакций, безусловно, зависит от скорости реакций, а зная эту температуру «замерзания», можно определить абсолютные значения скоростей реакций образования оксидов азота. А разработка математической модели расчета содержания NO_x позволит достаточно точно прогнозировать содержание NO в ОГ дизеля, в т.ч. при применении различных видов альтернативных топлив.

2.2 Модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ

Данная модель позволяет произвести расчет значений предэкспоненциального множителя химических реакций и, следовательно, абсолютную скорость образования NO_x в ЦД.

Изобразим схематично потенциальную энергию системы элементов N , OH , NO и H реакции (2.55) $\text{N} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H}$ в зависимости от характеристики взаимной пространственной конфигурации атомов («координаты разложения», рисунок 2.4).

Согласно теории химической кинетики при протекании реакции на вершине потенциального барьера, отвечающей за сближение реагирующих веществ, и в ее окрестностях происходит образование активированного комплекса. Предположим, что все комплексы, которые образуются, расходятся в направлении продуктов реакции, тогда у реакции число актов будет равняться числу расхода комплексов, поделенному на время их существования. Так, условно обозначая значения компонентов реакции $\text{N} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H}$ символами $A(\text{N})$, $B(\text{OH})$, комплексов $M(\text{NO} \cdot \text{H})$, получим, что число актов прямой реакции в 1см^3 в 1с будет равняться $k_i r_A r_B = P r_M / \tau$, тогда у прямой реакции константа скорости примет вид [400]

$$k_i = P \frac{1}{\tau} (r_M / r_A r_B), \quad (2.86)$$

где P – величина изменения скорости фактической реакции от идеальной (стерический фактор).

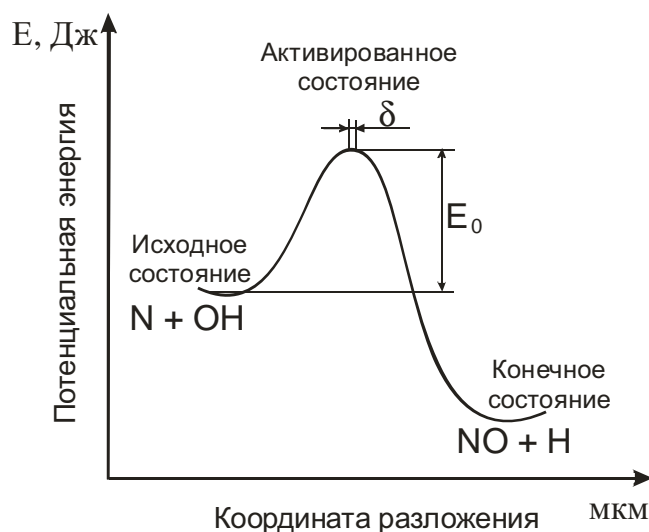


Рисунок 2.4 - Потенциальная энергия системы химических элементов реакции $N + OH \rightarrow NO + H$

В таблице 2.2. указаны зависимости стерического фактора от вида реагирующих веществ.

Таблица 2.2. - Зависимость стерического фактора от вида реагирующих веществ

Вид реагирующих веществ	P
Атом + атом	1
Двухатомная молекула + атом	Z_V / Z_R
Многоатомная молекула + атом	$(Z_V / Z_R)^2$
Двухатомная молекула + двухатомная молекула	$(Z_V / Z_R)^3$
Двухатомная молекула + многоатомная молекула	$(Z_V / Z_R)^4$
Многоатомная молекула + многоатомная молекула	$(Z_V / Z_R)^5$

Разложим статистическую сумму на произведение:

$$Z = Z_T Z_R Z_V. \quad (2.87)$$

На отрезке δ , сопоставимом с «объемом», который занимают комплексы вдоль взаимной пространственной конфигурации атомов, статистическая сумма

частицы с массой m , которая совершает одномерное поступательное движение, будет равняться:

$$Z_T = (2\pi mkT/h^2)^{1/2} \delta, \quad (2.88)$$

где h - постоянная Планка, $h = 6,65 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; k - постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; m - масса частицы, кг.

Выражение для вращательной суммы частицы

$$Z_R = \frac{8\pi^2 I kT}{h^2} \frac{1}{\sigma}, \quad (2.89)$$

где I – момент инерции частицы, кг·м²; σ – фактор симметрии.

Фактор симметрии σ соответствует количеству перестановок одинаковых атомов в молекуле, увеличенных на единицу и соответствующих ее вращению как целого ($\sigma = 1$ - для двухатомной молекулы, которая состоит из разных атомов; $\sigma = 2$ - из одинаковых).

Учитывая статистическую сумму гармонического осциллятора для частоты ν квантовое выражение определится

$$Z_\nu = \left(1 - e^{-\frac{E}{RT}} \right)^{-1}. \quad (2.90)$$

Выражение момента инерции комплекса запишется следующим образом

$$I = d_{AB}^2 \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}, \quad (2.91)$$

где d_{AB} – усредненный диаметр реагентов А и В, $d_{AB} = (d_A + d_B)/2$, м.

Активированные комплексы располагаются на вершине энергетического барьера, находящегося между точками начального и конечного состояний (рисунок 2.4). Продолжительность реакции зависит от скорости прохождения активированным комплексом вершины барьера. Обусловимся, что вид активированного состояния, соответствует свойствам стандартной молекулы. Т.е. активированные комплексы устойчивы к передвижению во все стороны, кроме одной, при движении в которую происходит их деление. Наличие у энергетического барьера срав-

нительно плоской вершины позволяет рассматривать степень свободы, соответствующую координате разложения, в виде одномерного поступательного движения. Следовательно, активированные комплексы сохраняют степень свободы $3n$, где n – содержащееся в активированном комплексе число атомов. С целью рассмотрения одного активированного комплекса используем соотношение неопределенностей из квантовой механики, принимая, что на пике параболы комплексу соответствует объем с конечными размерами. В классических теориях подобные допущения существуют, а поскольку барьер имеет плоскую форму, то принятые допущения не меняют в целом картины основных химических реакций горения. Следовательно возможно применение статистического среднего из множества комплексов, что позволит получить тот же результат. Рассматривая статически скорости реакций, предположим нахождение исходных веществ и активированных комплексов в равновесном состоянии, при этом протекание химических реакций будет сопровождаться сохранением равновесных концентраций комплексов и их разложением с определенной скоростью. Предположим, что на пике параболы активированному комплексу соответствует определенный отрезок длиной δ (рисунок 2.4), действительный размер которого несущественен.

Примем, что в направлении x действует среднеквадратичная скорость частицы \bar{v} , тогда столкновения рассматриваемых молекул со стенкой при среднем изменении количества движения будут равняться $2m\bar{v}$. Молекула, расположенная на расстоянии x от стенки, должна ее достигнуть в единицу времени. Если обозначим количество молекул N , содержащееся в объеме V , тогда в единицу времени в каждый см^2 стенки будет ударяться $\frac{N\bar{v}}{V}$ молекул. Следовательно, можно определить значение скорости изменения количества движения, отнесенной к квадратному сантиметру поверхности молекул на стенке

$$\vartheta = \frac{2mN\bar{v}^2}{V}. \quad (2.92)$$

Поскольку кинетическая (поступательная) энергия по оси x для одной степени свободы составляет $\frac{1}{2} m \bar{v}^2$, то объективная возможность наличия у молекулы скорости, соответствующей диапазону от \dot{v} до $\dot{v} + d\dot{v}$ в данном направлении, равняется:

$$\vartheta(\dot{v})_i = e^{-\frac{m\dot{v}^2}{2kT}} d\dot{v}. \quad (2.93)$$

Для определения средней скорости движения комплексов в направлении прямой реакции предположим, что в активированном состоянии имеется разделение скоростей реакций, тогда скорость можно выразить уравнением:

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} e^{-\frac{m\dot{v}^2}{2kT}} \dot{v} d\dot{v}}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{m\dot{v}^2}{2kT}} d\dot{v}}. \quad (2.94)$$

Интегрирование проводим в пределах от ∞ до $-\infty$, что позволяет учесть действительную скорость комплексов в прямом и обратном направлениях, причем интегрирование в числителе выполняется в пределах от 0 до ∞ , что позволяет вычислить среднюю скорость движения в направлении расхода. Таким образом, можно получить значение средней скорости прохода активированным комплексом в прямом направлении по координате разложения пика параболы:

$$\bar{v} = \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2}, \quad (2.95)$$

где m – масса комплекса по данному направлению, кг.

Среднее время τ прохода барьера, которое представляет собой продолжительность существования активированного комплекса, определяется из уравнения (2.95) следующим образом:

$$\tau = \frac{\delta}{\bar{v}} = \delta \left(\frac{2\pi m}{kT} \right)^{1/2}, \quad (2.96)$$

где δ – длина вершины барьера, м; \bar{v} – средняя скорость, м/с.

Активированные комплексы, точнее их часть, которая проходит через отрезок δ координаты разложения в единицу времени, равняется $\frac{1}{\tau}$. Обозначая, что в интервале δ координаты разложения находится r_M количество активированных комплексов в единице объема, тогда отношение $\frac{r_M}{\tau}$ будет равняться количеству комплексов, следующих через отрезок δ в единице объема за единицу времени. Трансмиссионный коэффициент $\varphi = 1$ при условии, что все активированные комплексы, следующие через величину δ , расходятся и отношение $\frac{r_M}{\tau}$ соответствует скорости реакции v

$$v = \frac{r_M}{\tau} = r_M \left(\frac{\kappa \Gamma}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta}. \quad (2.97)$$

Таким образом, с помощью трансмиссионного коэффициента φ можно показать долю веществ, перешедших к конечному состоянию из начального и не вернувшихся назад в начальное (рисунок 2.4).

Реагируя между собой элементы А, В образуют активированный комплекс, удельная скорость реакции k которого выражается единицами концентрации, а количество молекул, распавшихся в единице объема за единицу времени, т.е. действительная скорость будет равняться $k r_A r_B$, где r_A , r_B – концентрации, определяемые числами молекул в единице объема. Поэтому, выражение (2.86) с учетом уравнения (2.96) можно записать в следующем виде

$$k_i = P \frac{r_M}{r_A r_B} \left(\frac{\kappa \Gamma}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta}. \quad (2.98)$$

Поскольку мы предположили, что активированные комплексы и исходные вещества находятся в равновесном состоянии, тогда константа равновесия для этой модели запишется

$$K_\alpha = \frac{\alpha_M}{\alpha_A \alpha_B}, \quad (2.99)$$

где α – активность вещества.

Считая это процесс идеальным, заменим активность вещества концентрацией:

$$K_r = \frac{r_M}{r_A r_B}. \quad (2.100)$$

Учитывая закон действующих масс, количественное соотношение элементов, которые принимают участие в химической реакции $A + B \rightarrow M$ в равновесном состоянии, равняется отношению статистических сумм частиц. Выделив из статистических сумм составляющие типа $\exp(-E_0/kT)$, которые соответствуют практически нулевой энергии частиц, заменив на газовую постоянную R постоянную Больцмана k (т.к. E_0 относится к одному молю), константа равновесия переписывается следующим образом

$$K_r = \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{\frac{E_0}{RT}}, \quad (2.101)$$

где E_0 – энергия активации при $0^\circ K$, получаемая исходными веществами для перехода в активированное состояние с последующей реакцией, т.е. разность энергий исходных веществ и нулевого уровня на моль активированного комплекса.

Вынеся выражение $e^{\frac{E_0}{RT}}$ за знак суммы состояний, при определении величины Z в формуле (2.101) для начала отсчета энергии можно принимать значения нулевых энергетических уровней соответствующих компонентов. Принятое условие не будет усложнять вычисления и согласуется со способами определения сумм состояний.

Учитывая выражения (2.100) и (2.101) запишем уравнение для определения значения константы скорости прямой реакции (2.86)

$$k_i = P \frac{Z_M}{Z_A Z_B} \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{1}{\delta} e^{\frac{E_0}{RT}}. \quad (2.102)$$

Длина вершины барьера будет равна

$$\delta = \frac{h}{(2\pi m kT)^{1/2}}. \quad (2.103)$$

Выражение (2.101) запишется в следующем виде

$$k_i = P \frac{\kappa T}{h} \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_0}{RT}}. \quad (2.104)$$

Выражение $\kappa T/h$ будет одинаковым для всех реакций и исходных веществ, следовательно, оно будет иметь размерность частоты и может представлять универсальную постоянную при каждой температуре, т.е. это выражение ($\kappa T/h$) характеризует частоту прохождения активированным комплексом вершины параболы для данной температуры.

Поскольку не все активированные комплексы достигают вершину параболы и двигаются по координате разложения необходимо введение трансмиссионного коэффициента \wp для учета действительно распавшихся и давших продукты реакции активированных комплексов. Поэтому уравнение (2.104) запишется следующим образом

$$k_i = P \wp \frac{\kappa T}{h} \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_0}{RT}}. \quad (2.105)$$

Как обычная молекула комплекс обладает устойчивостью к изменениям конфигурации атомов, кроме, конечно же, движения по пути самой реакции. Следовательно, считая активированные комплексы молекулами и заменяя степени свободы, соответствующие координате разложения, жесткой связью, выражение $\frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_0}{RT}}$ рассмотрим в виде константы равновесия между начальным и активированным состояниями:

$$K^M = \frac{Z_M}{Z_A Z_B} e^{-\frac{E_0}{RT}}. \quad (2.106)$$

Выражение для определения констант скоростей реакций перепишем в следующем виде

$$k_i = P \wp \frac{\kappa T}{h} K^M. \quad (2.107)$$

Для связи константы скорости реакции образования NO с рабочим процессом дизеля используем формулу Клайперона-Менделеева и представим ее следующим образом

$$\frac{M_i}{V_2} = 10^3 \frac{p_2 r_i}{RT_2}, \quad (2.108)$$

где M_i – количество молей i -го компонента, кмоль; p_2 и T_2 – давление и температура в конце участка расчета, МПа, К; $V_2 r_i$ – парциальный объем i -го компонента в конце участка расчета, м³; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8314$ Дж/(кмоль · К).

Таблица 2.3 - Результаты расчетов реакций образования NO в ЦД

№ п/п	Реакция	Константа реакции, м ³ /кмоль·с
1	$N + OH \xrightarrow{k_1} NO + H$	$k_1 = 1,05 \cdot 10^{11}$
2	$NO + H \xrightarrow{k_2} N + OH$	$k_2 = 1,00 \cdot 10^{11,23} e^{-24569/T_{nc}}$
3	$H + O_2 \xrightarrow{k_3} OH + O$	$k_3 = 1,20 \cdot 10^{14} T_2^{-0,91} e^{-8310/T_{nc}}$
4	$OH + O \xrightarrow{k_4} H + O_2$	$k_4 = 1,85 \cdot 10^{10}$
5	$N_2 + O \xrightarrow{k_5} NO + N$	$k_5 = 7,60 \cdot 10^{10} e^{-38000/T_{nc}}$
6	$NO + N \xrightarrow{k_6} N_2 + O$	$k_6 = 1,65 \cdot 10^{10}$
7	$N + O_2 \xrightarrow{k_7} NO + O$	$k_7 = 6,40 \cdot 10^6 T_2 e^{-3150/T_{nc}}$
8	$NO + O \xrightarrow{k_8} N + O_2$	$k_8 = 1,50 \cdot 10^6 T_2 e^{-19500/T_{nc}}$
9	$N_2 + O_2 \xrightarrow{k_9} NO + NO$	$k_9 = 5,48 \cdot 10^{10} e^{-53900/T_{nc}}$
10	$NO + NO \xrightarrow{k_{10}} N_2 + O_2$	$k_{10} = 2,60 \cdot 10^9 e^{-32120/T_{nc}}$

Выразив скорость образования NO с учетом уравнения (2.108) и используя в качестве примера реакцию $N + OH \xrightarrow{k_i} NO + H$, получим:

$$k'_i \frac{M_N M_{OH}}{V_2^2} = \frac{10^3 p_2}{RT_2} k_i r_N r_{OH}, \quad (2.109)$$

где k'_i – значение константы скорости i -той реакции, м³/(кмоль · с).

Учитывая формулу Клайперона-Менделеева (2.108) запишем

$$r_N = \frac{10^{-3} RT_2 M_N}{p_2 V_2}; \quad r_{OH} = \frac{10^{-3} RT_2 M_{OH}}{p_2 V_2}. \quad (2.110)$$

Подставляя зависимости r_N и r_{OH} в выражение (2.109), получаем следующее уравнение

$$k'_i = k_i \frac{RT_2}{10^3 p_2}. \quad (2.111)$$

С помощью представленного выражения можно провести расчет констант скоростей химических реакций образования NO в ЦД. По результатам разработанного химизма образования оксидов азота в ЦД при работе на ПГ и спирто-топливных эмульсиях выделены реакции, дающие наиболее весомый вклад в общий процесс образования NO_x в ЦД и рассчитаны их константы скоростей, представленные в таблице 2.3.

Для расчета содержания NO_x в ЦД при работе на ПГ и СТЭ рассмотрим математическое моделирование.

2.3 Математическая модель расчета объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ

Скорости горения распыленного дизельного топлива в потоке МВС, либо СТЭ в потоке воздуха в КС в общем случае определяются скоростями дифференциальных «элементарных» процессов (смешение паров дизельного топлива (СТЭ) с окислителем, прогрев, испарение, химические реакции, разгон и дробление капель и т.п.).

Если допустить, что время реакции и смешивания на уровне межкапельного расстояния дизельного топлива (СТЭ) многим ниже времени испарения, то можно принять скорость испарения равной скорости горения, причем горение будет заканчиваться сразу, как только минует жидкая фаза [401, 402].

Предполагая равномерное распределение капель дизельного топлива (СТЭ) по сечению КС, получаем зависимость всех параметров от продольной координаты x и возможность рассмотрения одномерной постановки задачи, позволяющей

вести исследования низкочастотных и продольных акустических колебаний. Поскольку элементарные процессы могут достаточно точно определить процессы в газовой фазе, то необходимо их рассмотрение с целью получения значений скорости испарения капель дизельного топлива (СТЭ) [370, 403, 404].

Рассмотрим схему горения капли дизельного топлива (СТЭ) в турбулентном потоке МВС (воздушной смеси при работе на эмульсии) с избытком окислителя. Вокруг капли дизельного топлива (СТЭ) в процессе испарения происходит образование области паров горючего 2 с диффундирующим ей навстречу окислителем 5, что образует вокруг капли горючую смесь (рисунок 2.5).

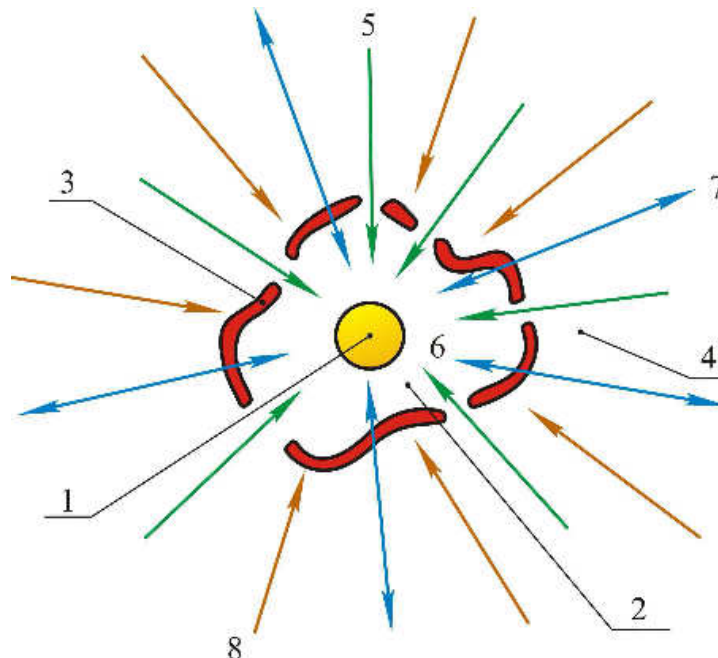


Рисунок 2.5 - Схема горения капли дизельного топлива (СТЭ) в ЦД:
 1 – капля дизельного топлива (СТЭ); 2 – пары топлива; 3 – фронт горения; 4 – зона догорания; 5 – окислитель; 6,7 – продукты горения; 8 – турбулентный поток МВС (воздушной смеси при работе на СТЭ)

Содержание топлива в узком слое 3, в котором осуществляется горение полученной смеси, близко к стехиометрическому. Толщина этого слоя, или фронта горения, равняется нескольким долям миллиметра. Образовавшиеся в зоне горения 3 продукты сгорания 6 и 7 проникают как в направлении области паров топлива 2 (в сторону капли), так и в направлении области догорания 4 (противоположная сторона). Следовательно, занимаемый факелом объем можно разделить на

две части: внешнюю (состоит из продуктов сгорания и проникающего им на встречу воздуха) и внутреннюю (состоит из паров топлива и продуктов горения, которые проникают из фронта горения в сторону капли).

Вследствие пульсаций турбулентного потока, фронт пламени утрачивает контур своих границ, происходит его пульсация и разрывы. Проникающий вглубь фронта пламени кислород воздуха способствует процессу предварительного окисления паров топлива одновременно с их термическим разложением [405].

В зоне горения капли скорость диффузии топливо-воздушной смеси превышает скорость ее испарения. Следовательно, скорость горания капли ограничена продолжительностью испарения, а измельчение капель дизельного топлива (СТЭ) будет определяться силами трения, направленными касательно к капле, и скоростным напором, который действует на каплю.

Интенсивность скоростного напора, действующего на каплю дизельного топлива (СТЭ), определяется с помощью числа Вебера:

$$W_e = \frac{\rho(u - v)^2 a}{\sigma}, \quad (2.112)$$

где u , ρ – скорость и плотность сгораемого топлива; σ – коэффициент поверхностного натяжения дизельного топлива (СТЭ); a , v – диаметр и скорость капли.

Определяется число Рейнольдса, влияющее на силы трения,

$$R_e = \frac{a u \rho}{\mu}, \quad (2.113)$$

где μ – вязкость используемого топлива.

Если значение числа Вебера W_e становится выше критического значения W_e^* , то происходит дробление капель. Необходимо отметить, что смесеобразование в КС дизеля можно охарактеризовать сравнительно плавным нарастанием скорости потока топливо-воздушной смеси, обдувающим каплю дизельного топлива (СТЭ). В таком процессе, скорее всего, возможно осуществление «вибрационной модели» при которой происходит деление капли дизельного топлива (СТЭ) на две или несколько частей. При этом соответствующее этому процессу Критическое число Вебера W_e^* равняется диапазону от 4 до 24.

Создаваемый форсункой пучок капель дизельного топлива (СТЭ) не может равномерно распределить капли по сечению КС дизеля. Пучки капель дизельного топлива (СТЭ), обладающие определенным аэродинамическим сопротивлением, омываются газом (либо МВС при работе по ГДП). Следовательно, внутри пучка скорость газа ниже его средней скорости, что, соответственно, приводит к затруднению измельчения капель дизельного топлива (СТЭ).

Дробление капель дизельного топлива (СТЭ) происходит не сразу после достижения числом Вебера критического значения. Капля первоначально подвергается процессу деформации. Эмпирическую зависимость, описывающую время деформации капли, предшествующее делению, в зависимости от характеристик процесса можно записать выражением:

$$\tau_d = k \frac{a}{|u - v|} \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{\rho}}, \quad (2.114)$$

где k – коэффициент, учитывающий форму КС; $\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы; τ_d – время деформации.

Как только критерии деления достигают критических значений, происходит деление капли дизельного топлива (СТЭ) в координате сечения, при этом критический параметр числа Вебера определяется следующим условием:

$$W_e^* = \frac{\rho(l, t)[u(l, t) - v(l, t)]^2 a(l, t)}{\sigma(l, t)}, \quad (2.115)$$

где l – координата сечения, в которой происходит деление (дробление) капли.

Далее допустим, что дробление капли дизельного топлива (СТЭ) происходит через определенный промежуток времени τ_d после достижения числом Вебера W_e критических значений. При этом деление капли дизельного топлива (СТЭ) осуществляется на такое множество равных частей, что вновь образовавшиеся капли не участвуют в последующем делении, и это условие становится более существенным при значительном росте W_e во время τ_d .

Разбив постоянные потоки дизельного топлива (СТЭ), создаваемые форсунками на отдельные части, в рамках которых размеры капель постоянны и зависят

от координаты x , обусловимся, что каждая капля находится только в пределах своей части и число капель после деления растёт. Так же допускаем, что во время деления каждая капля дизельного топлива (СТЭ) дробится на две части после достижения W_e критических значений, причем это дробление при движении по КС происходит только один раз. Все капли дизельного топлива (СТЭ), которые принадлежат к своей части, имеют одинаковую скорость, не толкаются между собой и с каплями дизельного топлива (СТЭ), относящихся к другим частям. Уравнения движения капель дизельного топлива (СТЭ), принадлежащих части с порядковым номером s запишутся следующим образом:

$$\frac{dv_s}{dt} + v_s \frac{dv_s}{dx} = v_s G_{vs} = \left\{ \begin{array}{l} F_s^-(x, t) \text{ при } 0 \leq x \leq l_s(t) \\ F_s^+(x, t) \text{ при } x \geq l_s(t) \end{array} \right\}; \quad (2.116)$$

$$F_s = c_{xc} \frac{\rho a_s^2}{4m_s} \cdot \frac{(u - v_s) \cdot |u - v_s|}{2}, \quad (2.117)$$

где $s = 1,0$ (для дизеля 4Ч 11,0/12,5); r – количество частей (групп) капель дизельного топлива (СТЭ); v – индекс обозначения номера части, к которой относится капля; m_s – масса капли дизельного топлива (СТЭ); $v_s G_{vs}$ – специально введенное сокращение правой части уравнения для упрощения записи последующих выражений (v_s – искусственно введенное обозначение); c_{xs} – коэффициент сопротивления капли дизельного топлива (СТЭ); x – координата по направлению оси КС.

В уравнении (2.116) и в последующих индексы «+» и «-» характеризуют рассмотрение функции, соответственно, справа или слева по отношению к подвижному сечению $l_s(t)$. Из-за изменения a_s , которое вызывается дроблением капли, происходит также изменение, но только скачкообразное, функции F_s в сечении $l_s(t)$.

Коэффициенты сопротивления капли дизельного топлива (СТЭ), испаряющейся в потоке топливо-воздушной смеси и соответствующей тому же объему, отличаются. Во-первых, из-за аэродинамических сил, сплюсывающих каплю ди-

зельного топлива (СТЭ), вследствие чего она теряет свою сферическую форму. Во-вторых, пары дизельного топлива (СТЭ), образующиеся в результате испарения, создают течение топливо-воздушной смеси, направленное по нормали к поверхности капли дизельного топлива (СТЭ). Этот процесс в КС дизеля вызывает уменьшение коэффициента сопротивления вследствие возрастания толщины пограничного слоя. При этом зависимости, позволяющие произвести расчеты c_{xs} капли дизельного топлива (СТЭ), имеют вид:

$$c_{xs} = c_{xs}^0 (R_e) \frac{1 + v_{rs}}{1 + v_{r\infty}}; c_{xs}^0 (Re) = \left\{ \begin{array}{ll} 27R_e^{-0,84} & 0 \leq Re \leq 80 \\ 0,27 Re^{-0,21} & 0 \leq Re \leq 10^4 \end{array} \right\}; \quad (2.118)$$

$$v_{rs} = \beta \frac{p_s}{p}, \quad (2.119)$$

где c_{xs}^0 – коэффициент сопротивления неиспаряющейся капли дизельного топлива (СТЭ); $v_{r\infty}$ – концентрация паров (массовая) горючего, находящихся на поверхности капли дизельного топлива (СТЭ), и в бесконечности соответственно (далее везде будем полагать $v_{r\infty} = 0$); $p_s = p_s(T_s)$ – давление паров дизельного топлива (СТЭ); β – отношение относительных молекулярных масс паров дизельного топлива (СТЭ) и окружающей каплю топливо-воздушной смеси; p – давление топливо-воздушной смеси, окружающей каплю; T_s – температура поверхности капли дизельного топлива (СТЭ).

До сечения деления $l_s(t)$ выражение, которое описывает изменения массы капли дизельного топлива (СТЭ) части s , можно записать:

$$\frac{dm_s^-}{dt} + v_s \frac{dm_s^-}{dx} = -M_s^-(x, t), \quad (2.120)$$

где M_s^- – скорость испарения одной капли дизельного топлива (СТЭ).

Для уравнения (2.120) предельные условия имеют вид: при $x = 0$, $m_s^-(0, t) = m_s^0(t)$, где $m_s^0(t)$ – начальная масса капли дизельного топлива (СТЭ) у головки КС дизеля. После сечения $l_s(t)$ выражение (2.120) необходимо заменить уравнением, где граничные условия заданы подвижной границей $l_s(t)$:

$$\frac{dm_s^+}{dt} + v_s \frac{dm_s^+}{dx} = -M_s^+(x, t). \quad (2.121)$$

Это граничное условие во время деления капли дизельного топлива (СТЭ) на две равные части выглядит следующим образом:

$$m_s^-(l_s - 0, t) = 2m_s^+(l_s + 0, t). \quad (2.122)$$

Для сведения зависимостей (2.120, 2.121) в одно уравнение введем новую переменную \bar{m}_s , которая связана со старыми m_s^- и m_s^+ следующим выражением:

$$\bar{m}_s = \begin{cases} m_s^- & \text{при } x \leq l_s(t) \\ 2m_s^+ & \text{при } x \geq l_s(t) \end{cases}. \quad (2.123)$$

Замена переменных необходима для перехода от массы единичной капли к сумме их масс, образующихся в результате деления капли дизельного топлива (СТЭ). Выражение (2.123) показывает непрерывность функции \bar{m}_s : $\bar{m}_s(l_s - 0, t) = \bar{m}_s(l_s + 0, t)$, но в сечении l_s происходит разрыв её производной. Зная о непрерывности функции \bar{m}_s , перепишем выражения (2.120 - 2.122) следующим образом:

$$\frac{d\bar{m}_s}{dt} + v_s \frac{d\bar{m}_s}{dx} = v_s G_{ms} = \begin{cases} -M_s^- & \text{при } x \leq l_s(t) \\ -M_s^+ & \text{при } x \geq l_s(t) \end{cases}. \quad (2.124)$$

Рассмотрим функцию M_s , временно опуская индекс s . Закономерность испарения капли дизельного топлива (СТЭ) зависит от механизма сгорания топливо-воздушной смеси. При малых значениях скорости потока топливо-воздушного вихря, обтекающего каплю, каждая капля дизельного топлива (СТЭ) охвачена фронтом пламени. При увеличении относительной скорости топливо-воздушного вихря пламя сначала гаснет со стороны натекания потока топливо-воздушного вихря, а затем полностью срывается. Скорость испарения определяется разностью температур между каплей дизельного топлива (СТЭ) и топливо-воздушной смесью, которая заполняет межкапельный объем.

При относительной скорости 2,5...5,0 м/с может наблюдаться срыв пламени испаренного дизельного топлива (СТЭ). Согласно теории горения критическая скорость самовоспламенения капли дизельного топлива (СТЭ) должна быть существенно ниже критической скорости срыва горения. Кроме того необходимо отметить что размеры индивидуальных фронтов горения при сравнительно небольшом давлении будут превышать средние расстояния между каплями дизельного топлива (СТЭ), поэтому принимаем, что в КС дизеля отсутствуют индивидуальные фронты горения, отходя от стандартного предположения об их наличии. Следовательно, можно допустить, что скорость испарения будет определяться средней температурой топливо-воздушного вихря, который заполняет межкапельный объем в ЦД.

Представим скорость испарения одной капли дизельного топлива (СТЭ) в следующем виде:

$$M = \pi \rho r D N_u \frac{v_{rs} - v_{r\infty}}{1 - v_{rs}}, \quad (2.125)$$

где ρ – плотность газа; D - коэффициент, характеризующий диффузию; N_u – число Нуссельта, определяемое по выражению:

$$N_u = 2 \left(1 + c P_r^{1/3} \text{Re}^{1/2} \right) (1 - v_{rs}), \quad (2.126)$$

где P_r – число Прандтля (в данной задаче $P_r = 0,7$); $0,27 < c < 0,37$.

Числа Шмидта S_c и Льюиса L_e равняются единице:

$$\mu = \rho D; \quad \lambda = c_p \rho D, \quad (2.127)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; μ – вязкость газа; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Выражение позволит (2.126) учесть как тепловые, так и диффузионные числа Нуссельта. Формула для определения количества капель дизельного топлива (СТЭ) запишется следующим образом

$$\frac{dn_s}{dt} + \frac{dv_s n_s}{dx} = 0, \quad (2.128)$$

где n_s - количество капель дизельного топлива (СТЭ) в единице объема.

Если $x < 1_s(t)$ то n_s соответствует действительному числу капель. Проходя сечение деления, n_s удваивается аналогично m_s (2.123).

Вследствие теплообмена с окружающим потоком топливо-воздушного вихря температура капли дизельного топлива (СТЭ) при движении по КС дизеля непрерывно увеличивается. Температуру по сечению капли дизельного топлива (СТЭ) можно описать кривой, максимум которой находится по периметру капли, а минимум в ее центре. Характеристику этой кривой можно представить числом Фурье

$$F_0 = \frac{a_0 \tau}{r^2}, \quad (2.129)$$

где a_0 – температуропроводность капли дизельного топлива (СТЭ); τ – время прогрева капли дизельного топлива (СТЭ); r – радиус капли.

Если $F_0 \ll 1$, то температура в центре капли дизельного топлива (СТЭ) будет приближаться к первоначальной. Необходимо отметить, что снижение температуры от значений, соответствующих поверхности капли дизельного топлива, до начальных будет находиться в довольно небольшой зоне, которая примыкает к поверхности. Следовательно, при довольно низких величинах числа Фурье во время испарения температура капли дизельного топлива (СТЭ) может сохранять свои значения. При этом теплота, которая поступила к каплям за промежуток времени dt , расходуется на нагрев и испарение только переходящих в пар порций дизельного топлива (СТЭ).

Опишем режим послойного испарения уравнением теплового баланса:

$$Q_s = M_s [c_{ж} (T_s - T_s^0) + \xi(T_s)], \quad (2.130)$$

где Q_s – идущий к капле дизельного топлива (СТЭ) тепловой поток; T_s – температура поверхности капли дизельного топлива (СТЭ); T_s^0 – начальная температура капли дизельного топлива (СТЭ); $c_{ж}$ – теплоемкость жидкой фазы; $\xi(T_s)$ – теплота испарения при температуре T_s .

Тепловой поток, движущийся к капле дизельного топлива (СТЭ), запишем следующим образом:

$$Q_s = \pi a N_u \bar{c}_p (T - T_s), \quad (2.131)$$

где T – температура топливо-воздушной смеси в пространстве между каплями;
 \bar{c}_p – среднее значение удельной теплоемкости при постоянном давлении в диапазоне $T - T_s$.

Подставив выражения (2.125) и (2.131) в соотношение (2.130), получится формула для определения температуры поверхности капли дизельного топлива (СТЭ) для режима послойного испарения:

$$\bar{c}_p (T - T_s) = \frac{v_{rs}(T_s)}{1 - v_{rs}(T_s)} [c_{ж} (T - T_s^0) + \xi(T_s)]. \quad (2.132)$$

Большие значения числа Фурье (дизель 4Ч 11,0/12,5 $F_0 > 0,3$) дают капле дизельного топлива (СТЭ) прогреться полностью. Поэтому более приближена к действительности модель нагрева капли, при которой температура в любой ее точке равняется одному значению T_s . Тепловой поток топливо-воздушного вихря Q_s , поступающий к капле дизельного топлива (СТЭ), расходуется на её нагрев и испарение. Далее этот процесс будет соответствовать изотермическому объемному прогреву капли дизельного топлива (СТЭ).

Для описываемой модели формула прогрева капли дизельного топлива (СТЭ) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dT_s}{dt} + v_s \frac{dT_s}{dx} = v_s G_{rs} = \begin{cases} \frac{[Q_s^- - M_s^- \xi(T_s)]}{(m_s^- c_{ж})} & \text{при } x \leq l_s(t) \\ \frac{[Q_s^+ - M_s^+ \xi(T_s)]}{(m_s^+ c_{ж})} & \text{при } x \geq l_s(t) \end{cases}. \quad (2.133)$$

В цилиндре дизеля доля объема, занимаемая каплями дизельного топлива (СТЭ), весьма мала по сравнению с потоком топливо-воздушного вихря. Если пренебречь ею, то с учетом введенных ранее обозначений выражение массы топливо-воздушной смеси примет вид:

$$\frac{dp}{dt} + v_s \frac{dp_u}{dx} = G_{pu} = \sum_{s=1}^r \begin{cases} M_s^- n_s & \text{при } x \leq l_s(t) \\ 2M_s^+ n_s & \text{при } x \geq l_s(t) \end{cases}, \quad (2.134)$$

где G_{pu} – скорость образования топливо-воздушной смеси в единице объема.

До сечения l^* , где происходит полное выгорание топливо-воздушной смеси, концентрация паров дизельного топлива (СТЭ) в газовой фазе топливо-воздушной смеси равняется нулю, а концентрация окислителя ему не равна. Пройдя сечение l^* уже концентрация окислителя равняется нулю, а концентрация паров дизельного топлива (СТЭ) нет.

Так же до сечения l^* выражение для определения количества окислителя в газовой фазе запишется следующим образом:

$$\frac{dpv_0}{dt} + v_s \frac{dpv_0}{dx} = -k_0 G_{pu}, \quad (2.135)$$

где k_0 – стехиометрический коэффициент; v_0 – массовая концентрация окислителя.

При движении топливо-воздушного вихря в потоке высоких температур концентрация паров дизельного топлива (СТЭ) v_r будет соответствовать суммарной концентрации продуктов диссоциации. Поскольку $v_{r\infty} = 0$, то выражения (2.118) и (2.125), служащие определением \bar{c}_x и M , должны соответствовать предположению о полной диссоциации паров дизельного топлива (СТЭ).

Пройдя сечение l^* выражение для определения количества паров дизельного топлива (СТЭ), а точнее для определения продуктов их диссоциации запишется следующим образом:

$$\frac{dpv_r}{dt} + v_s \frac{dpv_r}{dx} = G_{pu}, \quad (2.136)$$

где v_r – концентрация (массовая) паров горючего.

Вводя переменную:

$$v = \frac{v_0}{k_0} - v_r \quad (2.137)$$

и используя выражения (2.134 - 2.136) объединим в одно уравнение:

$$\frac{dv}{dt} + u \frac{dv}{dx} = -\frac{1+v}{\rho} G_{pu} = uGv. \quad (2.138)$$

Поток топливно-воздушной смеси, содержащий испаряющиеся капли дизельного топлива (СТЭ), можно разбить на две схемы, приводящих к потере количества движения. Одна будет обусловлена потерями импульсов, идущих на разгон потока топливно-воздушного вихря от скорости, соответствующей скорости капли v_s , до скорости газового потока топливно-воздушного вихря. Другая – потерями, которые возникают за счет силы трения газа о капли. Принимая во внимание эти потери, формула для движения топливно-воздушной смеси примет вид

$$\rho \left(\frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} \right) = R = \sum_{s=1}^r (v_r - u) M_s^- n_s - m_s F_s^- n_s \text{ при } x \leq l_s(t) \quad (2.139)$$

$$2(v_s - u) M_s^+ n_s - m_s F_s^+ n_s \text{ при } x \geq l_s(t)$$

Первая составляющая правой части характеризует изменение количества движения как следствие газообразования, вторая – снижение количества движения из-за трения газа о капли. Используя выражение (2.134), представим формулу (2.139) следующим образом:

$$\frac{dpu}{dt} + \frac{dq}{dx} = G_q = \sum_{s=1}^r (M_s^- v_s - F_s^-) n_s \text{ при } x \leq l_s(t) \quad (2.140)$$

$$2(M_s^+ n_s - m_s F_s^+) n_s \text{ при } x \geq l_s(t)$$

где $q = p + \rho u^2$.

Возьмем в качестве закона сохранения энергии формулу энтропии используемого топлива, в т.ч. альтернативного (ПГ, СТЭ и др.):

$$\frac{ds}{dt} + u \frac{ds}{dx} = G_s = \frac{1}{\rho t} \sum_{s=1}^r \frac{E_s^-}{E_s^+} \text{ при } x \leq l_s(t) \quad (2.141)$$

$$\text{при } x \geq l_s(t)$$

где $\sum E_s$ – теплота, подводимая в единицу времени к единице объема топливно-воздушной смеси; s – энтропия используемого топлива.

Если предположить, что теплоемкость используемого топлива не зависит от его состава и температуры, тогда уравнение для $\sum E_s$ будет выглядеть так:

$$E_s = \left[(1 - \psi)(1 + k_0) H_0 - c_{ж} (T_s - T_s^0) - \xi(T_s) - \bar{c}_p (T - T_s) \right] M_s n_s, \quad (2.142)$$

где H_0 – теплота сгорания используемого топлива; T_s^0 – начальная температура капли дизельного топлива (СТЭ); ψ – функция (ступенчатая), $\psi = 0$ – до сечения,

в котором происходит полное сгорание окислителя, $\psi = 1$ - после прохождения этого сечения.

До сечения, в котором происходит полное сгорание окислителя, рассматриваемая скорость равняется скорости горения. Обозначение, стоящее в квадратных скобках, соответствует количеству теплоты, подводимой к топливо-воздушной смеси при образовании и сгорании единицы массы паров дизельного топлива (СТЭ).

Первое выражение в квадратных скобках характеризует теплоту, которая подводится за счет горения, второе – теплоту, которая расходуется на нагрев испаряющихся слоев капель дизельного топлива (СТЭ) от их первоначальной температуры до температуры, соответствующей испаряющемуся слою, третье – теплоту, которая идет на испарение капли, четвертое – теплоту, которая расходуется на нагревание массы газа, образующегося вновь в результате испарения.

Вводя искусственно теплоту диссоциации h , которая расходуется на диссоциацию продуктов горения и, упрощая запись, временно примем условие отсутствия деления капель дизельного топлива (СТЭ). Таким образом, учитывая уравнение (2.142), выражение (2.141) запишем в следующем виде:

$$\rho T \left(\frac{ds}{dt} + u \frac{ds}{dx} \right) = \sum E_s - h \sum M_s n_s - \rho \frac{Dh}{dt}. \quad (2.143)$$

Вторая составляющая правой части формулы (2.143) характеризует теплоту, которая затрачена на диссоциацию заново образующейся топливо-воздушной смеси в единице объема. Последняя составляющая справа характеризует вследствие изменения параметров топливо-воздушной смеси теплоту диссоциации величины объема газа за величину времени.

Опишем сначала стационарный процесс. Для этого упростим температуру T_s , которая будет постоянна не только для всех капель, но по всей зоне горения $T_s = T_j = \text{const}$. Пренебрежем и изменением значений давления по всей зоне горения. Тогда выражение (2.143), с учетом принятых допущений, следующего уравнения $s = c_p \ln T - R \ln p$ и преобразований запишется:

$$\bar{\rho} \bar{u} c_p = \frac{d\bar{T}}{dx} = \left[(1-\psi)(1+k_0)H_0 - c_{*} \left(\bar{T}_j - \bar{T}_j^0 \right) - \xi \left(\bar{T}_j \right) - c_p \left(\bar{T} - \bar{T}_j \right) \right] \times \quad (2.144)$$

$$\times \sum \bar{M}_s \bar{n}_s - \bar{h} \sum \bar{M}_s \bar{n}_s - \bar{\rho} \bar{u} \frac{d\bar{h}}{dx}.$$

Интегрирование выражения (2.144) с целью сокращения переменной $\sum \bar{M}_s \bar{n}_s$ дает следующее уравнение:

$$\bar{\rho} \bar{u} c_p \left(\bar{T} - \bar{T}^0 \right) = \left[(1+k_0)H_0 - B(T_j) \right] \left(\bar{\rho} \bar{u} - \bar{\rho}^0 \bar{u}^0 \right) - \bar{\rho} \bar{u} \bar{h} + \quad (2.145)$$

$$+ \bar{\rho}^0 \bar{u}^0 \bar{h}^0 + \psi(1+k_0)H_0 \left(\bar{\rho}^1 \bar{u}^1 - \bar{\rho} \bar{u} \right),$$

где

$$B(T_j) = c_{*} \bar{\rho} \bar{u} c_p \left(\bar{T}_j - \bar{T}_s^0 \right) + \xi(T_j) + c_p \left(\bar{T}^0 - \bar{T}_j \right),$$

где индекс «0» - параметры начала зоны горения; индекс «1» – параметры сечения, соответствующего полному сгоранию окислителя.

Поскольку температура \bar{T} является функцией в составе топливо-воздушной смеси, то ее можно выразить концентрацией \bar{v} . Значение же \bar{T} можно взять из термодинамического расчета. Подчеркивая это, обозначим $\bar{T} = \bar{T}_v \left(\bar{v} \right)$. Термодинамические расчеты проводятся для двух схем агрегатного состояния компонентов: окислитель газообразный, горючее – жидкое; окислитель и горючее – газообразные.

Первоначальная температура капли дизельного топлива (СТЭ) равна температуре, с которой она поступила в ЦД. Вследствие сравнительно невысокой температуры в начальной области горения можно допустить $\bar{h}^0 = 0$. Для решения выражения (2.145) используем следующее балансовое соотношение:

$$\bar{\rho} \bar{u} = \frac{1 + \bar{v}^0}{1 + \bar{v}} \bar{\rho}^0 \bar{u}^0. \quad (2.146)$$

Решая выражение (2.145) относительно \bar{h} и пользуясь формулой (2.146), получаем следующее уравнение:

$$\bar{h}(v) = \psi(1+k_0)H_0 \bar{v} + [(1+k_0)H_0 - B(T_j)] \cdot \frac{\bar{v}^0 - \bar{v}}{1+v} - c_p \left(\bar{T}_v - \bar{T}_s^0 \right). \quad (2.147)$$

Изменения давлений в ЦД характеризуются соответствующими колебаниями температуры, которые возникают при работе сжатия. Следовательно, изменения температуры и давления при постоянных элементарных составляющих топлива связаны с изменениями теплоты диссоциации h , которая меняется ввиду колебания степени диссоциации. Поэтому значения составляющих h и \bar{h} различаются. Для выяснения величины этого различия можно соизмерить изменения температур при неравновесном и равновесном адиабатическом сжатии газовой составляющей. В первом варианте не происходит изменение степени диссоциации, а в другом – степень диссоциации меняется.

Оличие температуры при неравновесном и равновесном состояниях составляет менее 5%. Это говорит о том, что с достаточной точностью можно допустить, что $h(v) = \bar{h}(v)$.

Подставив найденные значения h в выражение (2.143), после некоторых преобразований с учетом уравнения (2.138) запишем:

$$\frac{Ds}{dt} = \frac{1}{\rho T} \left[c_p \left(\bar{T}_v - T \right) - (1+v)c_p \frac{d\bar{T}_v}{dv} \right] \cdot \sum M_{s,n_s}. \quad (2.148)$$

Учитывая подвижные сечения в выражении (2.148), заменим составляющую $\sum M_{s,n_s}$ на правую часть формулы (2.134). Рассмотрение выражения (2.148) в стационарной плоскости обеспечит равенство $T = \bar{T}_v$ при любых значениях c_p . Но также нужно учитывать, что \bar{c}_p в диапазоне изменения температур $\Delta T = T - T_s$, присутствующее в уравнении (2.131), необходимо связать с c_p выражением

$$\bar{c}_p \Delta T = c_p \Delta T + h. \quad (2.149)$$

Вторая составляющая правой части этой формулы характеризует дополнительную теплоту, выделяемую в процессе диссоциации во время охлаждения сгоревшей топливо-воздушной смеси.

Физический смысл выражения (2.148) показывает удобную формулу для вычисления энтропии в случае направления части теплоты на нагрев капли дизельного топлива (СТЭ). Пользуясь выражением (2.138) перепишем формулу (2.148) следующим образом:

$$\rho T \frac{Ds}{dt} = c_p \frac{DT_v(v)}{dt} - [T - T_v(v)] \sum M_s n_s. \quad (2.150)$$

Множитель c_p , находящийся первым в правой стороне формулы (2.150), характеризует теплоемкость единицы объема топливо-воздушной смеси, полностью же первое слагаемое правой части этого уравнения показывает подведенную теплоту при сгорании топливо-воздушной смеси, имеющей массу $\sum M_s n_s$, в единице объема за единицу времени. В результате горения этой топливо-воздушной смеси происходит изменение концентрации v . Температура топлива в процессе смесеобразования характеризуется подведенной теплотой и работой сжатия, следовательно $T \neq T_v(v)$. Так как работа сжатия топливо-воздушной смеси не меняет температурный режим в газовой фазе, то заново образующееся из жидкой фазы газообразное топливо, имеющее массу $\sum M_s n_s$, нагревается от значений температуры $T_v(v)$ до T . При этом количество теплоты, расходуемое на прогрев, представляется последним множителем правой части формулы (2.150).

Опишем далее процесс изотермического нагрева капли дизельного топлива (СТЭ). Первоначальная температура капле при послойном испарении не меняется и равняется T_s^0 . В рассматриваемом процессе T_s соответствует функциям x и t . Дополнительная теплота, выделяемая в единице объема за единицу времени в результате увеличения начальной температуры испаряющегося дизельного топлива (СТЭ) на $\Delta T = T_s - T_s^0$, определится следующим выражением:

$$Q_1 = \sum c_{ж} (T_s - T_s^0) M_s n_s. \quad (2.151)$$

Так же в процессе изотермического нагрева капле дизельного топлива (СТЭ) необходимо учесть теплоту, идущую на увеличение температуры капли дизельного топлива (СТЭ):

$$Q_2 = +c_{ж} \sum m_s n_s \frac{Dt_s}{dt}. \quad (2.152)$$

В стационарном случае полное дополнительное количество теплоты, подведенное к газу, Q_1 равняется сумме теплоты, которая ушла на нагрев каплей. Необходимо показать, что выражения (2.151) и (2.152) соответствуют указанному требованию. Из уравнения (2.128) для стационарного процесса имеем $\bar{n}_s \bar{m}_s = \text{const}$, тогда, пользуясь выражением (2.124), выведем из формулы (2.151) значение M_s :

$$\begin{aligned} \bar{Q}_1 - \bar{Q}_2 &= -\sum c_{ж} \left[\bar{n}_s \bar{v}_s \left(\bar{T}_s - \bar{T}_s^0 \right) \frac{d\bar{m}_s}{dx} + \bar{m}_s \bar{n}_s \bar{v}_s \frac{d\bar{T}_s}{dx} \right] = \\ &= -c_{ж} \sum \bar{n}_s \bar{v}_s \frac{d}{dx} \left(\bar{T}_s - \bar{T}_s^0 \right) \bar{m}_s. \end{aligned} \quad (2.153)$$

Интеграл указанного уравнения (2.153) на участке от $x = 0$ до конца области горения $x = 1$ равняется нулю, так как первообразная функция этого уравнения тоже равняется нулю на обоих пределах интегрирования (при $x = 0$ $\bar{T}_s = \bar{T}_s^0$, при $x = 1$ $\bar{m}_s = 0$). Расширив формулу (2.148) показателями Q_1 и Q_2 с учетом выражения (2.133) и некоторых преобразований, выведем формулу для энтропии изотермического процесса нагрева капли дизельного топлива (СТЭ):

$$\begin{aligned} \frac{Ds}{dt} &= \frac{1}{\rho T} \left[c_p (T_v(v) - T) + c_{ж} (T_s - T_s^0) - (1 + v) c_p \frac{dT_v(v)}{dv} \right] \times \\ &\times \sum M_s n_s - \sum n_s [Q_s - M_s \xi(T_s)]. \end{aligned} \quad (2.154)$$

Для замыкания системы, которая базируется на дифференциальных уравнениях (2.116), (2.124), (2.128), (2.133), (2.134), (2.138), (2.139), (2.148) и (2.154), необходимо расширить её выражениями, число которых равняется r , вытекающими из уравнения (2.115) для определения параметра l_s , кроме того, снабдить следующими математическими связями:

$$p = \rho RT; s - s_0 = c_v \ln \rho; m_s = \frac{\pi \rho_* d^3}{6}; v_s = \frac{\beta p_s}{\rho}; \xi = \xi(T_s); p_s = p_s(T_s). \quad (2.155)$$

Разбив все число капель дизельного топлива (СТЭ) на r групп, получим следующее количество дифференциальных уравнений $4r + 3$, при этом математических связей для определения l_s будет $6r - 2$.

Поскольку в КС дизеля горение капли дизельного топлива (СТЭ) в топливо-воздушной среде протекает в факеле, который состоит из множества отличных по размеру капель, то термохимические преобразования сопровождается взаимным воздействием капель друг на друга и, конечно, воздействием капель на факел в целом. Рассмотрение механизма и закономерностей горения одной капли дизельного топлива (СТЭ) позволяет в доступной форме разобрать и изучить сложные процессы горения топлива в ЦД.

Расчитаем продолжительность испарения капли дизельного топлива (СТЭ), зависящую от теплообмена между газовой средой топливо-воздушной смеси и каплей, из выражения теплового баланса, согласно которому теплота, затрачиваемая на нагрев и испарение капли дизельного топлива (СТЭ), равняется теплоте, которую капля получает из окружающего ее потока топливо-воздушной смеси.

$$-\rho [c_c (T_k - T_0) + \lambda_{\pi}] dv = q F dt, \quad (2.156)$$

где ρ – плотность дизельного топлива (СТЭ), кг/м^3 ; c_c – средняя теплоемкость горючего, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; T_0 и T_k – начальная температура и температура кипения дизельного топлива (СТЭ), $^{\circ}\text{C}$; λ_{π} – теплота парообразования топлива, кДж/кг ; $dv = F dt$ – снижение объема капли дизельного топлива (СТЭ) за время dt ; q – удельный тепловой поток, направляемый из зоны горения капли и отнесенный к единице ее поверхности в единицу времени, кВт/м^2 ; F – поверхность капли в определенный момент времени, м^2 .

Интегрируя выражение (2.156), можно получить продолжительность полного сгорания капли дизельного топлива (СТЭ), определяющее длительность процесса сгорания в КС дизеля:

$$\tau_k = \int_{r_0}^r \rho \tau \frac{[(T_k - T_0) + \lambda_n]}{q} dr, \quad (2.157)$$

где r и r_0 – текущий и начальный радиусы капли, м.

Конвективный и лучистый теплообмен между топливо-воздушной смесью и частицами дизельного топлива является неотъемлемой частью процесса горения. При этом удельные тепловые потоки конвекции q_k и излучения q_n , Вт/м², вычисляются по формулам:

$$q_k = \alpha_k (T_f - T_s); \quad (2.158)$$

$$q_n = \alpha_n (T_f - T_s), \quad (2.159)$$

где α_k , α_n – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением, Вт/(м²·К); T_f – температура в области теплообмена, К; T_s – температура поверхности капли дизельного топлива (СТЭ), К.

Выражение для определения коэффициента теплоотдачи, определяемого конвекцией:

$$\alpha_k = \frac{N_u \lambda}{d}, \quad (2.160)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; d – диаметр капли дизельного топлива (СТЭ), м; N_u – критерий Нуссельта.

Если число Рейнольдса $R_e < 1$ для частиц малого размера, то критерий Нуссельта соответствует $N_u = 2(1 + 0,008R_e^{1/3})$.

Поскольку α_n не зависит от размера мелкораспыленных форсункой капель дизельного топлива (СТЭ), то результирующему теплообмену между каплей дизельного топлива (СТЭ) и топливо-воздушной смесью соответствует конвективный теплообмен с удельным тепловым потоком, определяемым по выражению (2.158), при этом $\alpha_k \gg \alpha_n$.

При увеличении размера капель происходит уменьшение α_k и для наиболее больших капель ДТ (СТЭ) $\alpha_k \gg \alpha_n$. Поэтому, заменяя в выражении (2.158) α_k из уравнения (2.160) и подставляя в выражение (2.157), после интегрирования получим:

$$\tau_k = \frac{\rho[(T_k - T_0)c_c + \lambda_n]}{N_u \lambda (T_f - T_s)} r_0^2, \quad (2.161)$$

где

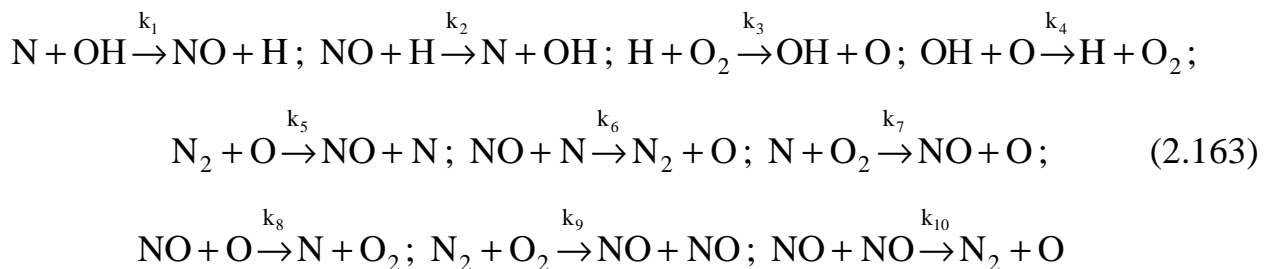
$$\frac{N_u \lambda (T_f - T_s)}{\rho[(T_k - T_0)c_c + \lambda_n]} r_0^2 = k, \quad (2.162)$$

где k – константа скорости реакции горения.

Кроме того, необходимо учесть, что $k \sim k'$, где k' – константа скорости реакции образования NO_x .

При математическом моделировании образования NO в ЦД произведем разделение процесса горения условно на две разных зоны: зону свежей смеси и зону продуктов сгорания. Зона свежей смеси будет состоять из смеси воздуха с рециркулируемыми (если расчет ведется с РОГ) и остаточными газами. Причем эта зона перед началом горения занимает весь объем КС. В процессе горения объем зоны продуктов сгорания увеличивается. С целью расчета средних по объему КС температуры и давления топливо-воздушной смеси в процессе горения допустим условие о мгновенном перемешивании свежей смеси и продуктов горения.

Расчитываться неизвестные параметры будут последовательно для каждого шага расчета $\Delta\phi$. Причем расчет сводится к определению величин в конце участка (обозначено индексом «2»), поскольку в начале участка (обозначено индексом «1») эти величины известны и равняются соответствующим значениям в конце предыдущего шага расчета [53, 54, 369]. Согласно рассмотренным химическим процессам образования NO_x в ЦД решающее значение в образовании NO определяют следующие реакции [53, 54, 369]:



Исходя из системы уравнений (2.163) выражение для расчета скорости образования NO в ЦД примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dr_{NO}}{d\tau} = & k_1 r_N r_{OH} - k_2 r_{NO} r_H + k_5 r_{N_2} r_O - k_6 r_{NO} r_N + \\ & + k_7 r_N r_{O_2} - k_8 r_{NO} r_O + k_9 r_{N_2} r_{O_2} - k_{10} r_{NO}^2, \end{aligned} \quad (2.164)$$

где r_i – значение объемного содержания i -го элемента; k_i – значение константы скорости i -той химической реакции, $1/c$.

При изменяющихся значениях объемного содержания атомарного азота и кислорода во времени получим соответствующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr_N}{d\tau} = & -k_1 r_N r_{OH} + k_2 r_{NO} r_H + k_5 r_{N_2} r_O - k_6 r_{NO} r_N - k_7 r_N r_{O_2} + k_8 r_{NO} r_O, \\ \frac{dr_O}{d\tau} = & k_3 r_H r_{O_2} - k_4 r_{OH} r_O - k_5 r_{N_2} r_O + k_6 r_{NO} r_N + k_7 r_N r_{O_2} - k_8 r_{NO} r_O + k_{10} r_{NO}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.165)$$

Приравнявая уравнения $dr_N/d\tau$ и $dr_O/d\tau$ к нулю и учитывая положение о стационарных содержаниях атомарных газов N и O, получим алгебраическую систему уравнений, из которой можно выразить значения объемных содержаний r_N и r_{OH} :

$$\left\{ \begin{aligned} r_N = & \frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A}, \\ r_{OH} = & \left\{ \begin{aligned} & k_3 r_H r_{O_2} - k_5 r_{N_2} r_O + \left[\left(\sqrt{B^2 - 4AC} - B \right) / 2A \right]^* \\ & * (k_6 r_{NO} + k_7 r_{O_2}) - k_8 r_{NO} r_O \end{aligned} \right\} / k_4 r_O, \end{aligned} \right. \quad (2.166)$$

где A , B и C – коэффициенты, соответствующие уравнению вида $Ar_N^2 + Br_N + C = 0$ и определяемые по следующим выражениям, $1/c^2$:

$$A = k_1 (k_6 r_{NO} + k_7 r_{O_2}),$$

$$B = k_1 (k_3 r_H r_{O_2} - k_5 r_{N_2} r_O - k_8 r_{NO} r_O) + k_4 r_O (k_6 r_{NO} + k_7 r_{O_2}),$$

$$C = -k_4 r_O (k_2 r_{NO} r_H + k_5 r_{N_2} r_O + k_8 r_{NO} r_O).$$

Подставляя полученные величины r_N , r_{OH} в выражение (2.164) и учитывая значения коэффициентов A , B и C , получим:

$$\begin{aligned} \frac{dr_{NO}}{d\tau} = & -\frac{1}{2k_1} \sqrt{B^2 - 4AC} + \frac{k_4^2 r_{O_2}}{2k_1} (k_6 r_{NO} + k_7 r_{O_2}) + \frac{1}{2} k_3 r_H r_{O_2} + \\ & + \frac{2k_4 k_5 k_6 r_{NO} r_{N_2} r_{O_2} (k_6 + 2k_7 r_{O_2}) + k_1 k_3^2 k_7 r_{N_2}^2 r_{O_2} r_{O_2}}{4k_4 (k_6 r_{NO} + k_7 r_{O_2})^2} + k_5 r_{N_2} r_{O_2} + \\ & + \frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A} (k_7 r_{O_2} - k_6 r_{NO}) - \frac{1}{2} k_8 r_{NO} r_{O_2} + k_9 r_{N_2} r_{O_2} - k_{10} r_{NO}^2. \end{aligned} \quad (2.167)$$

Представим выражение Клайперона-Менделеева в следующем виде:

$$M_i / V_2 = 10^3 p_2 r_i / RT_2, \quad (2.168)$$

где M_i – число молей i -го компонента, кмоль; $V_2 r_i$ – парциальный объем i -го компонента в конце участка расчета, м³; p_2 – давление в конце участка расчета, МПа; T_2 – температура в конце участка расчета, К; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ кДж/(кмоль · К).

Выразим скорость образования NO, используя для примера реакцию $N + OH \xrightarrow{k_1} NO + H$ и учитывая (2.168):

$$k_1' \frac{M_N M_{OH}}{V_2^2} = \frac{10^3 p_2}{RT_2} k_1 r_N r_{OH}, \quad (2.169)$$

где k_1' – константа скорости реакции, м³/(кмоль · с).

Из уравнения (2.168) получим:

$$r_N = \frac{10^{-3} RT_2 M_N}{p_2 V_2}; \quad r_{OH} = \frac{10^{-3} RT_2 M_{OH}}{p_2 V_2}. \quad (2.170)$$

Подставляя полученные значения r_N и r_{OH} в выражение (2.169), имеем:

$$k_i = k_i' \frac{10^3 p_2}{RT_2}, \quad (2.171)$$

где k_i' – константа скорости i -той реакции (табл. 2.3), м³/(кмоль · с).

Учитывая уравнение $\tau = \phi / 6n$ и формулу (2.171), получим выражение для расчета скорости образования NO в ЦД:

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = \frac{10^3 p_2}{6nRT_2} \left[\begin{aligned} & -\frac{1}{2k'_1} \sqrt{(B')^2 - 4A'C'} + \frac{(k'_4)^2 r_O}{2k'_1} (k'_6 r_{NO} + k'_7 r_{O_2}) + \\ & + \frac{1}{2} k'_3 r_H r_{O_2} + k'_5 r_{N_2} r_O + k'_9 r_{N_2} r_{O_2} - k'_{10} r_{NO}^2 + \\ & + \frac{2k'_4 k'_5 k'_6 r_{NO} r_{N_2} r_O (k'_6 + 2k'_7 r_{O_2}) + k'_1 (k'_5)^2 k'_7 r_{N_2}^2 r_{O_2} r_O}{4k_4 (k'_6 r_{NO} + k'_7 r_{O_2})^2} + \\ & + \frac{\sqrt{(B')^2 - 4A'C'} - B'}{2A'} (k'_7 r_{O_2} - k'_6 r_{NO}) - \frac{1}{2} k'_8 r_{NO} r_O \end{aligned} \right], \quad (2.172)$$

где коэффициенты A' , B' и C' соответствуют следующим выражениям:

$$A' = \frac{10^6 p_2^2}{R^2 T_2^2} k'_1 (k'_6 r_{NO} + k'_7 r_{O_2}),$$

$$B' = \frac{10^6 p_2^2}{R^2 T_2^2} [k'_1 (k'_3 r_H r_{O_2} - k'_5 r_{N_2} r_O - k'_8 r_{NO} r_O) + k'_4 r_O (k'_6 r_{NO} + k'_7 r_{O_2})],$$

$$C' = -\frac{10^6 p_2^2}{R^2 T_2^2} k'_4 r_O (k'_2 r_{NO} r_H + k'_5 r_{N_2} r_O + k'_8 r_{NO} r_O).$$

Подставив величины коэффициентов A' , B' и C' в выражение (2.172) и преобразовав его, запишем:

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = \frac{10^3 p_2}{6nRT_2} \left[\begin{aligned} & \frac{1}{C_1} + \frac{r_{NO}}{C_2} + \frac{1}{C_3 r_{NO}} + \frac{1}{C_4 r_{NO}^2} + \\ & + \sqrt{C_5 r_{NO}^2 + C_6 r_{NO} + C_7} \left(\frac{1}{C_8 r_{NO}} - \frac{1}{C_9} - \frac{r_{NO}}{C_{10}} \right) + \frac{r_{NO}^2}{C_{11}} \end{aligned} \right], \quad (2.173)$$

где C_i – постоянная для данного шага расчета величина.

$$C_1 = \left(\begin{aligned} & \frac{2k'_1}{(k'_4)^2 k'_7 r_{O_2} r_O} + \frac{2}{k'_3 r_H r_{O_2}} + \frac{1}{k'_5 r_{N_2} r_O} + \frac{1}{k'_9 r_{N_2} r_{O_2}} + \\ & + \frac{4k'_4 k'_7 r_{O_2}}{k'_1 (k'_5)^2 r_{N_2}^2 r_O} + \frac{4k'_7 r_{O_2}}{k'_5 k'_6 r_{N_2} r_O + 2k'_5 k'_7 r_{N_2} r_{O_2} r_O} + \\ & + \frac{2k'_6}{k'_3 k'_6 r_H r_{O_2} - k'_5 k'_6 r_{N_2} r_O + k'_7 k'_8 r_{O_2} r_O} + \\ & + \frac{2k'_1 r_{O_2}}{k'_1 k'_5 r_{N_2} r_{O_2} r_O - k'_1 k'_3 r_H r_{O_2}^2 - k'_4 k'_7 r_{O_2}^2 r_O} \end{aligned} \right),$$

$$C_2 = \left(\frac{2k'_1}{(k'_4)^2 k'_6 r_O} - \frac{2}{k'_8 r_O} + \frac{2(k'_7)^2 r_{O_2}^2}{k'_5 (k'_6)^2 r_{N_2} r_O + 2k'_5 k'_6 k'_7 r_{N_2} r_{O_2} r_O} + \right. \\ \left. + \frac{2k'_7 r_{O_2}}{k'_3 k'_6 r_H r_{O_2} - k'_5 k'_6 r_{N_2} r_O + k'_7 k'_8 r_{O_2} r_O} + \frac{2k'_1}{k'_4 k'_6 r_O - k'_1 k'_8 r_O} \right),$$

$$C_3 = \left(\frac{2k'_6}{k'_5 k'_6 r_{N_2} r_O + k'_5 k'_7 r_{N_2} r_{O_2} r_O} + \frac{8k'_4 k'_6}{k'_1 (k'_5)^2 r_{N_2}^2 r_O} + \right. \\ \left. + \frac{2k'_1 k'_6}{k'_1 k'_5 k'_7 r_{N_2} r_{O_2} r_O - k'_1 k'_3 k'_7 r_H r_{O_2}^2} + \frac{2k'_1}{k'_4 k'_6 r_O - k'_1 (k'_7)^2 r_{O_2}^2 r_O} \right),$$

$$C_4 = \frac{4k'_4 (k'_6)^2}{k'_1 (k'_5)^2 k'_7 r_{N_2}^2 r_{O_2} r_O},$$

$$C_5 = (k'_1)^2 (k'_8)^2 r_O^2 + 2k'_1 k'_4 k'_6 k'_8 r_O^2 + (k'_4)^2 (k'_6)^2 r_O^2 + 4k'_1 k'_2 k'_4 k'_6 r_H r_O,$$

$$C_6 = \left(2k'_1 r_H r_{O_2} r_O (-k'_1 k'_3 k'_8 + k'_3 k'_4 k'_6 + 2k'_2 k'_4 k'_7) + \right. \\ \left. + 2r_O^2 (k'_1 k'_8 + k'_4 k'_6) (k'_1 k'_5 r_{N_2} + k'_4 k'_7 r_{O_2}) \right),$$

$$C_7 = \left((k'_1)^2 (k'_3)^2 r_H^2 r_{O_2}^2 - 2(k'_1)^2 k'_3 k'_5 r_{N_2} r_{O_2} r_H r_O + 2k'_1 k'_3 k'_4 k'_7 r_H r_{O_2}^2 r_O + \right. \\ \left. + (k'_1)^2 (k'_5)^2 r_{N_2}^2 r_O^2 + 2k'_1 k'_4 k'_5 k'_7 r_{N_2} r_{O_2} r_O^2 + (k'_4)^2 (k'_7)^2 r_{O_2}^2 r_O^2 \right),$$

$$C_8 = \frac{2k'_1 k'_6}{k'_7 r_{O_2}}, \quad C_9 = 2k'_1, \quad C_{10} = \frac{2k'_1 k'_7 r_{O_2}}{k'_6},$$

$$C_{11} = \frac{2k'_1 k'_7 r_{O_2}}{k'_4 (k'_6)^2 r_O - k'_1 k'_6 k'_8 r_O} - \frac{1}{k'_{10}}.$$

Интегрирование выражения (2.173) по частям с учетом первоначального условия $r_{NO} = r_{NO_1}$, дает уравнение для расчета содержания NO в конце участка расчета:

$$r_{\text{NO}_2} = r_{\text{NO}_1} + \frac{10^3 p_2 \Delta\varphi}{C_1 6nRT_2} -$$

$$\left(C_2 (\ln r_{\text{NO}_2} - \ln r_{\text{NO}_1}) + \frac{C_3}{2} (r_{\text{NO}_2}^2 - r_{\text{NO}_1}^2) + \frac{C_4}{3} (r_{\text{NO}_2}^3 - r_{\text{NO}_1}^3) + \right.$$

$$\left. \sqrt{\frac{C_5}{r_{\text{NO}_2}^2} + \frac{C_6}{r_{\text{NO}_2}} + C_7} / C_5 C_8 - \sqrt{\frac{C_5}{r_{\text{NO}_1}^2} + \frac{C_6}{r_{\text{NO}_1}} + C_7} / C_5 C_8 + \right.$$

$$\left. + \frac{C_6}{2C_8 \sqrt{C_5^3}} \ln \left(\frac{2C_5}{r_{\text{NO}_1}} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{\frac{C_5}{r_{\text{NO}_1}^2} + \frac{C_6}{r_{\text{NO}_1}} + C_7} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{C_1} \frac{C_6}{2C_8 \sqrt{C_5^3}} \ln \left(\frac{2C_5}{r_{\text{NO}_2}} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{\frac{C_5}{r_{\text{NO}_2}^2} + \frac{C_6}{r_{\text{NO}_2}} + C_7} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{C_{10}} \left(\sqrt{C_5 r_{\text{NO}_2}^2 + C_6 r_{\text{NO}_2} + C_7} - \sqrt{C_5 r_{\text{NO}_1}^2 + C_6 r_{\text{NO}_1} + C_7} \right) + \right.$$

$$\left. + \ln \left(2C_5 r_{\text{NO}_2} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{C_5 r_{\text{NO}_2}^2 + C_6 r_{\text{NO}_2} + C_7} \right)^* \right.$$

$$\left. * \left(\frac{1}{C_9 \sqrt{C_5}} - \frac{C_6}{2C_{10} \sqrt{C_5^3}} \right) + \left(\frac{C_6}{2C_{10} \sqrt{C_5^3}} - \frac{1}{C_9 \sqrt{C_5}} \right)^* \right.$$

$$\left. * \ln \left(2C_5 r_{\text{NO}_1} + C_6 + 2\sqrt{C_5} \sqrt{C_5 r_{\text{NO}_1}^2 + C_6 r_{\text{NO}_1} + C_7} \right) \right) \quad (2.174)$$

где $\Delta\varphi$ – изменение угла п.к.в. на расчетном участке, $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

Решив выражение (2.174) относительно r_{NO_2} , получаем значения объемного содержания NO в конце участка расчета.

Снижение (либо рост) содержания NO, образовавшегося ранее на участке расчета $\Delta\varphi$, в продуктах сгорания определяется следующим уравнением:

$$\Delta r_{\text{NO}} = r_{\text{NO}_2} - r_{\text{NO}_1} \quad (2.174)$$

При определении значений температуры и давления топливо-воздушной смеси в процессе горения необходимо рассчитать свойства топливо-воздушной смеси, ее параметры в конце процесса наполнения, сжатия и сгорания.

Для определения теоретически необходимого количества воздуха для сгорания 1 кг топлива воспользуемся уравнением, кмоль / кг:

$$L_0 = \left(\frac{3\Pi}{0,209} \left(\frac{C_{\text{дт (стэ)}}}{12} + \frac{H_{\text{дт (стэ)}}}{4} + \frac{O_{\text{дт (стэ)}}}{32} \right) + \frac{(1-3\Pi)}{0,209\mu_r} \sum \left(n + \frac{m}{4} + \frac{r}{2} \right) C_n H_m O_r \right), \quad (2.175)$$

где 3Π – запальная порция дизельного топлива (при работе по ГДП); 0,209 – объемное содержание кислорода в атмосферном воздухе; $C_{\text{дт (стэ)}}$, $H_{\text{дт (стэ)}}$, $O_{\text{дт (стэ)}}$ – элементарный состав используемого дизельного топлива (СТЭ); μ_r – молярная масса используемого ПГ, $\mu_r = 16,11$ кг / кмоль; $C_n H_m O_r$ – объемные доли отдельных компонентов используемого ПГ; n , m , r – число атомов углерода, водорода и кислорода.

При работе дизеля на СТЭ вторая составляющая уравнения (2.175) равняется нулю.

Количество основных составляющих продуктов сгорания на 1 кг топлива, кмоль / кг :

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{3\Pi C_{\text{дт (стэ)}}}{12} + \frac{(1-3\Pi)}{\mu_r} \sum n C_n H_m O_r; \quad (2.176)$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{3\Pi H_{\text{дт (стэ)}}}{2} + \frac{(1-3\Pi)}{\mu_r} \sum \frac{m}{2} C_n H_m O_r; \quad (2.177)$$

$$M_{\text{N}_2} = 0,791\alpha L_0 + \frac{N_2}{\mu_r} \frac{1-3\Pi}{1-\rho}; \quad (2.178)$$

$$M_{\text{O}_2} = 0,209L_0 \left(\alpha - \frac{1}{1-\rho} \right), \quad (2.179)$$

где 0,791 – объемное содержание N_2 в воздухе; ρ – степень рециркуляции (при работе с рециркуляцией); α – коэффициент избытка воздуха; N_2 – объемное содержание азота в используемом ПГ, $N_2 = 0,0039$.

При работе дизеля на СТЭ вторая составляющая уравнений (2.176-2.178) равняется нулю. При работе без рециркуляции $\rho=0$.

Общее количество газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива, кмоль / кг :

$$M_{\text{ОГ}} = M_{\text{CO}_2} + M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{N}_2} + M_{\text{O}_2}. \quad (2.180)$$

Объемное содержание азота и кислорода в ОГ:

$$c_{\text{N}_2} = \frac{M_{\text{N}_2}}{M_{\text{ОГ}}}; \quad (2.181)$$

$$c_{\text{O}_2} = \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{ОГ}}}. \quad (2.182)$$

Давление рабочей смеси перед впускными клапанами, МПа :

$$p_s = p_0 + \Delta p_p - \Delta p_{\text{вп}}, \quad (2.183)$$

где p_0 – атмосферное давление, $p_0 = 0,1$ МПа; Δp_p – повышение давления, создаваемое рециркулируемыми газами; $\Delta p_{\text{вп}}$ – потери давления на впуске. При работе дизеля на СТЭ $\Delta p_p = 0$.

Повышение давления, создаваемое рециркулируемыми газами определяется по выражению:

$$\Delta p_p = p_p - p_0 - \Delta p'_p, \quad (2.184)$$

где p_p – давление ОГ в системе выпуска; $\Delta p'_p$ – потери давления ОГ в рециркуляционной трубе.

Определим значения давления ОГ в системе выпуска по уравнению, МПа :

$$p_p = p_0 + \Delta p_{\text{вып}}, \quad (2.185)$$

где $\Delta p_{\text{вып}}$ – увеличение значений давления за счет сопротивления системы выпуска.

Для определения давления в ЦД в конце условного наполнения используем выражение, МПа :

$$p_a = \frac{1}{2}(p_s - p_{\text{ср}}). \quad (2.186)$$

Значения среднего давления в ЦД при наполнении определяются следующим образом, МПа :

$$p_{\text{ср}} = p_s \left(1 - \frac{k_s - 1}{k_s} Z_s^2 \right)^{\frac{k_s}{1 - k_s}}. \quad (2.187)$$

Для расчета показателя адиабаты смеси используем уравнение:

$$k_s = 1 + \frac{R}{\mu c_v^s}, \quad (2.188)$$

где μc_v^s – значение истинной мольной изохорной теплоемкости используемой смеси (ПГ, МТЭ, ЭТЭ).

Доля ПГ мала в сравнении с воздухом и рециркулируемыми газами (при работе дизеля на ПГ), поэтому выражение для расчета значений истинной мольной изохорной теплоемкости смеси запишется следующим образом, кДж/(кмоль · К):

$$\mu c_v^s = (1 - \rho) \mu c_v^b + \rho \mu c_v^p, \quad (2.189)$$

где μc_v^b – значения мольной изохорной теплоемкости воздуха; μc_v^p – значения мольной изохорной теплоемкости рециркулируемых ОГ. При работе дизеля на СТЭ вторая составляющая уравнения (2.189) равняется нулю, $\rho=0$.

Параметр, описывающий прохождение заряда через систему впуска дизеля:

$$Z_s = \frac{C_m F_{\Pi}}{\mu_{s\text{cp}} f_{s\text{cp}} \sqrt{2R_s T_s}}, \quad (2.190)$$

где F_{Π} – значение площади поршня, м²; C_m – значение средней скорости поршня, м/с; R_s – газовая постоянная воздуха во впускном ресивере, $R_s = 286,9$ Дж/кг.

Температура смеси перед впускными клапанами, К:

$$T_s = T_0(1 - \rho) + \rho T_p + \Delta T_s(1 - \zeta), \quad (2.191)$$

где T_p – температура рециркулируемых ОГ, К; ΔT_s – подогрев смеси, который зависит от конфигурации впускного коллектора; ζ – коэффициент, который учитывает уменьшение ΔT_s с увеличением степени РОГ, $\zeta \approx 3\rho$. При работе дизеля на СТЭ вторая и третья составляющие уравнения (2.191) равняются нулю, $\rho=0$.

Коэффициент остаточных газов определится по выражению:

$$\gamma_r = \frac{\beta(1 - \rho) \left[\alpha L_0 + \frac{1}{3\Pi \mu_{\text{дт(стэ)}} + (1 - 3\Pi) \mu_r} \right] + M_{\text{ОГ}}(\beta\rho - 1)}{(1 - \beta) \left\{ (1 - \rho) \left[\alpha L_0 + \frac{1}{3\Pi \mu_{\text{дт(стэ)}} + (1 - 3\Pi) \mu_r} \right] + M_{\text{ОГ}}\rho \right\}}, \quad (2.192)$$

где β – задаваемое в первом приближении значение коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси.

Выражение для определения действительного коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси запишется следующим образом:

$$\beta = \frac{\gamma_r(1-\rho) \left[\alpha L_0 + \frac{1}{3\Pi \mu_{\text{дт(стэ)}} + (1-3\Pi)\mu_r} \right] + M_{\text{ог}}(1 + \gamma_r \rho)}{(1 + \gamma_r) \left\{ (1-\rho) \left[\alpha L_0 + \frac{1}{3\Pi \mu_{\text{дт(стэ)}} + (1-3\Pi)\mu_r} \right] + M_{\text{ог}} \rho \right\}}. \quad (2.193)$$

Если в результате расчетов величина β более чем на 2% отличается от ранее принятого, то необходимо выполнить повторный расчет по уравнениям (2.192, 2.193) с новыми значениями β .

Для определения температуры заряда ЦД в конце наполнения используем выражение, К:

$$T_a = \frac{T_s (p_a)^{\frac{k_s-1}{k_s}} + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}. \quad (2.194)$$

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \frac{p_a}{p_s} \frac{T_s}{T_a (1 + \gamma_r)}. \quad (2.195)$$

Температуру смеси конца условного сжатия определим по уравнению, К:

$$T_c = T_a \epsilon^{k_c-1}, \quad (2.196)$$

где k_c – среднее значение показателя адиабаты сжатия, $k_c = 1,38$ (значение для первоначального расчета).

Среднее значение температуры смеси в процессе сжатия, К:

$$T_c^{\text{cp}} = \frac{1}{2} (T_a + T_c). \quad (2.197)$$

Среднее значение изохорной мольной теплоемкости смеси в ЦД в процессе сжатия, кДж/(кмоль · К) [406]:

$$\mu c_{\text{всж}}^{\text{ср}} = (1 - \gamma_r) \mu c_{\text{в}}^{\text{ср}} + \gamma_r \mu c_{\text{в}}^{\gamma_r}. \quad (2.198)$$

Среднее значение показателя адиабаты сжатия:

$$k_c = \frac{\mu c_{\nu cж}^{ср} + R}{\mu c_{\nu cж}^{ср}}. \quad (2.199)$$

Если в результате расчетов величина k_c более чем на 2% отличается от ранее принятого, то необходимо выполнить повторный расчет по уравнениям (2.197-2.199) с новыми значениями k_c .

Значения давления в конце условного сжатия определяются по формуле, МПа:

$$p_c = p_a \varepsilon^{k_c}. \quad (2.200)$$

Масса смеси цилиндра перед сгоранием, кмоль:

$$M_c = 10^3 \frac{p_a (V_c + V_h)}{RT_a}. \quad (2.201)$$

Цикловая подача топлива, кг:

$$B_u = \frac{M_c}{\alpha L_0 (1 + \gamma_r)}. \quad (2.202)$$

Объем ЦД к концу участка расчета $V_2 = F_n S(\varphi_2)$, где

$$S(\varphi_2) = S - \left[R_k (1 - \cos \varphi_2) + R_k \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi_2) \right]. \quad (2.203)$$

Количество продуктов сгорания в конце участка расчета, кмоль:

$$M_{мп2} = B_u \beta x_2 (1 + \gamma_r)^* \left\{ \left[\alpha L_0 + \frac{1}{3\Pi\mu_{др} + (1 - 3\Pi)\mu_r} \right] (1 - \rho) + M_{ог}\rho \right\}, \quad (2.204)$$

где x_2 – доля сгоревшего топлива в конце участка расчета.

Объемное содержание продуктов сгорания в заряде цилиндра в конце участка расчета:

$$r_{пс2} = M_{пс2} / \left(\frac{M_c + B_u x_2 (\beta - 1)^*}{* \left\{ \left[\alpha L_0 + \frac{1}{3\Pi\mu_{др} + (1 - 3\Pi)\mu_r} \right] (1 - \rho) + M_{ог}\rho \right\}} \right). \quad (2.205)$$

Концентрация атомарного кислорода r_o соответствует химическому равновесию диссоциации молекулы кислорода $O_2 \rightleftharpoons 2O$, постоянная которого имеет значение $k_o = 2,8 \cdot 10^4 e^{-\frac{30715}{T_2}}$ [21]:

$$r_o = k_o \sqrt{r_{O_2}}. \quad (2.206)$$

Выражения для вычисления объемного содержания азота и кислорода в заряде ЦД в конце расчетного участка:

$$r_{N_2} = (1 - r_{nc2}) [0,791(1 - \rho) + \rho c_{N_2}] + r_{nc2} c_{N_2}, \quad (2.207)$$

$$r_{O_2} = (1 - r_{nc2}) [0,209(1 - \rho) + \rho c_{O_2}] + r_{nc2} c_{O_2}. \quad (2.208)$$

Относительное массовое содержание водорода в используемом ПГ (при работе дизеля на СТЭ $H_r = 0$):

$$H_r = \frac{2(n+1)r_{C_xH_y}}{\mu_r}, \quad (2.209)$$

где $r_{C_xH_y}$ – значение объемной доли соответствующих элементов в используемом природном газе, $r_{C_xH_y} = 0,9982$.

Для вычисления объемного содержания водорода в заряде ЦД в конце расчетного участка [407] используем уравнение:

$$r_H = V_{ц} (1 - x_2) \frac{3П H_{дт(стэ)} + (1 - 3П) H_r}{M_c}. \quad (2.210)$$

Вычислим среднюю изохорную мольную теплоемкость топливо-воздушной смеси в конце расчетного участка по выражению, кДж/(кмоль · К):

$$\mu c_{v2} = (1 - r_{nc2}) \mu c_{v2}^s + r_{nc2} \mu c_{v2}^{nc}, \quad (2.211)$$

где μc_{v2}^s и μc_{v2}^{nc} – значения мольных изохорных теплоемкостей несгоревшей топливо-воздушной смеси и продуктов сгорания при T_2 , кДж/(кмоль · К).

Температура заряда в цилиндре в конце участка расчета T_2 первоначально на данном участке указывается априорно, а далее – по предыдущей итерации.

Для расчета авления заряда в конце участка расчета используем выражение, МПа:

$$p_2 = \frac{2 \cdot 10^3 \Delta\chi_i + p_1 \left[\left(2 \frac{\mu c_{v1}}{R} + 1 \right) V_1 - V_2 \right]}{\left(2 \frac{\mu c_{v2}}{R} + 1 \right) V_2 - V_1}, \quad (2.212)$$

где $\Delta\chi_i$ – индикаторное тепловыделение на текущем участке расчета, кДж.

Температура заряда в цилиндре в конце участка расчета, К:

$$T_2 = 10^3 \frac{p_2 V_2}{R M_c}. \quad (2.213)$$

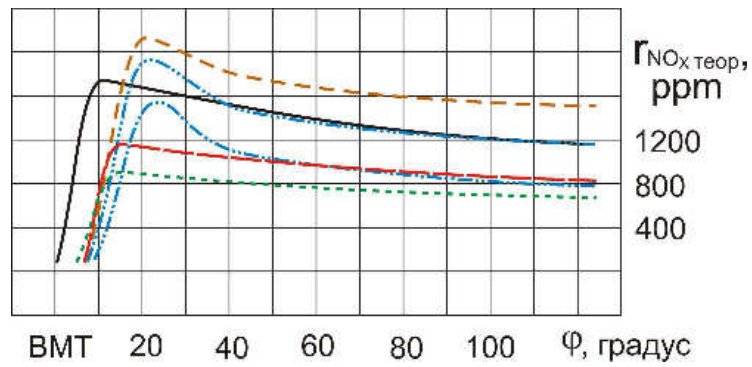
Сравнивая полученные значения T_2 с принятыми ранее и, если расхождения превышают допуск, необходимо повторить расчет, начиная с уравнения (2.211).

2.4 Теоретические исследования объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ

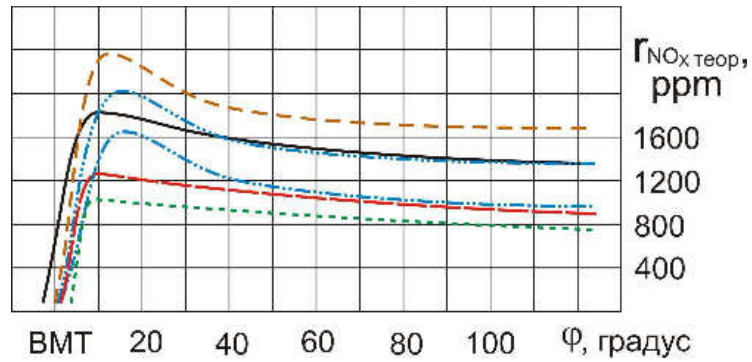
На основании предложенных выше моделей осуществлены теоретические исследования объемного содержания NO_x в ОГ и цилиндре дизеля 4Ч11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ [408, 409].

Результаты теоретических исследований объемного содержания NO_x $r_{\text{NO}_x \text{ теор}}$ в ЦД 4Ч11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. для номинальной частоты вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и частоты вращения при максимальном крутящем моменте $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ при установочных у.о.в.т. 23 и 26° до в.м.т. представлены на рисунке 2.6.

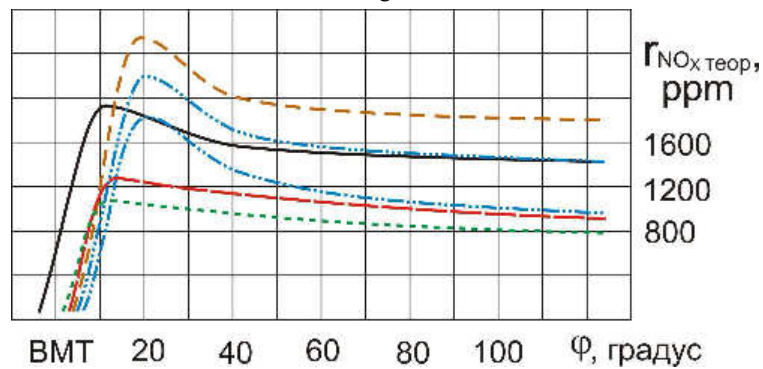
Из графиков видно, что максимальные значения содержания $r_{\text{NO}_x \text{ теор}}$ в цилиндре значительно превышают значения при угле п.к.в., соответствующем открытию выпускного клапана ($\varphi_b = 124,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т.). Следовательно, это говорит об активном разложении образовавшихся при максимальной температуре сгорания NO_x в процессе расширения.



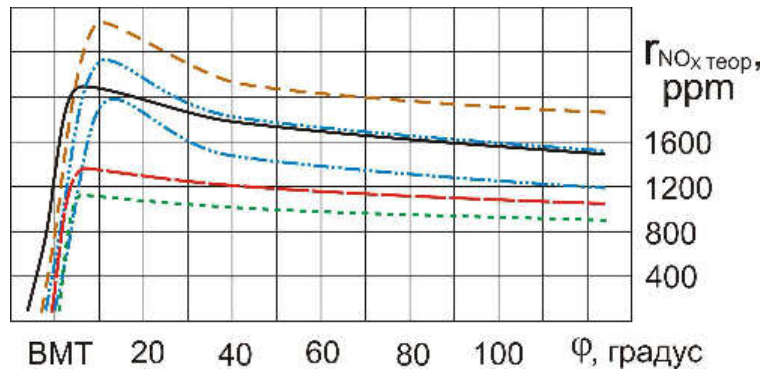
а



б



в



г

Рисунок 2.6 - Результаты теоретических исследований объемного содержания $\Gamma_{\text{NOx теор}}$ в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в.:

а - $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б - $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; в - $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$; г - $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$; ———— — ДП; - - - - - ГДП; - · - · - - ГДП с РОГ 10%; · · · · · - ГДП с РОГ 20%; - - - - - ЭТЭ; - - - - - МТЭ

Так, при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при работе по ДП максимум объемного содержания NO_x в цилиндре равняется 1740 ppm при угле п.к.в. $\varphi = 12,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ теор}}$ в цилиндре при φ_b равняется 1160 ppm, что на 33,3% меньше максимума. При работе по ГДП максимум объемного содержания NO_x в цилиндре равняется 2230 ppm при угле п.к.в. $\varphi = 20,5^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ теор}}$ в цилиндре при φ_b равняется 1530 ppm, что на 31,4% меньше максимального значения. Добавление на ГД РОГ приводит к еще большему смещению максимальных значений NO_x вправо от в.м.т. и снижает не только максимальные значения, но и значения во всем диапазоне исследования углов п.к.в.

Таблица 2.4 - Результаты теоретических исследований объемного содержания NO_x в ОГ и цилиндре дизеля 4Ч11,0/12,5 при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$

Дизель 4Ч 11,0/12,5	$n = 2200 \text{ мин}^{-1}$		$n = 1700 \text{ мин}^{-1}$	
	$\Gamma_{\text{NO}_x, \text{ теор. max '}}$ ppm	$\Gamma_{\text{NO}_x, \text{ теор. } \varphi_b '}$ ppm	$\Gamma_{\text{NO}_x, \text{ теор. max '}}$ ppm	$\Gamma_{\text{NO}_x, \text{ теор. } \varphi_b '}$ ppm
ДП	1740	1160	1820	1370
ГДП	2230 (увеличение на 28,2%)	1530 (увеличение на 31,9%)	2350 (увеличение на 29,1%)	1690 (увеличение на 23,4%)
ГДП с РОГ 10%	1740 (соответствует ДП)	1160 (соответствует ДП)	1810 (снижение на 0,6%)	1370 (соответствует ДП)
ГДП с РОГ 20%	1190 (снижение на 31,6%)	790 (снижение на 31,9%)	1270 (снижение на 30,2%)	965 (снижение на 29,6%)
Применение МТЭ	1160 (снижение на 33,3%)	815 (снижение на 29,7%)	1250 (снижение на 31,3%)	885 (снижение на 35,4%)
Применение ЭТЭ	920 (снижение на 47,1%)	690 (снижение на 40,5%)	1020 (снижение на 44,0%)	770 (снижение на 43,8%)

При теоретических исследованиях дизеля на МТЭ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ максимальное значение объемного содержания $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ теор}}$ в цилиндре со-

ставляет 1160 ppm при угле п.к.в. $\varphi = 16,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $\Gamma_{\text{NOx теор}}$ в цилиндре при φ_b равняется 815 ppm, что на 29,7% меньше максимума. При теоретических исследованиях дизеля на ЭТЭ максимум объемного содержания $\Gamma_{\text{NOx теор}}$ в цилиндре составляет 920 ppm, при угле п.к.в. $\varphi = 14,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $\Gamma_{\text{NOx теор}}$ в цилиндре при φ_b составляет 690 ppm, что ниже на 25,0% максимального значения.

Результаты теоретических исследований объемного содержания $\Gamma_{\text{NOx теор}}$ в цилиндре и ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 представлены в таблицах 2.4, 2.5.

Таблица 2.5 - Результаты теоретических исследований объемного содержания NO_x в ОГ и цилиндре дизеля 4Ч11,0/12,5 при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$

Дизель 4Ч 11,0/12,5	$n = 2200 \text{ мин}^{-1}$		$n = 1700 \text{ мин}^{-1}$	
	$\Gamma_{\text{NOx, теор. max}}$, ppm	$\Gamma_{\text{NOx, теор. } \varphi_b}$, ppm	$\Gamma_{\text{NOx, теор. max}}$, ppm	$\Gamma_{\text{NOx, теор. } \varphi_b}$, ppm
ДП	1900	1390	2070	1480
ГДП	2500 (увеличение на 31,6%)	1750 (увеличение на 25,9%)	2640 (увеличение на 27,5%)	1850 (увеличение на 25,0%)
ГДП с РОГ 10%	1880 (снижение на 1,1%)	1370 (снижение на 1,4%)	2045 (снижение на 1,2%)	1510 (увеличение на 2,0%)
ГДП с РОГ 20%	1330 (снижение на 30,0%)	950 (снижение на 31,7%)	1440 (снижение на 30,4%)	1165 (снижение на 21,3%)
Применение МТЭ	1250 (снижение на 34,2%)	900 (снижение на 35,3%)	1350 (снижение на 34,8%)	1045 (снижение на 29,4%)
Применение ЭТЭ	1050 (снижение на 44,7%)	770 (снижение на 44,6%)	1100 (снижение на 46,9%)	880 (снижение на 40,6%)

На рисунке 2.7, а представлены результаты теоретических исследований объемного содержания $\Gamma_{\text{NOx, теор. } \varphi_b}$ в ОГ дизеля 4Ч11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$.

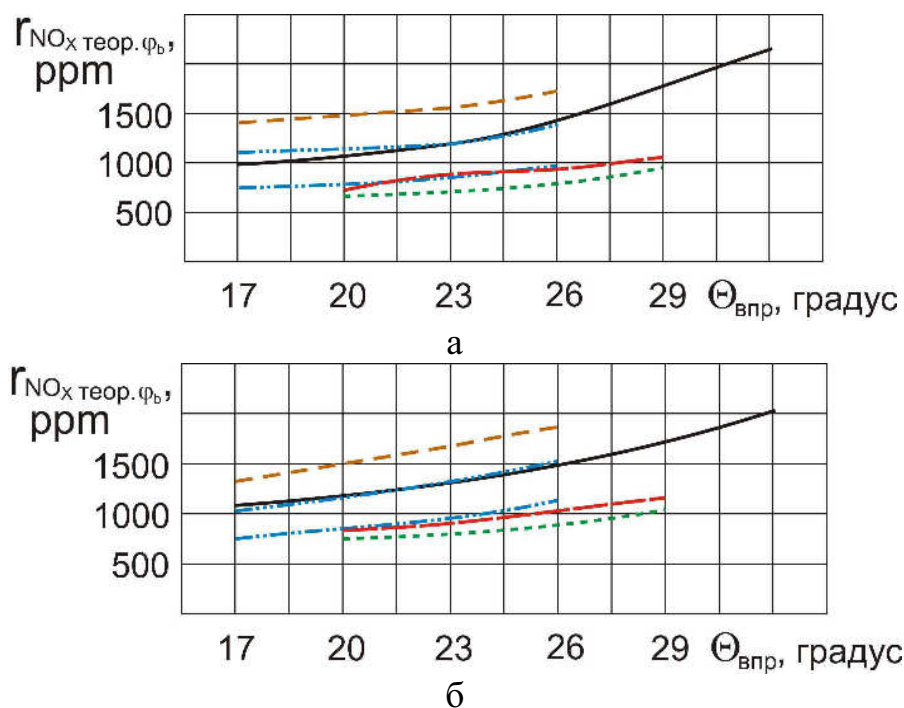


Рисунок 2.7 - Результаты теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. фб}}$ в ОГ дизеля 4C11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного у.о.в.т.: а - $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б - $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; — — — — ДП; - - - - ГДП; — ГДП с РОГ 10%; - · - · — ГДП с РОГ 20%; - - - - - ЭТЭ; - - - - - МТЭ

Из графиков видно, что значения объемного содержания NO_x в цилиндре возрастают с увеличением установочного у.о.в.т. Так, при работе по ДП $r_{\text{NO}_x, \text{теор. фб}}$ возрастает от 990 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 2190 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, или в 2,2 раза.

При работе по ГДП $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ возрастает от 1430 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 1750 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, или на 22,4%. Сравнивая значения с дизельным процессом, видно, что применение ПГ значительно увеличивает содержание $r_{\text{NO}_x, \text{теор. фб}}$ в ОГ дизеля. Применение же РОГ позволяет устранить в некоторой степени этот недостаток и снизить содержание NO_x . Так, применение 10%-ной РОГ в диапазоне изменения установочных у.о.в.т. от 17° до 26° приводит к снижению объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. фб}}$ на 24,5 и 21,7%, а применение 20%-ной РОГ в этом же диапазоне снижает $r_{\text{NO}_x, \text{теор. фб}}$ на 49,7 и 45,7% по отношению к чисто ГДП. При работе дизеля на МТЭ $r_{\text{NO}_x, \text{теор. фб}}$ увеличивается от 700 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 1040 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 33,3 до

40,9%. При теоретических исследованиях дизеля на ЭТЭ $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ растет от 640 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 870 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 39,1% до 2,0 раз.

На рисунке 2.7, б представлены результаты теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля 4Ч11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$.

Анализ графиков показывает, что значения объемного содержания NO_x в цилиндре возрастают с увеличением установочного у.о.в.т. Так, при работе по ДП $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ возрастает от 1100 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 2010 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, или на 45,3%. При работе по ГДП $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ возрастает от 1290 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 1850 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, или на 30,3%. Сравнивая значения с ДП, видно, что применение ПГ значительно увеличивает содержание $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля. Применение же РОГ позволяет устранить в некоторой степени этот недостаток и снизить содержание NO_x . Так, применение 10%-ной РОГ в диапазоне изменения установочных у.о.в.т. от 17° до 26° приводит к снижению объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ на 21,7 и 18,4%, а применение 20%-ной РОГ в этом же диапазоне снижает $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ на 43,0 и 37,0% по отношению к чисто ГДП. При работе дизеля на МТЭ $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ увеличивается от 840 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 1150 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 27,0 до 31,1%. При работе дизеля на ЭТЭ $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ растет от 750 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 1025 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 34,8 до 38,6%.

На рисунке 2.8, а представлены результаты теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля 4Ч11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах работы на установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальной частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$.

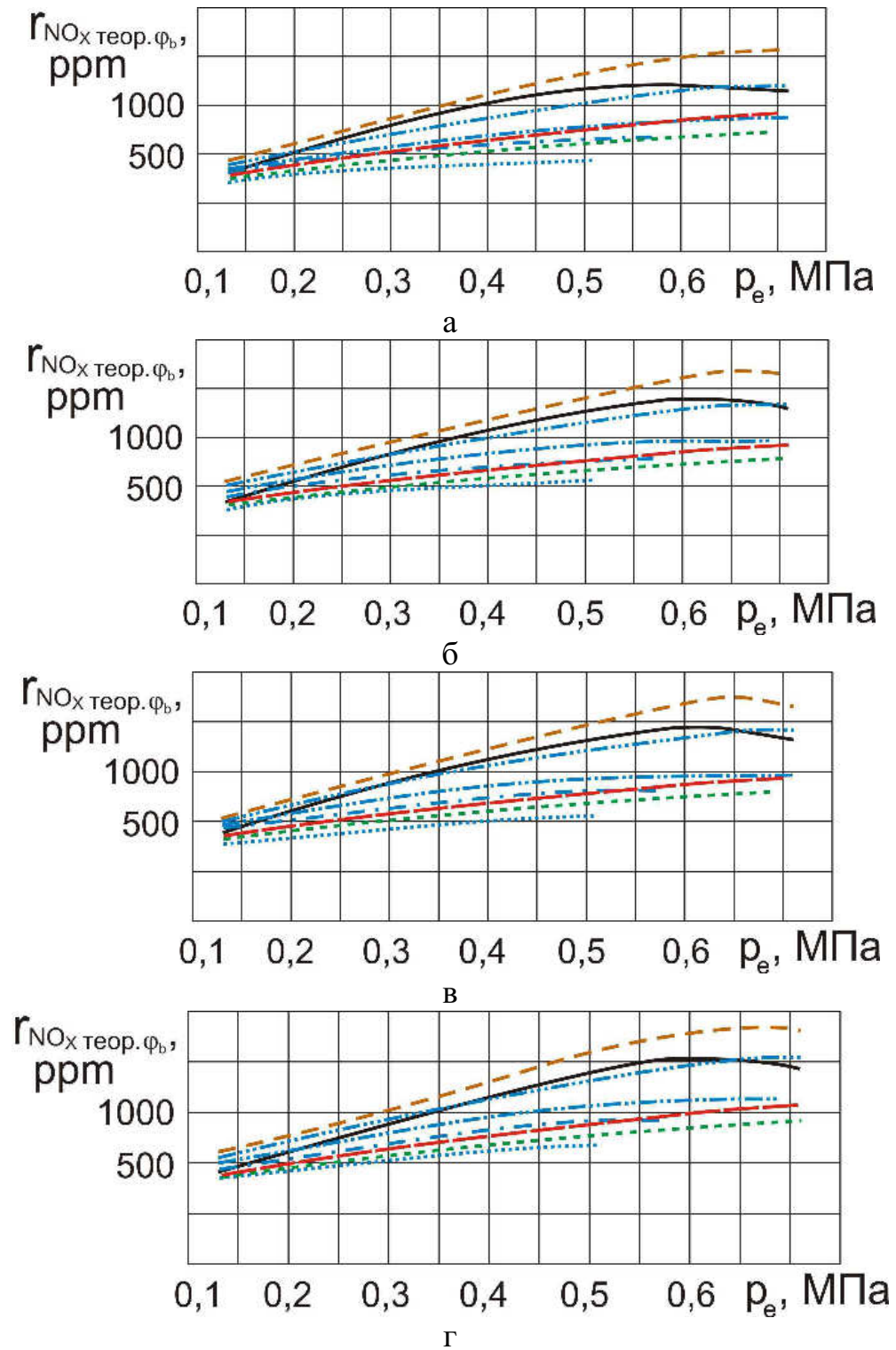


Рисунок 2.8 - Результаты теоретических исследований объемного содержания

$r_{\text{NOx, теор. фб}}$ в ОГ дизеля 4C11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки:

а - $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; $\Theta_{\text{ввр}} = 23^\circ$; б - $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; $\Theta_{\text{ввр}} = 23^\circ$; в - $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$;

$\Theta_{\text{ввр}} = 26^\circ$; г - $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; $\Theta_{\text{ввр}} = 26^\circ$; — ДП; - - - ГДП;

— · — ГД с РОГ 10%; · · · · · ГД с РОГ 20%; - · - · - ГД с РОГ 30%;

· · · · · ГД с РОГ 40%; - - - ЭТЭ; - - - МТЭ

Анализируя кривые теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля, легко заметить, что в основном при повышении нагрузки (кроме дизельного процесса на максимальных нагрузках, $p_e > 0,58$ МПа) наблюдается их рост. Так, при теоретических исследованиях дизеля на ДТ при $p_e = 0,13$ МПа $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ равняется 275 ppm, максимальные же значения наблюдаются при $p_e = 0,58$ МПа и составляют $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1260$ ppm, а при достижении максимальной нагрузки при $p_e = 0,71$ МПа происходит некоторое снижение до значений $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1155$ ppm. Применение ПГ в значительной мере увеличивает объемное содержание $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ. Так, при работе по ГДП при $p_e = 0,13$ МПа $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 420$ ppm, что выше ДП на 52,7%. При максимальной нагрузке $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1570$ ppm, что выше ДП на 26,4%. Применение же РОГ на ГД позволяет снизить объемное содержание $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ. Так, при $p_e = 0,13$ МПа и РОГ в размере 40% $r_{\text{NOx max}} = 220$ ppm, что ниже на 47,6% газодизельного и на 20,0% дизельного процессов. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа и 20%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 810$ ppm, что ниже на 48,4% газодизельного и на 29,9% дизельного процессов. Применение МТЭ и ЭТЭ позволяет также значительно снизить объемное содержание $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ (кроме малых нагрузок ($p_e = 0,13$ МПа) при теоретических исследованиях дизеля на МТЭ). Так, при исследованиях дизеля на МТЭ при $p_e = 0,13$ МПа соответствует содержанию $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 285$ ppm, что на 3,6% больше ДП. Но уже при максимальных значениях нагрузки $p_e = 0,71$ МПа использование МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ к 820 ppm, что меньше на 29,0% ДП.

При теоретических исследованиях дизеля на ЭТЭ при $p_e = 0,13$ МПа $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 260$ ppm, что меньше на 5,5% ДП. При максимальном значении нагрузки $p_e = 0,71$ МПа применение ЭТЭ приводит значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ к 750 ppm, что также меньше на 35,1% ДП.

На рисунке 2.8, б изображены графики теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля 4Ч11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах работы на установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$.

Анализируя кривые, представленные на рисунке 2.8, б, необходимо отметить, что в основном при повышении нагрузки (кроме ДП и ГДП на максимальных нагрузках, $p_e > 0,64 \text{ МПа}$) наблюдается их рост. При теоретических исследованиях дизеля по ДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ составляет 305 ppm, максимальные же значения наблюдаются при $p_e = 0,58 \text{ МПа}$ и составляют $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1390 \text{ ppm}$, а при достижении максимальной нагрузки при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ происходит некоторое снижение до значений $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1360 \text{ ppm}$. Применение ПГ в значительной мере увеличивает значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ. При теоретических исследованиях дизеля по ГДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 525 \text{ ppm}$, что выше ДП на 72,1%. При максимальной нагрузке $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1680 \text{ ppm}$, что выше ДП на 23,5%. Применение же РОГ на ГДП позволяет снизить значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ. При $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ и РОГ, равной 40%, $r_{\text{NOx max}} = 240 \text{ ppm}$, что ниже в 2,2 раза газодизельного и на 21,3% дизельного процессов. При максимальной нагрузке $p_e = 0,69 \text{ МПа}$ и 20%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 965 \text{ ppm}$, что ниже на 42,9% газодизельного и на 29,6% дизельного процессов. Применение МТЭ и ЭТЭ позволяет также значительно снизить объемное содержание $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ. При теоретических исследованиях дизеля на МТЭ при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, ттеорф}_b} = 295 \text{ ppm}$, что меньше на 3,3% ДП. А при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ использование МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ к 885 ppm, что меньше на 34,9% ДП. При теоретических исследованиях дизеля на ЭТЭ при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, ттеорф}_b} = 285 \text{ ppm}$, что меньше на 6,6% ДП. При $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ применение ЭТЭ приводит значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ к 770 ppm, что также на 43,4% ниже ДП.

На рисунке 2.8, в представлении результаты теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах работы на установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальной частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$. Анализируя кривые теоретических расчетов объемного содержания $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля необходимо отметить, что в основном при повышении нагрузки (кроме ДП и ГДП на максимальных нагрузках, $p_e > 0,64 \text{ МПа}$) наблюдается их рост. При теоретических исследованиях дизеля по ДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ составляет 315 ppm, максимальные же значения наблюдаются при $p_e = 0,64 \text{ МПа}$ и составляют $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1390 \text{ ppm}$, а при достижении максимальной нагрузки при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ происходит некоторое снижение до значений $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1310 \text{ ppm}$. Применение ПГ в значительной мере увеличивает значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ. При теоретических исследованиях дизеля по ГДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 515 \text{ ppm}$, что выше ДП на 63,5%. При максимальной нагрузке $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1660 \text{ ppm}$, что выше ДП на 26,7%. Применение же РОГ на ГДП позволяет снизить значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ. При $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ и РОГ, равной 40%, $r_{\text{NOx max}} = 250 \text{ ppm}$, что ниже в 2,1 раза газодизельного и на 20,6% дизельного процессов. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ и 20%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 950 \text{ ppm}$, что ниже на 42,8% газодизельного и на 27,95% дизельного процессов. Применение МТЭ и ЭТЭ позволяет также значительно снизить объемное содержание $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ в ОГ. При теоретических исследованиях дизеля на МТЭ при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 295 \text{ ppm}$, что меньше на 6,4% ДП. А уже при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ использование МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ к 920 ppm, что меньше на 29,8% ДП. При теоретических исследованиях дизеля на ЭТЭ при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 285 \text{ ppm}$, что меньше на 9,5% ДП. При $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ применение ЭТЭ приводит значения $r_{\text{NOx, теор. ф}_b}$ к 770 ppm, что также на 41,2% ниже ДП.

На рисунке 2.8, г представлены результаты теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NOx, теор. фб}}$ в ОГ дизеля 4Ч11,0/12,5 на различных нагрузочных режимах работы на установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$.

Анализируя кривые $r_{\text{NOx, теор. фб}}$ в ОГ дизеля необходимо отметить, что в основном при повышении нагрузки (кроме ДП и ГДП на максимальных нагрузках, $p_e > 0,64 - 0,69 \text{ МПа}$) наблюдается их рост. При работе по ДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. фб}} = 345 \text{ ppm}$, максимальные же значения наблюдаются при $p_e = 0,64 \text{ МПа}$ и составляют $r_{\text{NOx, теор. фб}} = 1515 \text{ ppm}$, а при достижении максимальной нагрузки при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ происходит некоторое снижение до значений $r_{\text{NOx, теор. фб}} = 1450 \text{ ppm}$. Применение ПГ в значительной мере увеличивает значения $r_{\text{NOx, теор. фб}}$ в ОГ. При теоретических исследованиях дизеля по ГДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. фб}} = 630 \text{ ppm}$, что выше ДП на 82,6%. При максимальной нагрузке $r_{\text{NOx, теор. фб}} = 1840 \text{ ppm}$, что выше ДП на 26,9%. Применение же РОГ на ГДП позволяет снизить значения $r_{\text{NOx, теор. фб}}$ в ОГ. При $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ и РОГ, равной 40%, $r_{\text{NOx max}} = 295 \text{ ppm}$, что ниже в 2,1 раза газодизельного и на 14,5% дизельного процессов. При максимальной нагрузке $p_e = 0,69 \text{ МПа}$ и 20%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx, теор. фб}} = 1165 \text{ ppm}$, что ниже на 37,0% газодизельного и на 21,3% дизельного процессов. Применение МТЭ и ЭТЭ позволяет также значительно снизить объемное содержание $r_{\text{NOx, теор. фб}}$ в ОГ. При теоретических исследованиях дизеля на МТЭ при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. фб}} = 305 \text{ ppm}$, что меньше на 11,6% ДП. А при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ использование МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx, теор. фб}}$ к 1050 ppm, что меньше на 27,6% ДП. При теоретических исследованиях дизеля на ЭТЭ при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx, теор. фб}} = 295 \text{ ppm}$, что меньше на 14,5% ДП. При $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ применение ЭТЭ приводит значения $r_{\text{NOx, теор. фб}}$ к 880 ppm, что также на 39,3% ниже ДП.

На рисунке 2.9, а представлены результаты теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля 4Ч11,0/12,5 в зависимости от изменения n при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$.

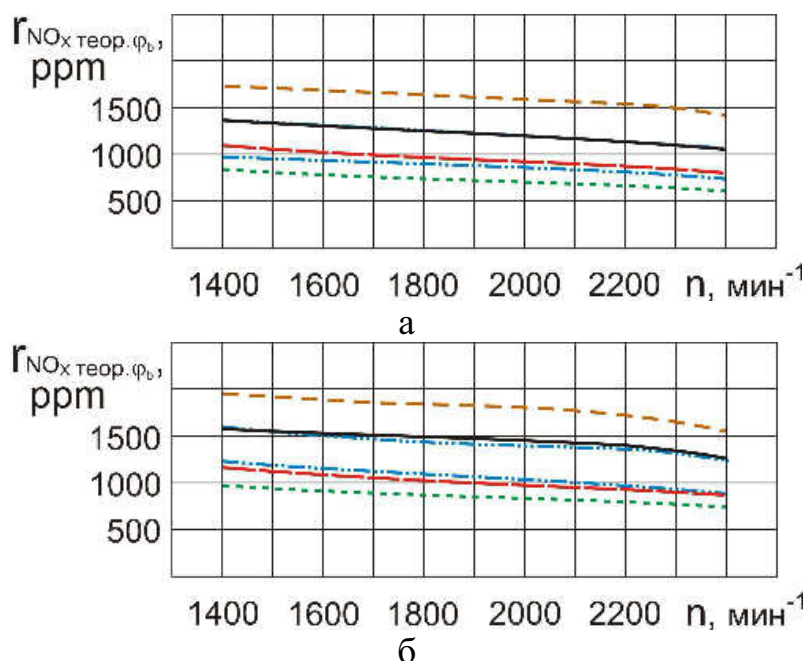


Рисунок 2.9 - Результаты теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля 4Ч11,0/12,5 в зависимости от изменения n :

а – $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б – $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$; ———— – ДП; - - - - - ГДП;
 – ГДП с РОГ 10%; - · - · - ГДП с РОГ 20%;
 - - - - - ЭТЭ; - - - - - МТЭ

Из графиков видно, что теоретические значения объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ уменьшаются с ростом частоты вращения. При теоретических исследованиях дизеля по ДП $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ снижается с 1365 ppm при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 1050 ppm при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, т.е. на 23,1%. При теоретических исследованиях дизеля по ГДП $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ снижается с 1790 ppm при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 1420 ppm при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 20,7%. Сравнивая значения с ДП видно, что применение ПГ значительно увеличивает содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля. Применение же РОГ позволяет устранить в некоторой степени этот недостаток и снизить содержание NO_x . Применение РОГ, равной 10%, в интервале изменения n от 1400 до 2400 мин^{-1} приводит к снижению объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ от

23,7 до 26,1%, а применение 20%-ной РОГ в этом же диапазоне снижает $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ от 47,2 до 48,2% по отношению к чисто ГДП. При работе дизеля на МТЭ $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ снижается с 1070 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 790 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 21,6 до 24,8%. При теоретических исследованиях дизеля на ЭТЭ $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ уменьшается от 810 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 570 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 40,7 до 45,7%.

На рисунке 2.9, б представлены результаты теоретических исследований объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения n при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

Анализируя графики, необходимо отметить, что теоретические значения объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ уменьшаются с ростом частоты вращения. При теоретических исследованиях дизеля по ДП $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ снижается с 1575 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 1260 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, т.е. на 20,0%. При теоретических исследованиях дизеля по ГДП $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ снижается с 1950 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 1575 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 19,2%. Сравнивая значения с ДП, видно, что применение ПГ значительно увеличивает содержание $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ в ОГ дизеля. Применение же РОГ позволяет устранить в некоторой степени этот недостаток и снизить содержание NO_x . Применение РОГ в размере 10% в интервале изменения n от 1400 до 2400 мин^{-1} приводит к снижению объемного содержания $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ от 19,2 до 20,6%, а применение 20%-ной РОГ в этом же диапазоне снижает $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ от 35,4 до 46,7% по отношению к чисто ГДП. При работе дизеля на МТЭ $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ снижается с 1155 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 840 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 26,7 до 33,3%. При теоретических исследованиях дизеля на ЭТЭ $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b}$ уменьшается от 945 ppm при

$n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 685 ppm при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 40,0 до 45,6%.

2.5. Основные результаты и выводы по второй главе

В результате рассмотрения теоретических предпосылок снижения содержания оксидов азота в дизеле путем применения ПГ и СТЭ можно сделать следующие **выводы**:

1. На основании исследований закономерностей формирования оксидов азота рассмотрены механизмы их химических процессов образования при работе дизеля на ПГ и СТЭ.

2. С учетом химических процессов формирования NO_x определены реакции, дающие наиболее весомый вклад в общий процесс образования оксидов азота в ЦД, работающего на ПГ и СТЭ.

3. С увеличением числа промежуточных реакций растет число констант скоростей прямых и обратных реакций, обычно задаваемых. При выборе этих констант проблемой является их неоднозначность: их значения зависят от условий, положенных в основу их определения. В связи с этим данные константы, а также энергия активации не всегда однозначно связаны с механизмом реакции. Число работ, так или иначе связанных с определением констант скоростей реакций, насчитывает не одну тысячу наименований, и этот поток литературы постоянно увеличивается. А поскольку значения констант скоростей реакций должны быть еще и максимально приближены не только к условиям горения топлива в КС дизеля, но и соответствовать принятому механизму образования NO_x , поэтому нами предложена модель расчета скоростей реакций образования оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ.

4. С учетом предложенных механизмов химических процессов и модели расчета скоростей реакций образования оксидов азота разработана математическая модель, позволяющая рассчитать объемное содержание оксидов азота в широком диапазоне режимов работы дизелей на ПГ и СТЭ, что допускает

без дорогостоящих экспериментальных исследований оценить влияние альтернативных топлив на их экологические характеристики.

5. Представлены результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на дизельном топливе, ПГ, ПГ с различными степенями РОГ, МТЭ и ЭТЭ.

Результаты теоретических исследований максимального объемного содержания оксидов азота в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$): ДП - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1740 \text{ ppm}$; ГДП - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 2230 \text{ ppm}$ (увеличение на 28,2%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1740 \text{ ppm}$ (соответствует ДП); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1190 \text{ ppm}$ (снижение на 31,6%); МТЭ - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1160 \text{ ppm}$ (снижение на 33,3%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 920 \text{ ppm}$ (снижение на 47,1%).

Результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$) при угле п.к.в., соответствующем открытию выпускного клапана: ДП - $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1160 \text{ ppm}$; ГДП - $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1530 \text{ ppm}$ (увеличение на 31,9%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 1160 \text{ ppm}$ (соответствует ДП); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 790 \text{ ppm}$ (снижение на 31,9%); МТЭ - $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 815 \text{ ppm}$ (снижение на 29,7%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, теор. ф}_b} = 690 \text{ ppm}$ (снижение на 40,5%).

Результаты теоретических исследований максимального объемного содержания оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$): ДП - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1820 \text{ ppm}$; ГДП - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 2350 \text{ ppm}$ (увеличение на 29,1%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1810 \text{ ppm}$ (снижение на 0,6%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1270 \text{ ppm}$ (снижение на 30,2%); МТЭ - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1250 \text{ ppm}$ (снижение на 31,3%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, теор. max}} = 1020 \text{ ppm}$ (снижение на 44,0%).

Результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$), при угле п.к.в., соответствующем открытию выпускного клапана: ДП - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 1370 \text{ ppm}$; ГДП - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 1690 \text{ ppm}$ (увеличение на 23,4%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 1370 \text{ ppm}$ (соответствует ДП); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 965 \text{ ppm}$ (снижение на 29,6%); МТЭ - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 885 \text{ ppm}$ (снижение на 35,4%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 770 \text{ ppm}$ (снижение на 43,8%).

Результаты теоретических исследований максимального объемного содержания оксидов азота в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$): ДП - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 1900 \text{ ppm}$; ГДП - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 2500 \text{ ppm}$ (увеличение на 31,6%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 1880 \text{ ppm}$ (снижение на 1,1%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 1330 \text{ ppm}$ (снижение на 30,0%); МТЭ - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 1250 \text{ ppm}$ (снижение на 34,2%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 1050 \text{ ppm}$ (снижение на 44,7%).

Результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$) при угле п.к.в., соответствующем открытию выпускного клапана: ДП - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 1390 \text{ ppm}$; ГДП - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 1750 \text{ ppm}$ (увеличение на 25,9%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 1370 \text{ ppm}$ (снижение на 1,4%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 950 \text{ ppm}$ (снижение на 31,7%); МТЭ - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 900 \text{ ppm}$ (снижение на 35,3%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, теор.}\phi_b} = 770 \text{ ppm}$ (снижение на 44,6%).

Результаты теоретических исследований максимального объемного содержания оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$): ДП - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 2070 \text{ ppm}$; ГДП - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 2640 \text{ ppm}$ (увеличение на 27,5%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, теор.}\max} = 2045 \text{ ppm}$ (снижение на 1,2%);

ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. max}} = 1440$ ppm (снижение на 30,4%); МТЭ - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. max}} = 1350$ ppm (снижение на 34,8%); ЭТЭ - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. max}} = 1100$ ppm (снижение на 46,9%).

Результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$), при угле п.к.в., соответствующем открытию выпускного клапана: ДП - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b} = 1480$ ppm; ГДП - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b} = 1850$ ppm (увеличение на 25,0%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b} = 1510$ ppm (увеличение на 2,0%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b} = 1165$ ppm (снижение на 21,3%); МТЭ - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b} = 1045$ ppm (снижение на 29,4%); ЭТЭ - $r_{\text{NO}_x, \text{теор. ф}_b} = 880$ ppm (снижение на 40,6%).

6. Представленные в пункте 5 выводов результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на ДТ, ПГ, ПГ с различными степенями РОГ и СТЭ позволяют оценить влияние наиболее токсичного компонента ОГ дизелей NO_x на различных регулировочных, нагрузочных и скоростных режимах работы, а также в дальнейшем провести экспериментальные исследования и подтвердить либо опровергнуть предложенную теоретическую модель.

3 РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ И МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЯЕМЫХ ТОПЛИВ В ДИЗЕЛЕ

3.1 Объект исследований

Для выполнения поставленных целей и задач, в качестве объекта исследований был выбран четырехтактный четырехцилиндровый дизельный двигатель жидкостного охлаждения размерности 4Ч 11,5/12,0 с неразделенной КС в поршне типа ЦНИДИ и непосредственным впрыскиванием топлива.

При стендовых испытаниях дизеля использовалось: дизельное топливо марки Л по ГОСТ 305-82, ГОСТ 305-2013 «Топливо дизельное. Технические условия»; моторное масло М-10-Г₂ по ГОСТ 17479.1-85 «Обозначение нефтепродуктов»; сжатый природный газ в баллонах по ГОСТ 27577-2000 «Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия» (таблица 3.1); метанол технический по ГОСТ 2222-95 «Метанол технический синтетический» (таблица 3.2); спирт этиловый по ГОСТ 5962-2013 «Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья. Технические условия» (таблица 3.3) [410-414].

Таблица 3.1 - Физико-химические показатели
природного газа по ГОСТ 27577-2000

Наименование показателя	Значение
Низшая теплота сгорания, объемная, кДж/м ³ , не менее	31800
Концентрация паров воды, мг/м ³ , не более	9,0
Объемная доля кислорода, %, не более	1,0
Суммарная объемная доля негорючих компонентов, %, не более	7,0
Масса механических примесей в 1м ³ , мг, не более	1,0
Концентрация меркаптановой серы, г/м ³ , не более	0,036
Концентрация сероводорода, г/м ³ , не более	0,02
Расчетное октановое число (по моторному методу), не менее	105
Относительная плотность к воздуху	0,55-0,70

Таблица 3.2 – Физико-химические показатели метанола по ГОСТ 2222-95

Наименование показателя	Значение
Внешний вид	Бесцветная прозрачная жидкость без нерастворимых примесей
Массовая доля этилового спирта, %, не более	0,01
Плотность при 20°С, г/см ³	0,791–0,792
Массовая доля нелетучего остатка после испарения, %, не более	0,001
Температурные пределы: - предел кипения, °С - 99% продукта перегоняется в пределах, °С, не более	64,0-65,5 0,8
Массовая доля хлора, %, не более	0,0001
Массовая доля аммиака и аминосоединений в пересчёте на аммиак, %, не более	0,00001
Испытания с перманганатом калия, мин, не менее	60
Массовая доля серы, %, не более	0,0001
Массовая доля летучих соединений железа в пересчёте на железо, %, не более	0,00001
Массовая доля альдегдов и кетонов в пересчёте на ацетон, %, не более	0,003
Массовая доля свободных кислот в пересчёте на муравьиную кислоту, %, не более	0,0015
Массовая доля воды, %, не более	0,05

Таблица 3.3 – Физико-химические показатели этилового ректифицированного спирта высшей очистки по ГОСТ 5962-2013

Наименование показателя	Значение
Внешний вид	Прозрачная жидкость без посторонних частиц
Цвет	Бесцветная жидкость
Объемная доля спирта этилового, %, не менее	96,2
Проба на чистоту с серной кислотой	Выдерживает
Проба на окисляемость, мин, при 20°С, не менее	15
Массовая концентрация уксусного альдегида в пересчете на безводный спирт, мг/дм ³ , не более	4

Продолжение таблицы 3.3

Массовая концентрация сивушного масла (1-пропанол, 2-пропанол, изобутиловый спирт, 1-бутанол и изоамиловый спирт) в пересчете на безводный спирт, мг/дм ³ , не более	6
Массовая концентрация сложных эфиров (метилацетат, этилацетат) в пересчете на безводный спирт, мг/дм ³ , не более	13
Объемная доля метилового спирта в пересчете на безводный спирт, %, не более	0,03
Массовая концентрация свободных кислот (без CO ₂) в пересчете на безводный спирт, мг/дм ³ , не более	15
Массовая концентрация сухого остатка в пересчете на безводный спирт, мг/дм ³ , не более	Не нормируется
Массовая концентрация летучих азотистых оснований, в пересчете на азот, в 1 дм ³ , безводного спирта, мг, не более	Не нормируется

3.2 Разработка программы проведения исследований рабочего процесса дизеля на ПГ и СТЭ

Согласно поставленной цели и задач исследования необходимо при проведении экспериментальной части снизить содержание NO_x в ОГ дизеля путем применения ПГ и СТЭ. Сравнительный метод при проведении экспериментальных исследований являлся основным в принятой программе, структурная схема которой изображена на рисунке 3.1.

Стендовые испытания проводились в несколько этапов. Первый этап включал в себя разработку и оптимизацию состава топлива и систем топливоподачи при работе дизеля на ПГ и СТЭ.

На втором этапе при оптимизированной системе топливоподачи проводилось снятие всего объема нагрузочных и скоростных характеристик на исследуемых установочных у.о.в.т. с последующей их оптимизацией. Определялись мощностные и экономические показатели, а также показатели токсичности и дымности ОГ при работе на дизельном топливе, ПГ и СТЭ.

Третий этап включал в себя проведение индицирования процесса сгорания с обработкой индикаторных диаграмм на всех установочных у.о.в.т. при работе по ДП, ГДП, ГДП с РОГ и на СТЭ. При этом было проведено исследование и оптимизация параметров процесса сгорания и характеристик тепловыделения, анализ показателей токсичности и дымности ОГ с определением содержания компонентов для NO_x , CH_x , CO , CO_2 и сажи.

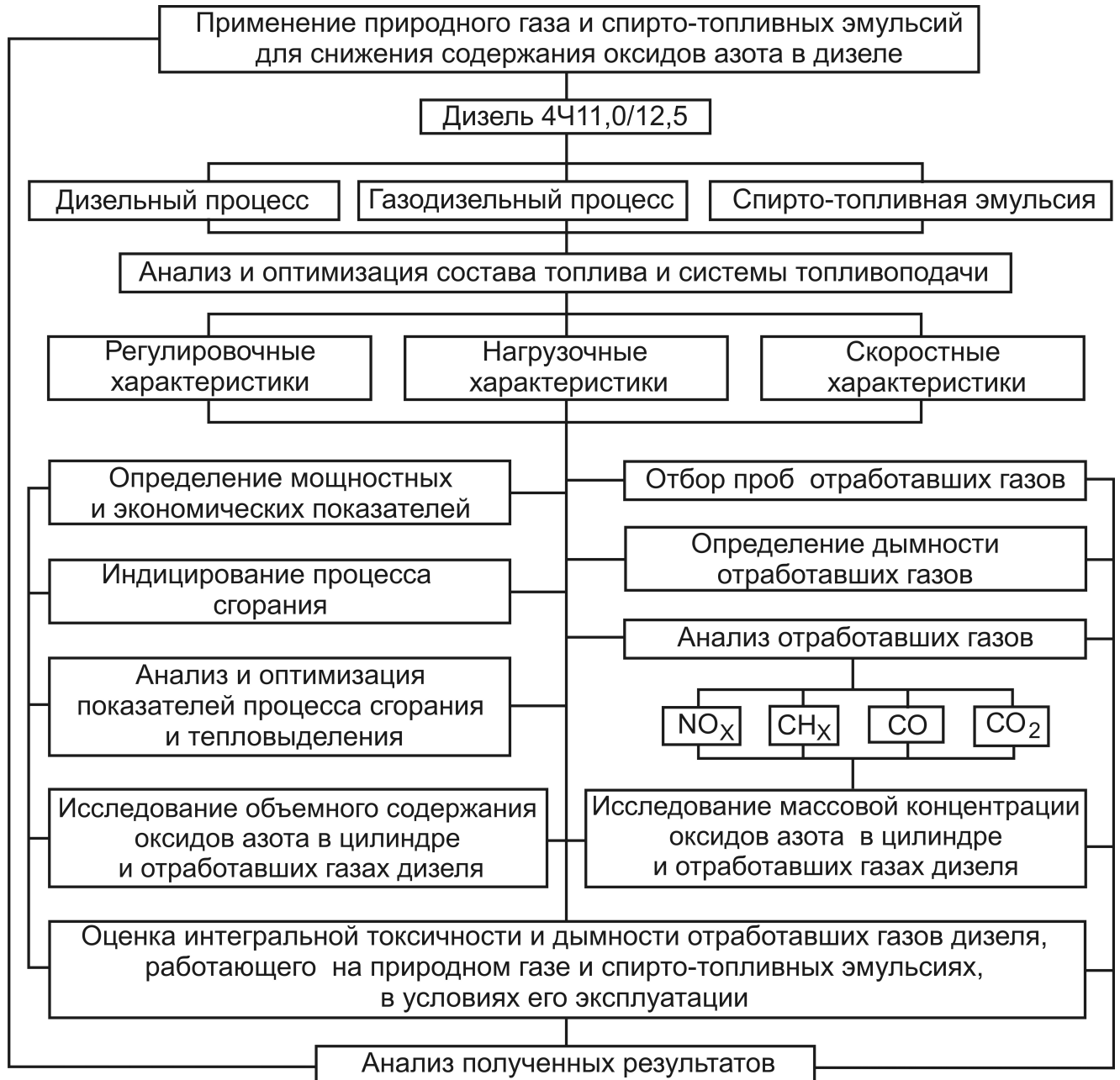


Рисунок 3.1 - Структурная схема программы проведения экспериментальных исследований дизеля

На четвертом этапе, на основании проведенного анализа, предусматривались расчетные мероприятия по исследованию объемного содержания и массовой концентрации NO_x в цилиндре и ОГ дизеля при работе по ДП, ГДП, ГДП с РОГ и на СТЭ.

Проведение экспериментальных исследований, монтаж приборов и оборудования, отбор проб ОГ и их анализ проводился с учетом требований соответствующих ГОСТов и нормативных требований: ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний»; ГОСТ 10578-96 «Насосы топливные дизелей. Общие технические условия»; ГОСТ 10579-88 «Форсунки дизелей. Общие технические условия»; ГОСТ 15888-90 «Аппаратура дизелей топливная. Термины и определения»; ГОСТ ISO 8178-4-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах»; ГОСТ Р 41.49-2003 (Правила ЕЭК ООН № 49) «Единообразные предписания, касающиеся сертификации двигателей с воспламенением от сжатия и двигателей, работающих на природном газе, а также двигателей с принудительным зажиганием, работающих на сжиженном нефтяном газе, и транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия, двигателями, работающими на природном газе, и двигателями с принудительным зажиганием, работающими на сжиженном нефтяном газе, в отношении выбросов вредных веществ»; ГОСТ Р 41.24-2003 (Правила ЕЭК ООН №24) «Единообразные предписания, касающиеся сертификации двигателей с воспламенением от сжатия в отношении дымности; сертификации автотранспортных средств в отношении установки на них двигателей с воспламенением от сжатия, сертифицированных по типу конструкции; сертификации автотранспортных средств с двигателями с воспламенением от сжатия в отношении дымности; измерения мощности двигателей»; ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН №96) «Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями»; ГОСТ 17.2.2.05-97 «Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения выброса вредных веществ с отработавшими газами дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин»; ГОСТ 17.2.2.02-98 «Охрана природы. Ат-

мосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин» [114, 115, 117-122, 415-419].

Принимая во внимание специфику работы дизеля 4Ч11,0/12,5, основные режимы исследований соответствовали номинальному скоростному режиму при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и режиму при максимальном крутящем моменте при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$.

Индицирование рабочего процесса дизеля при работе его по ДП, ГДП, ГДП с РОГ и на СТЭ осуществлялось при сохранении равного значения среднего эффективного давления p_e при каждом исследуемом скоростном режиме. Это же правило обеспечивалось при получении скоростных характеристик (каждой фиксируемой частоте вращения соответствовало одинаковое значение p_e как при работе на дизельном топливе, так и на альтернативном). Значение p_e вычислялось из показаний весового механизма нагрузочного стенда. Параллельно при снятии характеристик выполнялся отбор проб для определения дымности ОГ с газовым анализом и индицирование рабочего процесса.

Перед проведением исследований двигатель проходил обкатку длительностью 60 мото-часов и техобслуживание в соответствии с технической документацией завода-изготовителя. До снятия характеристик дизель прогревался до температуры охлаждающей жидкости, соответствующей $85 - 95^\circ \text{C}$, а температуры топлива и окружающего воздуха соответствовали значениям ГОСТ 18509-88 и технической документации завода-изготовителя.

Значения N_e , G_T , M_k и p_e приводились согласно ГОСТ 18509-88 к стандартным атмосферным условиям, температуре и плотности топлива. После прогрева работа дизеля соответствовала номинальному скоростному режиму (контрольному), при котором происходило определение эффективных показателей, отклонения значений которых более 2% устранялись с последующей проверкой на контрольном режиме. Перед снятием показаний с целью выравнивания температур дизель работал на каждом режиме не менее 5 минут, изменения частоты

вращения не превышали 5 мин^{-1} , увеличение объема КС при монтаже датчика индицирования не превышало 1%.

Замеры показаний при экспериментальных исследованиях проводились в 3-х кратной повторности с усреднением результата с целью снижения погрешности измерений. Точно также проводился отбор проб ОГ газовым анализом и определение дымности. Отбор пробы для определения дымности ОГ проводился с учетом требований ГОСТ Р 41.24-2003 и ГОСТ 17.2.2.02-98.

3.3 Методика исследований свойств СТЭ

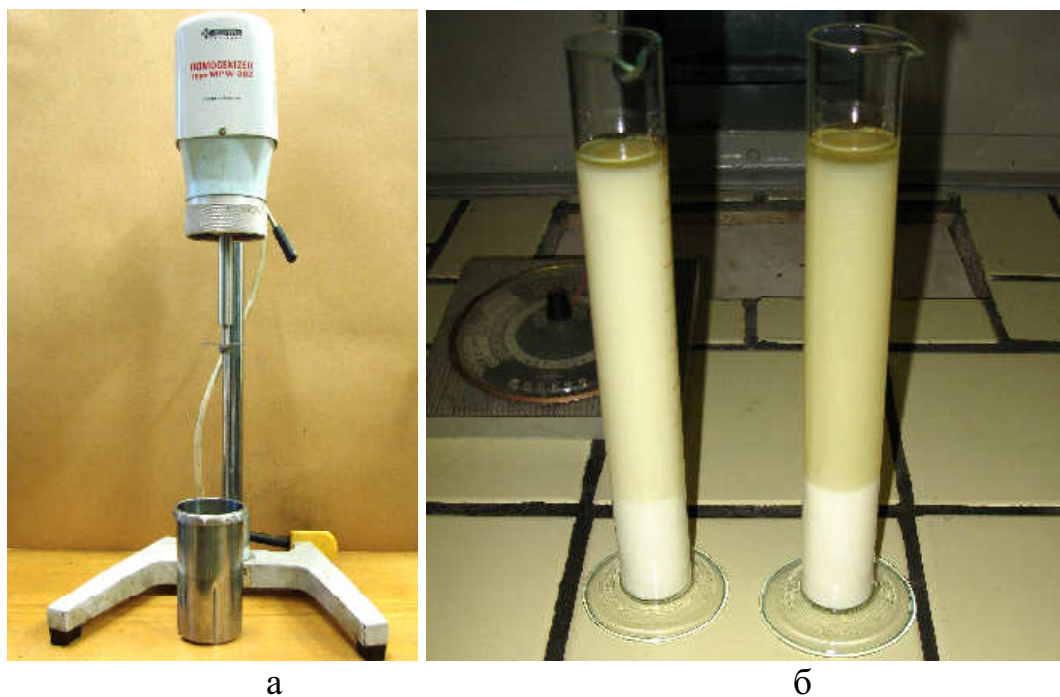
Исследования стабильности СТЭ осуществлялись по методике НПО «Синтез ПАВ», с учетом классических методик [420].

Принимая во внимание, что избежать наличия H_2O в составе спирта в процессе реальной эксплуатации практически довольно сложно из-за его высоких показателей гигроскопичности, кроме того для выполнения условий применения не обезвоженного спирта (сырца) при экспериментальных исследованиях применялся спирт с добавлением воды до 7% по массе.

Для получения эмульсии каждый из компонентов предварительно взвешивался на электронных весах. Соотношение ингредиентов эмульсии выражалось в процентах от общей массы и составляло: спирт - 10, 20, 30, 40 и 50%, присадка - 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0%, вода - 7%, остальное дизельное топливо. Эмульсия каждого состава приготавливалась не менее чем 3 раза, с целью уменьшения погрешностей измерений результат усреднялся. При этом требуемое количество присадки предварительно растворялось в дизельном топливе, после чего добавлялся раствор воды и спирта.

В качестве стабилизирующей присадки был выбран эмульгатор сукцинимид С-5А (моюще-диспергирующая присадка). Эмульсии готовились на гомогенизаторе MPW-302 в течение 2-х минут при частоте вращения вала 2000 мин^{-1} . У каждой готовой эмульсии бралась проба с помощью градуированной пробирки и

анализировалась, в т.ч. на показатели стабильности. Гомогенизатор с приготовленными им СТЭ представлен на рисунке 3.2.



а
б
Рисунок 3.2 - Общий вид гомогенизатора MPW-302 (а)
и приготовленные им СТЭ (б)

Эффективность эмульгатора и присутствие воды в эмульсии оценивались по стабильности смеси к процессам седиментации (способность соответствовать своей начальной концентрации по высоте столба пробы, находящейся в пробирке, характеризующуюся временем накопления высоты концентрированного осадка (отстоя), выраженного в процентном отношении к первоначальной высоте столба) и коалесценции (время, соответствующее полному разделению пробы эмульсии на спиртовую и углеводородную составляющие). При этом емкости со СТЭ герметично закрывались и находились при постоянной температуре. У СТЭ определяли плотность денсиметром и вязкость вискозиметром. По зарегистрированным показаниям выстраивались кривые стабильности СТЭ.

3.4 Методика исследований влияния состава СТЭ на показатели рабочего процесса дизеля

При работе дизеля на СТЭ важным является определение оптимального содержания спирта в смеси. Поскольку применение спирта вызывает увеличение периода задержки воспламенения, и, соответственно, рост жесткости процесса сгорания $dp/d\phi$, то максимально допустимое содержание спирта в смеси определялось по результатам индицирования дизеля при работе на СТЭ различного состава. Основным показателем была величина $dp/d\phi$, предельным значением которой была регистрация на слух чрезмерной жесткости процесса (наличие звонких стуков сходных по характеру с детонацией в бензиновом тепловом двигателе). Оптимальное значение установочного $\Theta_{впр}$ определялось по регулировочной характеристике, для вычерчивания которой снимались нагрузочные характеристики при разных значениях $\Theta_{впр}$ и различного содержания спирта в эмульсии.

Содержание спирта определялось в процентном отношении к массе эмульсии. Концентрация воды в эмульсии с учетом результатов исследований стабильности оставалась постоянной величиной, равной 7% масс. Содержание присадки сукцинимид С-5А выбиралось также с учетом результатов исследований стабильности и соответствовала 0,5% масс.

Смесь приготавливалась заранее с использованием фиксированных значений требуемых ингредиентов. Подача СТЭ осуществлялась через штатную систему топливоподачи после прогрева дизеля на дизельном топливе. Снятие нагрузочных и скоростных параметров дизеля, показателей индицирования, анализ проб ОГ и дымности проводились в полном объеме.

3.5 Особенности экспериментальной установки исследований дизеля на ПГ и СТЭ

Для проведения исследований, подтверждающих возможность применения ПГ и СТЭ для снижения содержания NO_x , был выбран дизель 4Ч 11,0/12,5, общий вид которого изображен на рисунке 3.3, а.

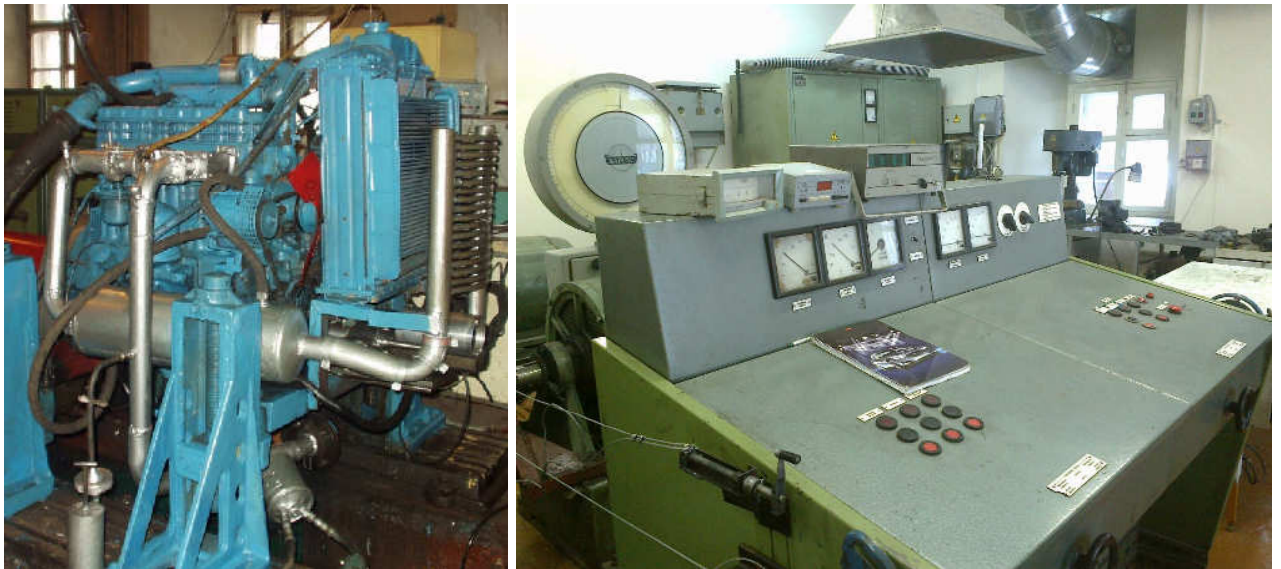


Рисунок 3.3 - Общий вид дизеля 4Ч 11,0/12,5 (а),
установленного на тормозном стенде SAK-N670 (б)

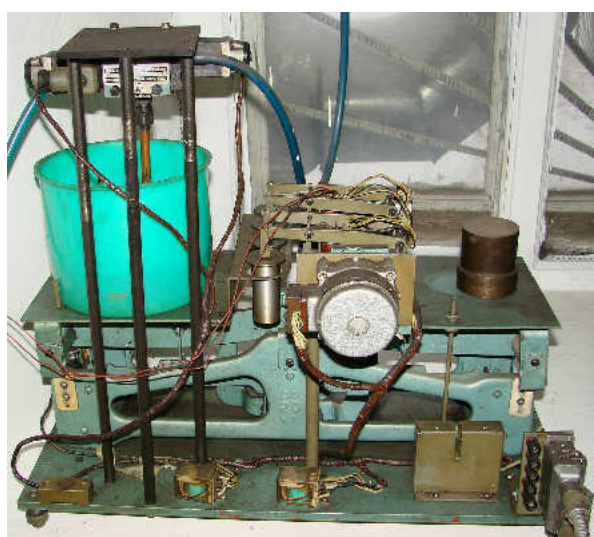
Загрузочным устройством при экспериментальных исследованиях дизеля служил электротормозной стенд SAK – N670 с балансирной маятниковой машиной, пульт управления которого представлен на рисунке 3.3, б.

Двигатель соединялся с балансирной машиной с помощью карданной передачи. Установка снабжалась необходимыми приборами и измерительным оборудованием, основное из которого представлено в таблице 3.4.

Частоту вращения коленчатого вала дизеля измеряли электронным цифровым тахометром ТЦ – 1. Расход основного топлива определяли электронным расходомером АИР – 50 (рисунок 3.4). Время опыта - электронным секундомером, расход газа – газовым расходомером ВК-G16 (рисунок 3.5,а) с системой отсчета на базе счетчика МЭС – 66.

Таблица 3.4 - Основное оборудование и приборы,
используемые при экспериментальных исследованиях

Наименование	Марка, модель	Назначение
Балансирный тормозной стенд	SAK-N670	Измерение крутящего момента
Тахометр	ТЦ-1	Измерение частоты вращения
Расходомер топлива	АИР-50	Расход топлива
Расходомер газа	ВК-G16	Расход газа
Секундомер	Д-1	Время отчета
Расходомер воздуха	РГ-400	Расход воздуха
Счетчик импульсов	МЭС-66	Измерение числа импульсов
Манометр	U-образный	Разрежение и давление
Логомер	М-64	Температура ОГ
Вольтметр	Ф-4202	Температура рециркулируемых газов
Индикатор	МАИ-5А	Давление газов в цилиндре
Стенд	КИ-22205	Регулировки топливного насоса
Стенд	КИ-3333	Регулировка и проверка форсунок
Система газового анализа	АСГА-Т	Определение компонентов ОГ
Дымомер	«BOSCH» EFAW-68A	Определение дымности



а



б

Рисунок 3.4 - Общий вид весового механизма (а)
и электронного расходомера АИР-50 топлива (б)

Количество потребляемого воздуха определяли газовым счетчиком РГ – 400, который устанавливался согласно ГОСТ 18509-88 перед впускным коллектором, и счетчиком импульсов МЭС – 66. С помощью двухступенчатого газового редуктора, расположенного за газовым расходомером, снижали давление ПГ. Здесь же был смонтирован для аварийной блокировки, управляемый с пульта на грузочного стенда, электромагнитный клапан с фильтром.



а

б

Рисунок 3.5 - Вид на счетчик расхода газа ВК-G16 (а) и смеситель-дозатор, установленный на двигателе (б)

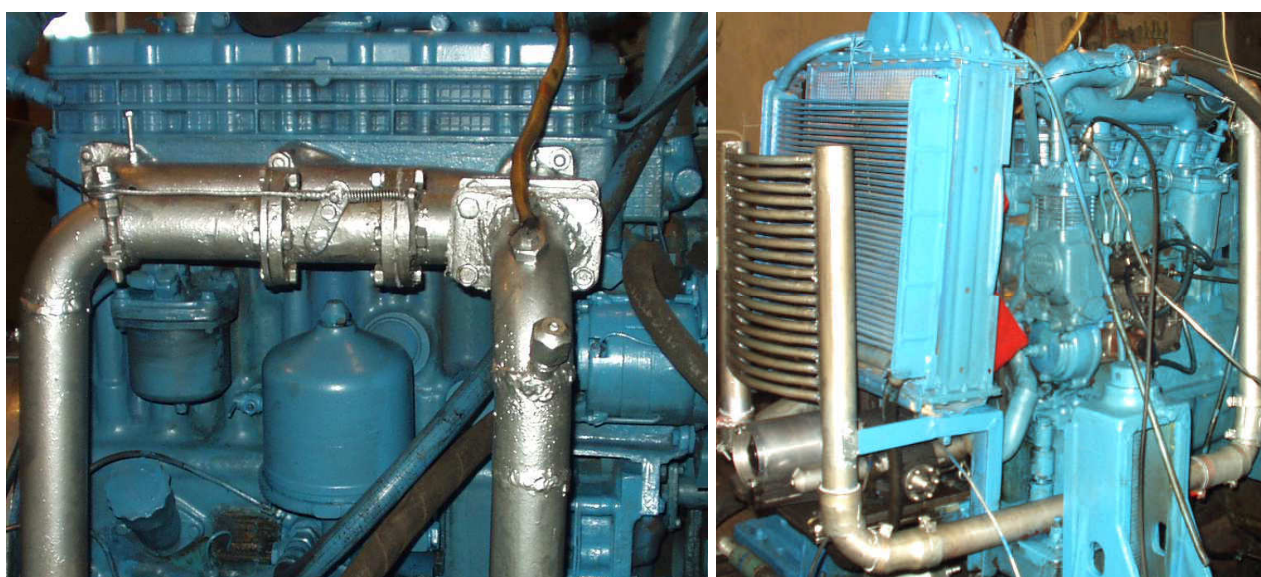
Вид на смеситель-дозатор в установленном состоянии представлен на рисунке 3.5, б. Детали смесителя соединяются с помощью болтовых соединений и уплотняются с помощью прокладок из картона. Кольцевой зазор между корпусом смесителя и диффузором можно регулировать, изменяя толщину прокладок между ними.

Управление степенью РОГ осуществлялось с помощью заслонки (см. рисунок 3.6, а), которая устанавливалась в рециркуляционном трубопроводе, а степень вычислялась по выражению:

$$\rho = \left(\frac{T_s - T_0}{T_p - T_s} \right) / \left(1 + \frac{T_s - T_0}{T_p - T_s} \right), \quad (3.1)$$

где T_s , T_0 , T_p - температуры смеси, окружающего воздуха и рециркулируемых газов во впускной системе дизеля.

Параллельно для контроля степени РОГ ее измерение осуществлялось газовым счетчиком РГ–400. Охлаждали рециркулируемые газы теплообменными аппаратами – жидкостным, работающим на охлаждающей жидкости системы охлаждения дизеля, и воздушным, устанавливаемым спереди масляного радиатора (рисунок 3.6, б).



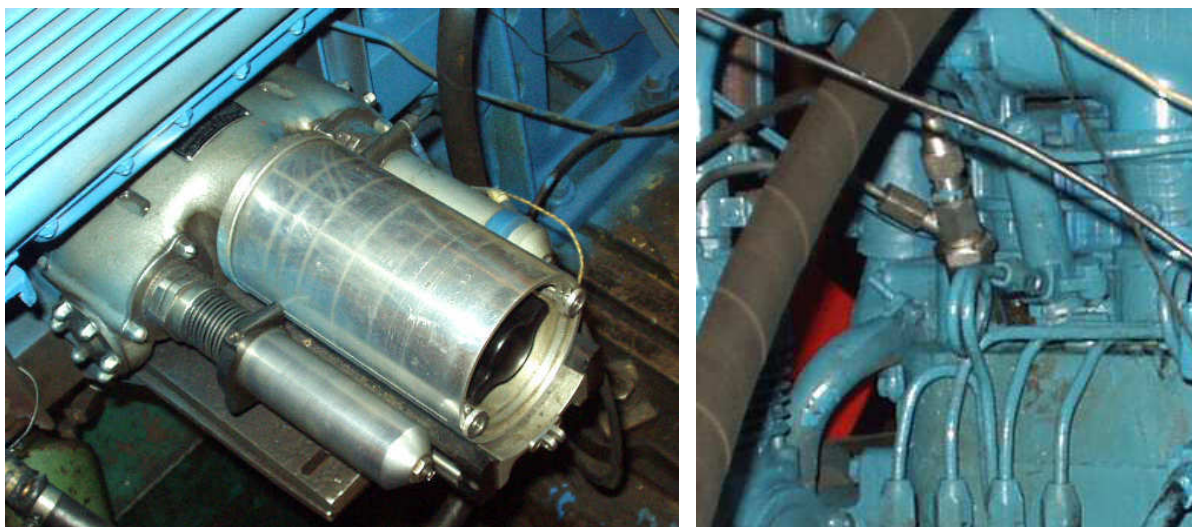
а

б

Рисунок 3.6 - Вид на устройство подачи (а) и теплообменник охлаждения (б) рециркулируемых газов

Индицирование процесса сгорания осуществляли с помощью электропневматического индикатора МАИ–5А с установленным датчиком давления в головке блока 1-го цилиндра (рисунок 3.7).

Записывающий механизм устанавливался перед двигателем на одной оси с коленчатым валом через промежуточную муфту, согласно инструкции к МАИ-5А. Установка отметчика ВМТ проверялась по положению поршня в ВМТ в первом цилиндре и контролировалась по диаграмме сжатия-расширения без подачи топлива. Обработку индикаторных диаграмм проводили с помощью компьютерной программы ЦНИДИ-ЦНИИМ.



а

б

Рисунок 3.7 - Вид на записывающее устройство (а)
и датчик давлений (б) индикатора МАИ-5А

Разряжение во впускном коллекторе, давление рециркулируемых и ОГ измеряли U-образным жидкостным манометром, атмосферное давление окружающего воздуха и влажность - барометром-анероидом и психрометром, температуру топлива и окружающего воздуха – ртутными термометрами. Снятые значения приводили к нормальным атмосферным условиям по ГОСТ 18509-88.

Температуру рециркулируемых и ОГ дизеля замеряли хромель-алюмелевыми термопарами. Вторичными приборами служили логомер М – 64 для измерения ОГ и электронный цифровой вольтметр Ф – 4202 - для рециркулируемых газов.

До начала и после окончания испытаний осуществлялась тарировка весового механизма «Rapido» балансирного маятникового механизма нагрузочного стенда эталонными гирями. При выполнении работ в системе использования газа применялось штатное оборудование автомобиля ЗИЛ-138А на базе прицепа 2ПТС-4 (рисунок 3.8).

Станция представляет собой два комплекта баллонов высокого давления автомобиля ЗИЛ-138А (16 штук), соединенных последовательно по 4 штуки. Баллоны заправляются с помощью крестовины от газопровода высокого давления через гибкие шланги высокого давления. Станция перед заправкой газом проходила не-

обходимое освидетельствование. Присоединение стенда к газовой станции производилось с помощью понижающего редуктора, расположенного на расходном вентиле станции, и гибкого шланга высокого давления. Емкость одного баллона - 50 литров, станции - 800 литров. Рабочее давление 20 МПа.

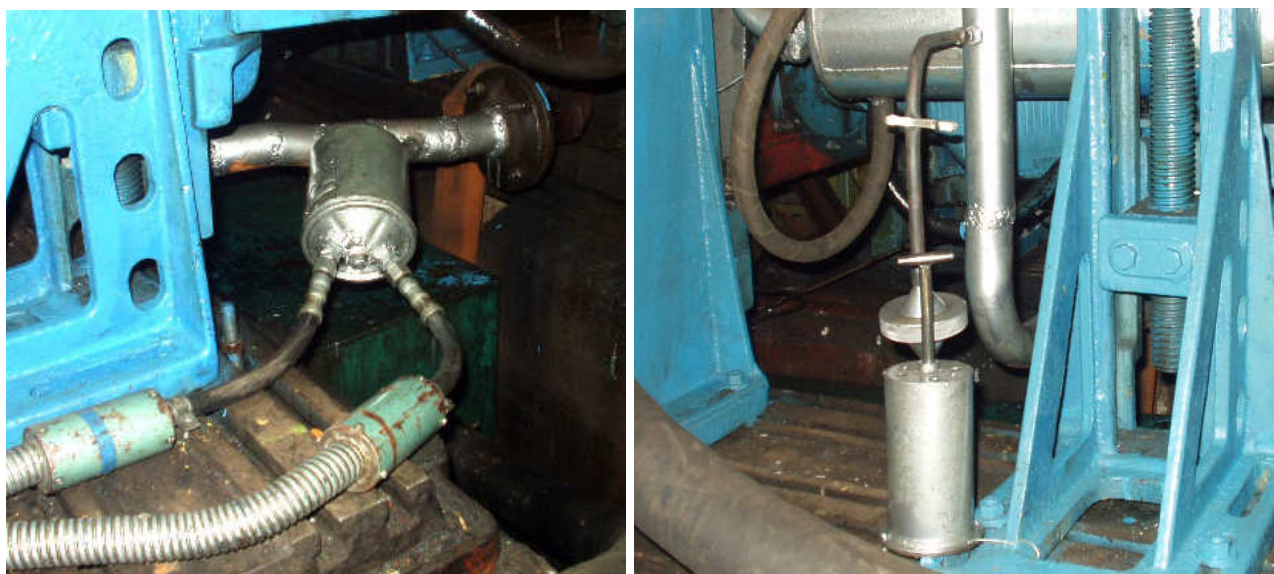


Рисунок 3.8 - Мобильная заправочная станция для ПГ на базе 2ПТС-4



Рисунок 3.9 - Общий вид оборудования газового анализа АСГА – Т

Анализ проб ОГ проводился с помощью автоматической системы газового анализа АСГА-Т производства Смоленского ПО «Аналитприбор». Общий вид на систему газового анализа изображен на рисунке 3.9. Забор пробы ОГ для газового анализа осуществлялся газовыми заборниками из выпускного трубопровода дизеля (рисунок 3.10, а) согласно нормативных требований к системе [419]. Перед началом газоанализа осуществлялся прогрев системы в течение 1,5-2,0 часов, далее проводили калибровку ГИПов поверочными газовыми смесями.



а

б

Рисунок 3.10 - Вид на установленные заборники для отбора проб ОГ для системы АСГА-Т (а) и дымомера «BOSCH - EFAW - 68A» (б)

При определении дымности был применен фильтрационный метод измерения. Почернение фильтра оценивалось по степени его оптического отражения в сравнении с чистым фильтром и измерялось с помощью опико-электрического дымомера BOSCH – EFAW – 68A , изображенного на рисунке 3.10, б.

Регулировку и проверку топливного насоса проводили на бестормозном стенде для испытания топливной аппаратуры КИ – 22205, регулировку и проверку форсунок - на стенде для проверки форсунок КИ – 3333.

3.6 Методика обработки результатов исследований. Ошибки измерений

Исследуемые параметры, зависящие от погрешности, обладают приближенными значениями со степенью приближения, которая характеризуется правильными условиями проведения опыта, выбором приборов и их возможностей. С целью оценки объективности данных результатов исследований проводили подсчет ошибки измерений с определением суммарной погрешности результатов опыта. При этом было сделано допущение о наличии только систематических ошибок, а случайные погрешности исключали, поскольку используемые приборы имели необходимые поверки в лабораториях Госстандарта и поддерживались постоянные условия при проведении эксперимента.

Математическую обработку результатов проводили согласно существующих норм [421, 422]. В сложном уравнении вида $N_e = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ значение абсолютной ошибки соответствует сумме частных, за переменную в каждой из которых принимают один из аргументов:

$$\Delta N = \pm[\Delta N_1(x_1) + \Delta N_2(x_2) + \dots + \Delta N_n(x_n)], \quad (3.2)$$

где N – истинное значение; x_1, x_2, \dots, x_n - результаты измерения параметров.

Относительную ошибку определим по уравнению:

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{[\Delta N_1(x_1) + \Delta N_2(x_2) + \dots + \Delta N_n(x_n)]}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)}. \quad (3.3)$$

После оценки погрешности измерений необходимо определить суммарную ошибку опыта. Для этого использовалось самое неблагоприятное событие, когда все частные ошибки имеют знак «+». При этом порядок определения выглядел следующим образом: сначала проводилась оценка размеров частной предельной погрешности по отдельным элементам измерений, которые входят в опыт, а далее осуществлялся подсчет абсолютных и относительных ошибок измерений.

Относительную погрешность эффективной мощности, определяемую по выражению

$$N_e = \pm \frac{M_k n}{9550}, \quad (3.4)$$

где $M_k = P_T \cdot l$ – показания крутящего момента; P_T - значения тормоза; l - величина длины плеча весового механизма; n - частота вращения,

вычисляли по формуле:

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} = \pm \left(\frac{\Delta P_T}{P_T} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} \right). \quad (3.5)$$

Таблица 3.6 - Предельные ошибки вычислений и измерений

Наименование величины	Предельная абсолютная ошибка	Предельная относительная ошибка
1. Значения тормоза	1 Н	±0,05
2. Частота вращения	2 мин ⁻¹	±0,004
3. Крутящий момент	1 Нм	±0,05
4. Мощность	0,1 кВт	±0,3
5. Среднее эффективное давление	0,01 МПа	±0,05
6. Количество импульсов на счетчике электронного тахометра	2 имп.	±0,05
7. Часовые расходы основного, запального, суммарного топлив	0,01 кг / ч	±0,02
8. Удельный расход топлива	1,1 г / кВт · ч	±0,5
9. Часовой расход воздуха	1,0 кг / ч	±0,1
10. Часовой расход газа	0,02 м ³ / ч	±0,02
11. Коэффициент избытка воздуха	0,01	±2,1
12. Температура ОГ	5° С	±0,022
13. Температура рециркулируемых газов	1° С	±0,01
14. Степень рециркуляции	2%	±0,02
15. Разрежение во впускном трубопроводе	49,05 Па	±0,25
16. Давление ОГ в выпускном трубопроводе	49,05 Па	±2,2
17. Давление окружающего воздуха	0,1 кПа	±0,001
18. Давление масла в главной масляной магистрали	10 кПа	±0,05
19. Температура окружающего воздуха	1° С	±0,06
20. Температура топлива	1° С	±0,06
21. Относительная влажность окружающего воздуха	1%	±0,024
22. Кинематическая вязкость	0,05 сСт	±2,0
23. Цикловая подача	0,001 мл / ц	±0,03

Относительную погрешность основного, дополнительного и суммарного расходов топлива, определяемых по выражениям:

$$G_{\tau} = \frac{g_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}}, \quad G_{\tau\Sigma} = G_{\tau} + G'_{\tau},$$

где $g_{\text{оп}}$ – количество топлива, расходуемое за опыт; $\tau_{\text{оп}}$ – время опыта,

вычисляли по формулам:

$$\frac{\Delta G_{\tau}}{G_{\tau}} = \pm \left(\frac{\Delta g_{\text{оп}}}{g_{\text{оп}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}} \right), \quad (3.6)$$

$$\frac{\Delta G_{\tau\Sigma}}{G_{\tau\Sigma}} = \pm \frac{\Delta G_{\tau} + \Delta G'_{\tau}}{G_{\tau}} = \pm \left(\frac{\Delta g_{\text{оп}}}{g_{\text{оп}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}} \right) \cdot \frac{G_{\tau}}{G_{\tau\Sigma}} \pm \left(\frac{\Delta g'_{\text{оп}}}{g_{\text{оп}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}} \right) \cdot \frac{G'_{\tau}}{G_{\tau\Sigma}}. \quad (3.7)$$

Относительную погрешность удельного эффективного расхода топлива, определяемого по выражению

$$g_e = \frac{1000 \cdot G_{\tau}}{N_e},$$

вычисляли по формуле:

$$\frac{\Delta g_e}{g_e} = \pm \left(\frac{\Delta G_{\tau\Sigma}}{G_{\tau\Sigma}} + \frac{\Delta N_e}{N_e} \right) = \pm \left(\frac{\Delta g_{\text{оп}}}{g_{\text{оп}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}} \right) \cdot \frac{G_{\tau}}{G_{\tau\Sigma}} \pm \left(\frac{\Delta g'_{\text{оп}}}{g_{\text{оп}}} + \frac{\Delta \tau_{\text{оп}}}{\tau_{\text{оп}}} \right) \cdot \frac{G'_{\tau}}{G_{\tau\Sigma}} + \frac{\Delta N_e}{N_e}. \quad (3.8)$$

Таким же образом осуществлялась оценка погрешностей других измеряемых параметров. Значения предельных ошибок вычислений и измерений отражены в таблице 3.5.

3.5. Основные результаты и выводы по третьей главе

В результате разработки научно-методической программы и методик исследований применяемых альтернативных топлив в дизеле можно сделать следующие **выводы**:

1. Для выполнения поставленных целей и задач на основании представленного материала в качестве объекта исследований был выбран четырехтактный четырехцилиндровый дизель жидкостного охлаждения размерности 4Ч 11,5/12,0 с неразделенной КС в поршне типа ЦНИДИ и непосредственным впрыскиванием топлива.

2. Дизели с установленной в них КС типа ЦНИДИ содержат в ОГ существенное содержание токсичных компонентов, в первую очередь оксидов

азота, что говорит о необходимости разработки и оптимизации для них экологических альтернативных топлив, таких как ПГ и СТЭ, и соответствующих им систем топливоподачи.

3. Для дизеля с камерой сгорания типа ЦНИДИ, работающего на ПГ и СТЭ, при оптимизированной соответствующей системе топливоподачи необходимо проведение сравнительных экспериментальных исследований, включающих в себя весь комплекс регулировочных, нагрузочных и скоростных характеристик с определением мощностных и экономических показателей, показателей токсичности и дымности ОГ, параметров процесса сгорания и тепловыделения. При этом необходимо проведение индицирования процесса сгорания с обработкой индикаторных диаграмм на всех исследуемых установочных у.о.в.т. как при работе на ДТ, так и на ПГ и СТЭ, исследование и оптимизация параметров процесса сгорания и характеристик тепловыделения, анализ показателей токсичности и дымности ОГ с определением содержания компонентов для NO_x , CH_x , CO , CO_2 и сажи.

4. Необходимо проведение исследований объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в цилиндре и ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, что позволит оценить верификацию сочетания выполненных во второй главе теоретических исследований объемного содержания оксидов азота с результатами экспериментальных исследований.

5. Для дизеля с камерой сгорания типа ЦНИДИ, работающего на ПГ и СТЭ необходимо оценить влияние режимов его работы с определением оптимальных значений на эффективные показатели, характеристики сгорания и тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота, токсичность и дымности ОГ и разработать рекомендации по снижению содержания NO_x в ОГ обеспечивая тем самым улучшенные экологические показатели и экономя нефтяное моторное топливо.

6. Необходимо проведение исследований по оценке интегральной токсичности ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации с учетом действующих нормативов выбросов токсичности и дымности ОГ дизелей.

4 СНИЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЕ ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ГАЗА И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Разработка модификации дизеля для работы на ПГ и СТЭ подразумевает в первую очередь снижение NO_x при сохранении мощностных характеристик дизеля [423-457].

4.1 Результаты экспериментальных исследований свойств альтернативных экологических энергоносителей для дизелей

С целью разработки, определения и оптимизации состава экологических энергоносителей для дизеля 4Ч11,0/12,5 проведены его испытания при работе на дизельном топливе, ПГ, МТЭ и ЭТЭ [423-457].

Чтобы получить наибольший эффект от спиртовой эмульсии, как экологического энергоносителя, необходимо исследовать её физико-химические свойства, их влияние на рабочие процессы и выброс токсичных компонентов с ОГ дизеля. Спиртовая эмульсия - это дисперсная система, образованная двумя взаимно нерастворимыми жидкостями, которыми являются, с одной стороны, этиловый или метиловый спирт и вода, с другой - дизельное топливо и присадки. Спиртовая эмульсия – это нестабильная система, стремящаяся постоянно вернуться в начальное (разделение по фазам) положение, которое, в свою очередь, определяется уже стабильностью. Стабильность, т.е. время от момента приготовления эмульсии до появления слоев с различной концентрацией (седиментацией), зависит, в первую очередь, от физических свойств составляющих компонентов эмульсии.

Поскольку одним из основных свойств СТЭ, определяющим применимость её в качестве экологического энергоносителя для двигателя, является стабильность, то эмульсия обязана характеризоваться достаточной стабильностью продолжительный период времени в случае ее приготовления перед заправкой топливного бака дизеля. Если же дизель работает на эмульсии, подготовка которой осу-

ществляется в его топливоподающей аппаратуре, то тогда требования к стабильности характеризуются лишь временем, необходимым для осуществления подачи готовой спиртовой смеси в КС. Этот фактор можно объяснить присутствием в топливоподающей аппаратуре зон, где высококонцентрированная эмульсия вида «масло в воде» скапливается в виде геля. Присадки целенаправленного действия, вводимые в топливо, должны обеспечивать необходимые показатели стабильности получаемых эмульсий. Содержание присадки при этом не должно быть больше 2–3% , поскольку это приводит к серьезному повышению стоимости экологического энергоносителя. Кроме того, присадки должны отвечать следующим требованиям: полностью сгорать в КС дизеля с минимальным образованием отложений, не снижать качества топлива, повышать показатели стабильности эмульсии, хорошо растворяться в компонентах топлива, обладать устойчивостью, не быть излишне летучими и обладать способностью сохранения в топливе при разных условиях эксплуатации. Этим требованиям достаточно хорошо отвечает моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С–5А (базовый компонент моторных масел). Сукцинимид С–5А - это концентрат высокомолекулярного алкениламида янтарной кислоты в масле [54].

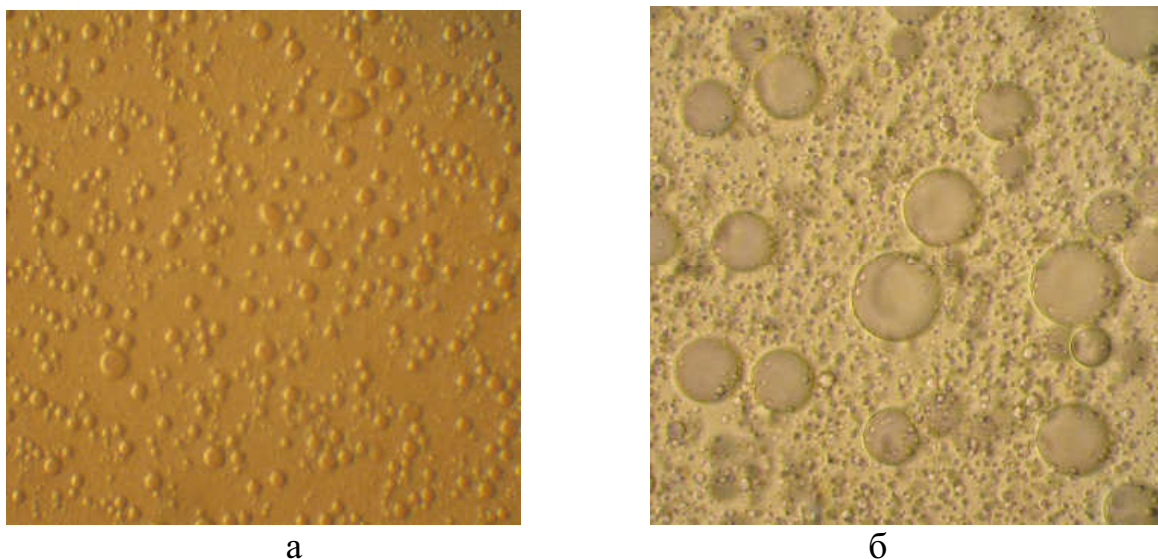


Рисунок 4.1 – Снимок микрофотографирования ЭТЭ: а - сразу после приготовления; б - в начале процесса флокуляции

При испытаниях дизеля 4Ч 11,0/12,5 были исследованы СТЭ с различным содержанием дизельного топлива, спирта и присадки. Концентрация спирта изме-

нялась от 10 до 50% по массе (шаг составлял 10%). Концентрация же присадки изменялась от 0,5 до 2% (шаг составлял 0,5%). Также было проведено микроскопирование приготовленных проб эмульсий и проб, у которых уже начинался процесс флокуляции. Анализ рисунка 4.1, а показывает, что у пробы частицы имеют достаточно однородный по размеру состав, но с течением времени частицы объединяются в более крупные «агрегаты», определяющие процесс флокуляции (рисунок 4.1, б).

Первоначально за показатель стабильности было принято время, в результате которого наблюдались изменения приготовленной СТЭ в виде осадка или отстоя. Из графиков (рисунок 4.2) можно заметить, что показатели стабильности эмульсии характеризуются не только содержанием спирта, но и концентрацией присадки ($K_{\text{п}}$). Так, при содержании метилового спирта 10% (см. рисунок 4.2, а) стабильность эмульсии уменьшается от 1,5 минут при $K_{\text{п}} = 0,5\%$ до 1,4 минуты при $K_{\text{п}} = 1,0\%$, т.е. на 6,7%. Дальнейшее увеличение $K_{\text{п}}$ до 2,0% приводит к повышению стабильности до 2,2 минуты, или на 57,1%. При добавлении в состав эмульсии дистиллированной воды ее стабильность достаточно увеличивается до значений нескольких десятков часов. Так, это повышение составило при $K_{\text{п}} = 0,5\%$ - 17,9 часа, а при $K_{\text{п}} = 2,0\%$ уже выросло до 34,6 часа (увеличение составило 93,3%) концентрация метанола при этом составляла 25% (см. рисунок 4.2, б). А стабильность ЭТЭ (рисунок 4.2, г) с содержанием этанола 50% возрастает с 16,3 часа (содержание присадки 0,5%) до 18,9 часов (содержание присадки 2,0%). Максимальные же значения стабильности эмульсии достигаются при концентрации спирта (как метанола, так и этанола) 50%.

Таким образом, приготавливаемые СТЭ характеризуются достаточным «запасом времени» на сохранение своих технических свойств, позволяющих сохраняться необходимый период времени в стабильном состоянии. В этот промежуток времени проба СТЭ легко принимает первоначальное состояние посредством встряхивания либо за счет вибрации работающего дизеля. После окончания процесса седиментации в СТЭ происходит процесс образования капель составляющих компонентов (флокуляция).

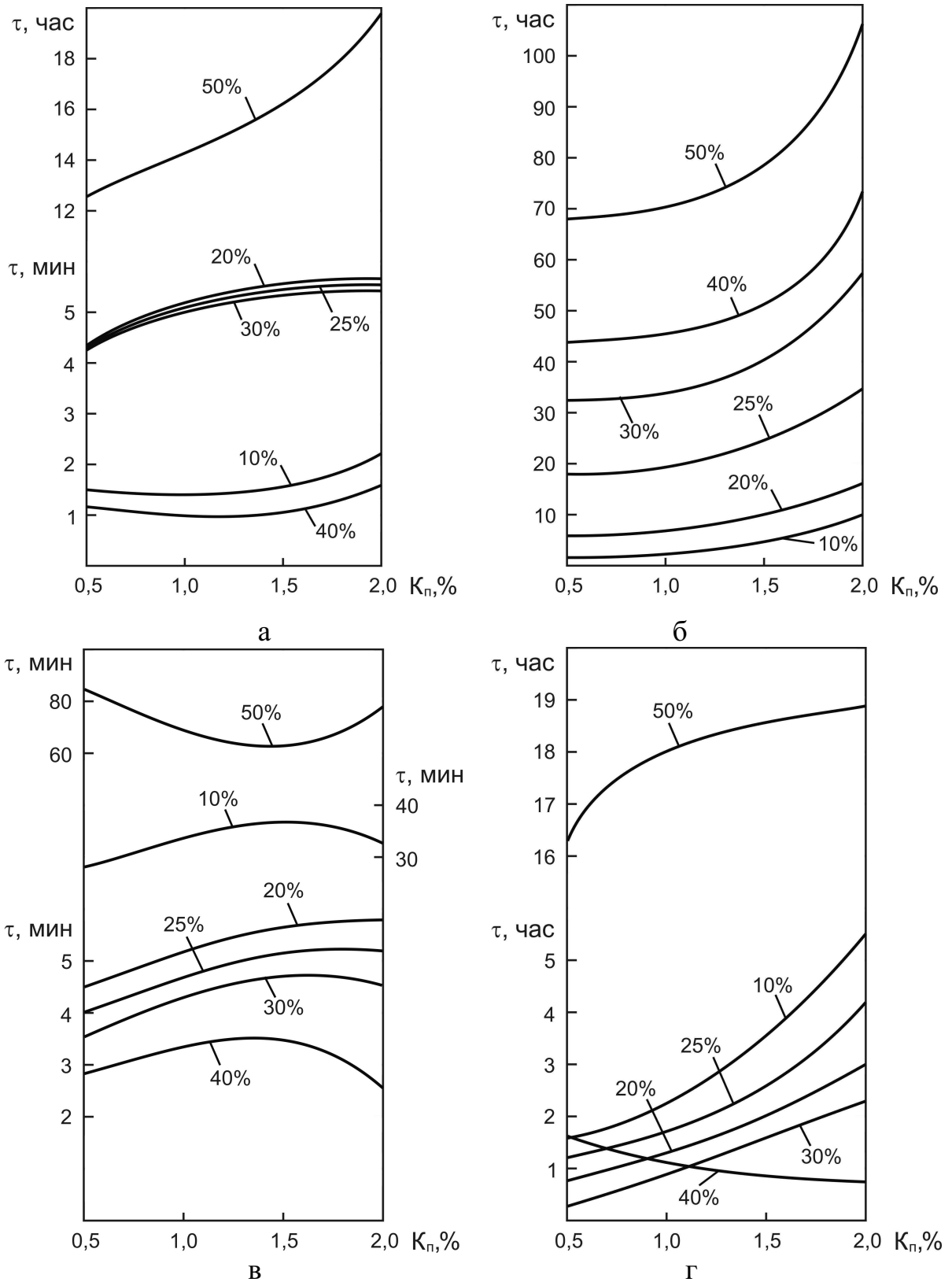


Рисунок 4.2 - Результаты исследований стабильности экологической смеси спиртов с дизельным топливом и присадкой сукцинимид С-5А: K_p - концентрация присадки сукцинимид С-5А; 10, 20, 30, 40, 50% - концентрация спирта; а – абсолютный метанол; б – метанол с содержанием воды (7% по массе); в – абсолютный этанол; г – этанол с содержанием воды (7% по массе)

Последующее повышение объема капель и дальнейшее их сливание приводит к полному разделению дисперсионной среды на спиртовую и углеводородную фазы, т.е. к последней стадии процесса коалесценции. Для исследуемых МТЭ и ЭТЭ стабильность к коалесценции составила от 4 до 6 суток. Из результатов исследований были сделаны выводы о необходимости использования воды в составе СТЭ, что многократно повышает ее стабильность.

Сукцинимид С-5А является эффективным эмульгатором для эмульсий обратного типа. Добавление воды в сочетании с этой присадкой приводит к еще более значительному повышению стабильности эмульсий (от 1-6 минут до 1,5-100,0 часов). Полученные результаты позволяют говорить о возможности применения сукцинимида в комплексе водой как хорошего эмульгатора при приготовлении экологической СТЭ вне топливной системы дизеля 4Ч 11,0/12,5. По проведенным исследованиям стабильности спиртовых эмульсий было определено, что концентрация спирта 50% (метанола, этанола) в эмульсии оптимальна по условиям устойчивости к процессам разрушения. Скорее всего, это свидетельствует о повышении предельной концентрации спирта (метанола, этанола) в эмульсии, в результате чего возрастает роль «обратной» реакции по отношению к «прямой», что приводит к пропускам воспламенения при воспламенении такой эмульсии в КС дизеля. Подтверждение этому было получено после первичных испытаний дизеля. Таким образом, по результатам проведенных исследований спиртовых эмульсий использование их в дизеле с большим содержанием спирта (метанола, этанола) практически затруднено вследствие с возникающими пропусками воспламенения и повышенной жесткостью процесса сгорания.

В качестве оптимальных для дизеля 4Ч 11,0/12,5 по результатам проведенных исследований физико-химических свойств эмульсий, стабильности и первичных испытаний были приняты эмульсии, характеризующиеся следующим составом: спирт (метанол или этанол) - 25%, моющее-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А – 0,5%, вода - 7%, дизельное топливо – 67,5%. Также экспериментальными исследованиями было установлено, что для получения экологического энергоносителя для дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ необходимо применять

следующее соотношение: газа – 80%, запальной порции дизельного топлива – 20% [53, 54]. Все дальнейшие испытания дизеля проводились на экологических энергоносителях вышеуказанного состава.

4.2 Результаты экспериментальных исследований экологических и эффективных показателей дизеля при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от установочного у.о.в.т

Согласно принятой методики проведения экспериментальных исследований по применению ПГ, ПГ с охлаждаемой РОГ, МТЭ и ЭТЭ с целью снижения эмиссии NO_x в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, а также для определения оптимальных значений установочных у.о.в.т., руководствуясь минимальными величинами удельных эффективных расходов дизельного топлива, ПГ, МТЭ и ЭТЭ, были сняты характеристики в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ дизеля, работающего по ДП, ГДП, ГДП с РОГ, МТЭ и ЭТЭ, при равных значениях среднего эффективного давления.

Зависимости регулировочных показателей от установочного у.о.в.т. дизеля 4Ч 11,0/12,5 при частоте вращения 2200 мин^{-1} (номинальный скоростной режим) для мощностных и экономических параметров изображены на рисунке 4.3, а.

Анализ представленных зависимостей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 по ДП при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и постоянной величине часового расхода дизельного топлива ($G_{\text{дт}} = 13,4 \text{ кг/ч}$) показывает, что при значении установочного у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ достигается минимальное значение удельного эффективного расхода дизельного топлива ($g_{\text{е дт}} = 240 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$) и максимальная величина эффективной мощности ($N_{\text{е}} = 55,8 \text{ кВт}$). При уменьшении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение $g_{\text{е дт}}$ повышается до $243 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, т.е. на 1,3%, а величина эффективной мощности $N_{\text{е}}$ незначительно уменьшается до $55,2 \text{ кВт}$, или на 1,1%. Дальнейшее уменьшение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° приводит к увеличению значения $g_{\text{е дт}}$ до $249 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, т.е. на 3,8%, а значение $N_{\text{е}}$ уменьшается до $53,8 \text{ кВт}$, т.е. на 3,6%.

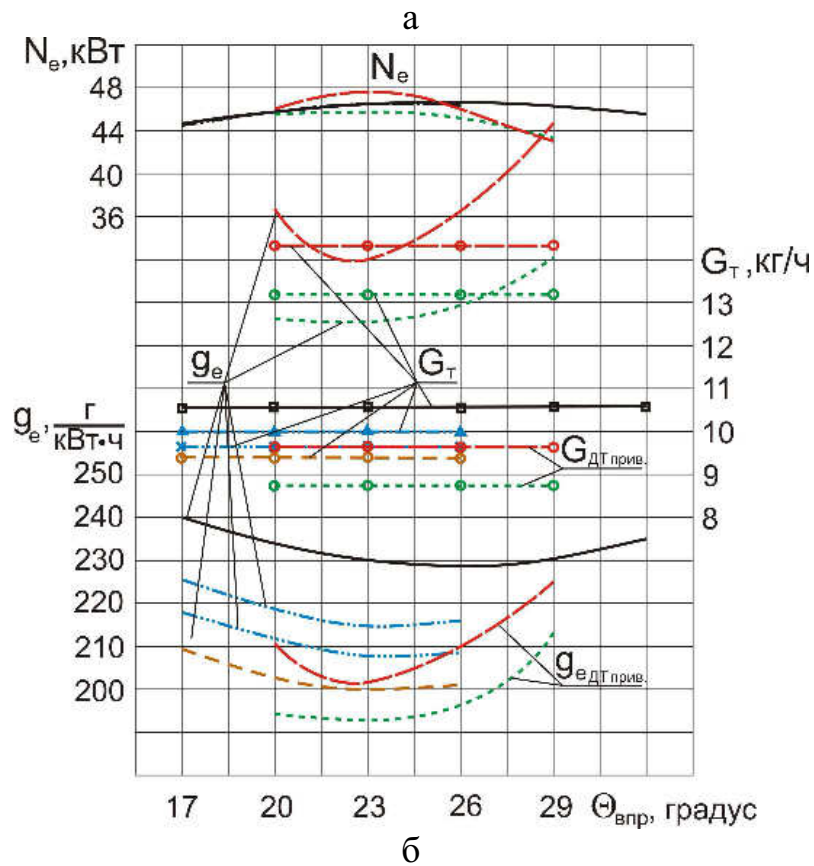
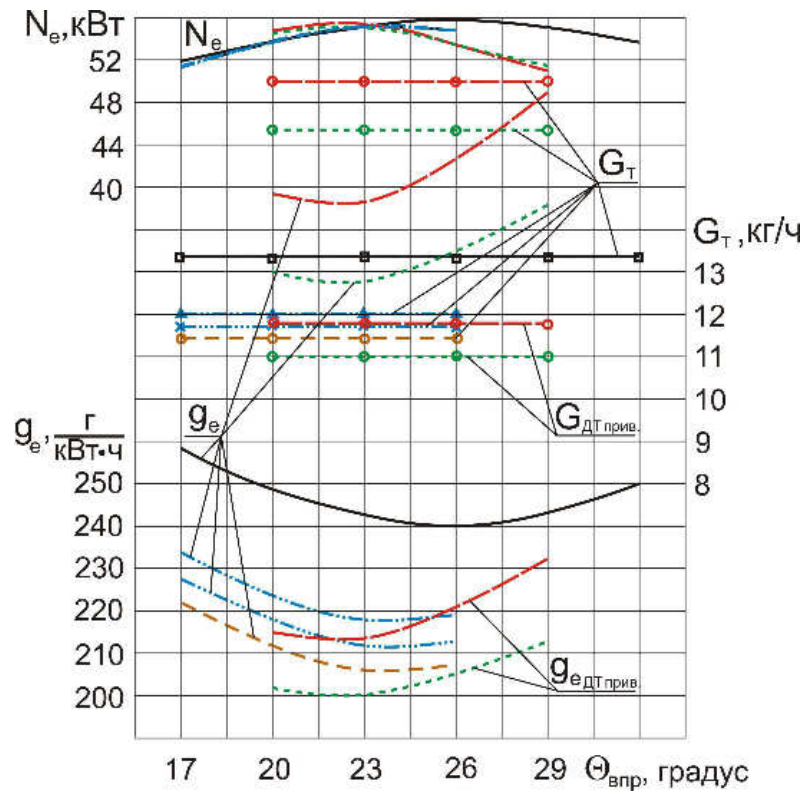


Рисунок 4.3 – Зависимости мощностных и экономических параметров дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения $\Theta_{впр}$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$;

б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; ———— – ДП; - - - - - ГДП; - ГД с РОГ 10%;

— · — · — · - ГД с РОГ 20%; - ЭТЭ; - · - · - МТЭ

Дальнейшее снижение $\Theta_{\text{впр}}$ до 17° увеличивает значение $g_{e \text{ ДТ}}$ до $258 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, т.е. на $7,5\%$, а величина эффективной мощности N_e уменьшается до $51,9 \text{ кВт}$, или на $7,0\%$. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение $g_{e \text{ ДТ}}$ также повышается до $243 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, что составляет $1,3\%$ по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, а эффективная мощность N_e уменьшается до $55,1 \text{ кВт}$, или на $1,3\%$. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° приводит к еще большему возрастанию значения $g_{e \text{ ДТ}}$ до $250 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, или на $4,2\%$, и снижению N_e до $53,6 \text{ кВт}$, или на $3,9\%$.

Анализируя кривые, соответствующие работе газодизельному и газодизельному с РОГ процессам при $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ отметим, что при работе по ГДП как с РОГ так и без нее $\Theta_{\text{впр}}$ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ по принципу лучшей экономичности соответствует $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. Значение часового расхода топлива G_T при ГДП и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ равняется $11,4 \text{ кг}/\text{ч}$, а для ГДП с 10% -ной РОГ $11,7 \text{ кг}/\text{ч}$, что на $2,6\%$ больше. Величина g_e при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ равняется $207 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, а при ГДП с 10% -ной РОГ $212 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, что на $2,4\%$ больше. При увеличении $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ на ГДП с РОГ происходит возрастание g_e и незначительное снижение мощности. При снижении $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ увеличивается удельный расход топлива и происходит уменьшение значения эффективной мощности двигателя.

Анализ зависимостей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на МТЭ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и фиксированном часовом расходе МТЭ $G_{\text{МТЭ}} = 17,5 \text{ кг}/\text{ч}$ показывает, что при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ удельный эффективный расход МТЭ минимален $g_{e \text{ МТЭ}} = 316 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, и значения удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ также имеют минимальные значения $g_{e \text{ ДТ прив.}} = 213 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Поскольку у МТЭ меньшая по отношению к дизельному топливу теплота сгорания, то это конечно повышает значения часового и удельного расходов топлива. При уменьшении $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° значение $g_{e \text{ МТЭ}}$ повышается до $319 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, т.е. на $0,9\%$, а удельный эффективный расход дизельного топлива в составе МТЭ $g_{e \text{ ДТ прив.}} = 215 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. При увеличении же $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° зна-

чение $g_{e\text{ МТЭ}}$ повышается до 328 г/(кВт·ч), или на 3,4% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, а удельный эффективный расход дизельного топлива в составе МТЭ составляет $g_{e\text{ ДТ прив.}} = 221$ г/(кВт·ч). При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение $g_{e\text{ МТЭ}}$ повышается до 343 г/(кВт·ч), или на 8,5% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, удельный эффективный расход дизельного топлива в составе МТЭ составляет $g_{e\text{ ДТ прив.}} = 232$ г/(кВт·ч).

Таблица 4.1 – Результаты исследований мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	$N_e, \text{ кВт}$	$g_e, \text{ г/(кВт·ч)}$	$g_{e\text{ ДТ прив.}}, \text{ г/(кВт·ч)}$	$G_T, \text{ кг/ч}$	$G_{\text{ДТ прив.}}, \text{ кг/ч}$
Дизельное	55,2	243	-	13,4	-
ПГ	55,2 (соответствует ДП)	207 (снижение на 14,8%)	-	11,4 (снижение на 14,9%)	-
ПГ с РОГ 10%	55,2 (соответствует ДП)	212 (снижение на 12,8%)	-	11,7 (снижение на 12,7%)	-
ПГ с РОГ 20%	55,2 (соответствует ДП)	218 (снижение на 10,3%)	-	12,0 (снижение на 10,5%)	-
МТЭ	55,4 (увеличение на 0,4%)	316 (увеличение на 30,0%)	213 (снижение на 12,3%)	17,5 (увеличение на 30,6%)	11,8 (снижение на 11,9%)
ЭТЭ	55,0 (снижение на 0,4%)	297 (увеличение на 22,2%)	200 (снижение на 17,7%)	16,3 (увеличение на 21,6%)	11,0 (снижение на 17,9%)

Исследуя характеристики дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ЭТЭ, при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и постоянной величине часового расхода ЭТЭ – $G_{\text{ЭТЭ}} = 16,3 \text{ кг/ч}$, необходимо отметить, что при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ достигают своих минимальных значений удельный эффективный расход ЭТЭ ($g_{e\text{ ЭТЭ}} = 297 \text{ г/(кВт·ч)}$) и удельный эф-

эффективный расход дизельного топлива в составе ЭТЭ ($g_{eДТприв.} = 200 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$). Здесь также следует заметить, что наличие у ЭТЭ меньшей теплоты сгорания по сравнению с дизельным топливом ведет к повышению значений часового и удельного расходов топлива. При уменьшении $\Theta_{впр}$ до 20° значение $g_{eЭТЭ}$ повышается до $300 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, что соответствует 1,0%, а $g_{eДТприв.}$ в составе ЭТЭ равняется $202 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Увеличение же $\Theta_{впр}$ до 26° повышает значение $g_{eЭТЭ}$ до $305 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, или на 2,7% по отношению к $\Theta_{впр} = 23^\circ$, а удельный эффективный расход дизельного топлива в составе ЭТЭ составляет при этом $g_{eДТприв.} = 206 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. При дальнейшем увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение $g_{eЭТЭ}$ повышается до $316 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, или на 6,4% по отношению к $\Theta_{впр} = 26^\circ$, а $g_{eДТприв.}$ в составе ЭТЭ равняется $213 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$.

Таблица 4.2 - Результаты исследований мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{впр} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	$N_e, \text{ кВт}$	$g_e, \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$	$g_{eДТприв.}, \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$	$G_T, \text{ кг/ч}$	$G_{ДТприв.}, \text{ кг/ч}$
Дизельное	55,8	240	-	13,4	-
ПГ	54,8 (снижение на 1,8%)	208 (снижение на 13,3%)	-	11,4 (снижение на 14,9%)	-
ПГ с РОГ 10%	54,8 (снижение на 1,8%)	213 (снижение на 11,3%)	-	11,7 (снижение на 12,7%)	-
ПГ с РОГ 20%	54,8 (снижение на 1,8%)	219 (снижение на 8,8%)	-	12,0 (снижение на 10,5%)	-
МТЭ	53,4 (снижение на 4,3%)	328 (увеличение на 36,7%)	221 (снижение на 7,9%)	17,5 (увеличение на 30,6%)	11,8 (снижение на 11,9%)
ЭТЭ	53,4 (снижение на 4,3%)	305 (увеличение на 27,1%)	206 (снижение на 14,2%)	16,3 (увеличение на 21,6%)	11,0 (снижение на 17,9%)

Таким образом, на номинальном режиме работы при установочных у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23$ и 26° применение КПП с РОГ и СТЭ приводит к следующим значениям мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч11,0/12,5 (таблицы 4.1, 4.2).

Регулировочные характеристики, зависящие от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ дизеля 4Ч 11,0/12,5, при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ (режим максимального крутящего момента) для мощностных и экономических параметров представлены на рисунке 4.3, б.

Исследуя кривые показателей работы дизеля 4Ч11,0/12,5 по ДП при частоте вращения $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и постоянном часовом расходе дизельного топлива ($G_{\text{дт}} = 10,7 \text{ кг/ч}$), можно констатировать, что при значении установочного у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ достигается минимальное значение удельного эффективного расхода дизельного топлива ($g_{\text{е дт}} = 229 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$) и максимальное значение эффективной мощности ($N_{\text{е}} = 46,7 \text{ кВт}$). При уменьшении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение $g_{\text{е дт}}$ повышается до $230 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, что соответствует 0,4%, а значение эффективной мощности $N_{\text{е}}$ незначительно понижается до $46,5 \text{ кВт}$. Дальнейшее уменьшение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° приводит к увеличению значения $g_{\text{е дт}}$ до $234 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, что соответствует 2,2%, а величина эффективной мощности $N_{\text{е}}$ понижается до $45,7 \text{ кВт}$, т.е. на 2,1%. Дальнейшее снижение $\Theta_{\text{впр}}$ до 17° увеличивает значение $g_{\text{е дт}}$ до $240 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, что соответствует 4,8%, а эффективную мощность $N_{\text{е}}$ уменьшает до $44,6 \text{ кВт}$, или на 4,5%. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение $g_{\text{е дт}}$ также повышается до $231 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, что составляет 0,9% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, а эффективная мощность $N_{\text{е}}$ уменьшается до $46,3 \text{ кВт}$, или на 0,9%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° приводит к еще большему возрастанию значения $g_{\text{е дт}}$ до $235 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, или на 2,6%, и снижению $N_{\text{е}}$ до $45,5 \text{ кВт}$, или на 2,6%.

Из анализа кривых показателей работы ГД и ГД с РОГ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ видно, что оптимальный установочный у.о.в.т. при по условию наилучшей экономичности составляет $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. Величина $G_{\text{т}}$ для ГДП и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ соответствует $9,3 \text{ кг/ч}$, а для ГДП с 10%-ной РОГ $9,7 \text{ кг/ч}$, что выше на 4,1%. Величина

удельного эффективного расхода топлива g_e при $\Theta_{впр} = 23^\circ$ равняется $200 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, а при ГДП с 10%-ной РОГ $208 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, что больше на 4,0%. Увеличение $\Theta_{впр} = 26^\circ$ на ГДП с РОГ приводит к возрастанию удельного эффективного расхода топлива и снижению N_e . При дальнейшем снижении $\Theta_{впр} = 20^\circ$ происходит еще большее увеличение g_e и падение значения N_e .

Исследуя графические зависимости показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на МТЭ, при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и постоянном часовом расходе МТЭ - $G_{\text{МТЭ}} = 14,3 \text{ кг/ч}$, необходимо выделить, что при $\Theta_{впр} = 23^\circ$ достигается минимальная величина удельного эффективного расхода МТЭ ($g_{e \text{ МТЭ}} = 299 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$) и удельный эффективный расход дизельного топлива в составе МТЭ ($g_{e \text{ ДТ прив.}} = 202 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$). Значения меньшей теплоты сгорания МТЭ по отношению к дизельному топливу, приводят к росту часового и удельного расходов топлива. При уменьшении $\Theta_{впр}$ до 20° значение $g_{e \text{ МТЭ}}$ повышается до $312 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, что соответствует 4,3%, а удельный эффективный расход дизельного топлива в составе МТЭ $g_{e \text{ ДТ прив.}} = 211 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. При увеличении же $\Theta_{впр}$ до 26° значение $g_{e \text{ МТЭ}}$ повышается до $312 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, или на 4,3% по отношению к $\Theta_{впр} = 23^\circ$, а удельный эффективный расход дизельного топлива в составе МТЭ составляет $g_{e \text{ ДТ прив.}} = 211 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. При дальнейшем увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение $g_{e \text{ МТЭ}}$ повышается до $333 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, или на 11,4% по отношению к $\Theta_{впр} = 23^\circ$, а удельный эффективный расход дизельного топлива в составе МТЭ составляет $g_{e \text{ ДТ прив.}} = 225 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$.

Изучая кривые дизеля 4Ч11,0/12,5, работающего на ЭТЭ, при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и фиксированном часовом расходе ЭТЭ - $G_{\text{ЭТЭ}} = 13,1 \text{ кг/ч}$, необходимо отметить, что при $\Theta_{впр} = 23^\circ$ достигают своих минимальных значений величины удельного эффективного расхода ЭТЭ ($g_{e \text{ ЭТЭ}} = 286 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$) и удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ ($g_{e \text{ ДТ прив.}} = 193 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$). Здесь также необходимо заметить, что меньшая вели-

чина теплоты сгорания ЭТЭ, по сравнению с ДП, ведет к повышению значений часового и удельного расходов топлива. При уменьшении $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° значение $g_{e \text{ ЭТЭ}}$ повышается до $287 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, т.е. на $0,4\%$, а величина удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ составляет $g_{e \text{ ДТ прив.}} = 194 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. При росте же $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение $g_{e \text{ ЭТЭ}}$ повышается до $290 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, или на $1,4\%$ по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, а удельный эффективный расход дизельного топлива в составе ЭТЭ составляет $g_{e \text{ ДТ прив.}} = 196 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение $g_{e \text{ ЭТЭ}}$ повышается до $302 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, или на $5,6\%$ по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, а удельный эффективный расход дизельного топлива в составе ЭТЭ составляет $g_{e \text{ ДТ прив.}} = 204 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$.

Таблица 4.3 - Результаты исследований мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	$N_e, \text{ кВт}$	$g_e, \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$	$g_{e \text{ ДТ прив.}}, \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$	$G_T, \text{ кг}/\text{ч}$	$G_{\text{ДТ прив.}}, \text{ кг}/\text{ч}$
Дизельное	46,5	230	-	10,7	-
ПГ	46,5 (соответствует ДП)	200 (снижение на 13,0%)	-	9,3 (снижение на 13,1%)	-
ПГ с РОГ 10%	46,5 (соответствует ДП)	208 (снижение на 9,6%)	-	9,7 (снижение на 9,4%)	-
ПГ с РОГ 20%	46,5 (соответствует ДП)	215 (снижение на 6,5%)	-	10,0 (снижение на 6,5%)	-
МТЭ	47,9 (увеличение на 3,0%)	299 (увеличение на 30,0%)	202 (снижение на 12,2%)	14,3 (увеличение на 33,6%)	9,7 (снижение на 9,4%)
ЭТЭ	45,7 (снижение на 1,7%)	286 (увеличение на 24,3%)	193 (снижение на 16,1%)	13,1 (увеличение на 22,4%)	8,8 (снижение на 17,8%)

Следовательно, при максимальном крутящем моменте и установочных у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23$ и 26° применение ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ характеризуется следующими значениями мощностных и экономических параметров работы дизеля 4Ч11,0/12,5 (таблицы 4.3, 4.4).

Таблица 4.4 - Результаты исследований мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

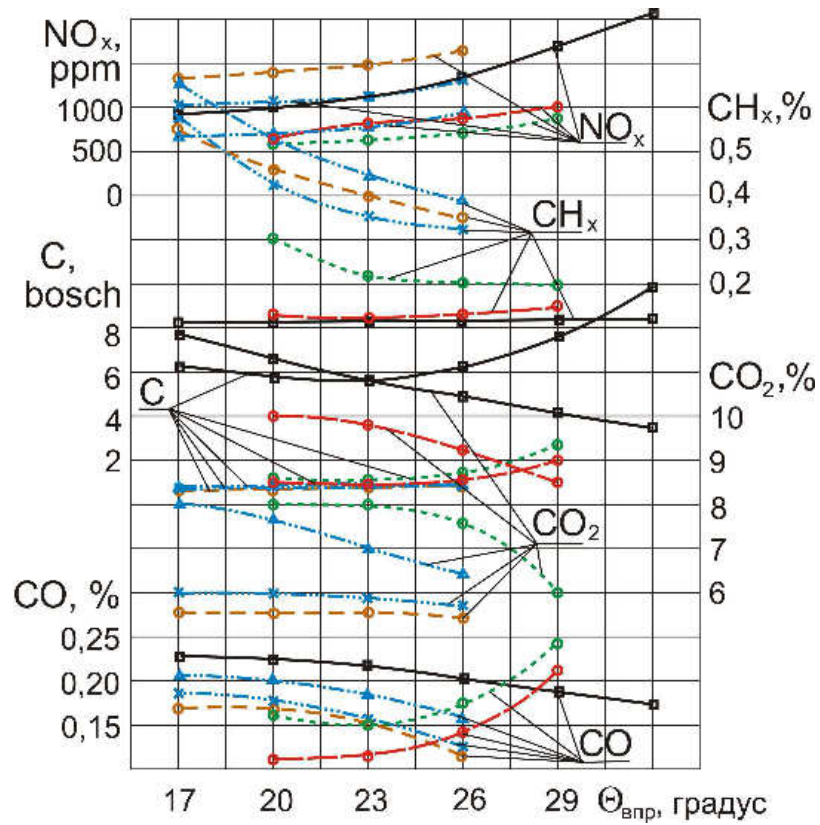
Топливо	Показатели				
	$N_e, \text{ кВт}$	$g_e, \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$	$g_{e, \text{ ДТ прив.}}, \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$	$G_T, \text{ кг/ч}$	$G_{\text{ДТ прив.}}, \text{ кг/ч}$
Дизельное	46,7	229	-	10,7	-
ПГ	46,4 (снижение на 0,6%)	201 (снижение на 12,2%)	-	9,3 (снижение на 13,1%)	-
ПГ с РОГ 10%	46,4 (снижение на 0,6%)	209 (снижение на 8,7%)	-	9,7 (снижение на 9,4%)	-
ПГ с РОГ 20%	46,3 (снижение на 0,9%)	216 (снижение на 5,7%)	-	10,0 (снижение на 6,5%)	-
МТЭ	45,9 (снижение на 1,7%)	312 (увеличение на 26,6%)	211 (снижение на 7,9%)	14,3 (увеличение на 33,6%)	9,7 (снижение на 9,4%)
ЭТЭ	45,1 (снижение на 3,4%)	290 (увеличение на 26,6%)	196 (снижение на 14,4%)	13,1 (увеличение на 22,4%)	8,8 (снижение на 17,8%)

Поэтому, руководствуясь минимальным удельным расходом топлива g_e , на всех режимах работы дизеля принят в качестве оптимального для ДП установочный у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, а при работе на ПГ, ПГ с РОГ, СТЭ - $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. Уменьшение значения от оптимального установочного у.о.в.т. при работе на режиме максимальной нагрузки приводит также к увеличению жесткости процесса сгорания, сопровождаемой стуками в ЦПГ. Увеличение же значения от оптимального уста-

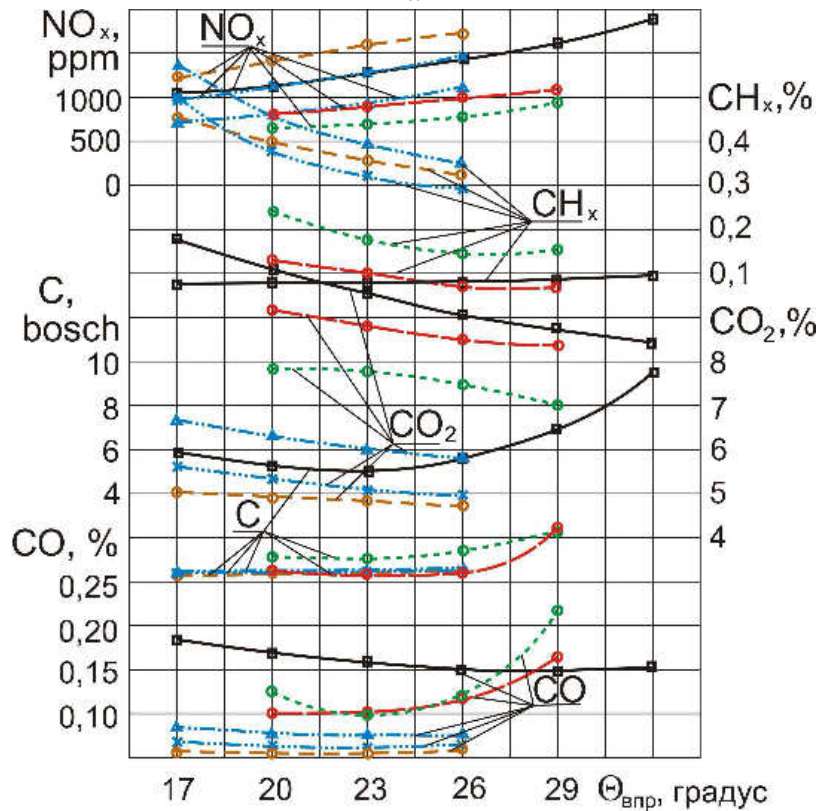
новочного у.о.в.т. может вызывать недопустимое повышение температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения дизеля и, следовательно, его перегрев.

Содержание токсичных веществ в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ представлено на рисунке 4.4, а.

Анализ кривых токсичности ОГ дизеля, работающего по ДП, показывает, что с увеличением установочного у.о.в.т. происходит рост NO_x и CH_x . Содержание оксида углерода CO и диоксида CO_2 с увеличением установочного у.о.в.т. снижается. Значение дымности (С) ОГ минимально при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, а при уменьшении или увеличении этого значения возрастает. Так, содержание NO_x в ОГ дизеля при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ составляет 925 ppm. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° значение NO_x повышается до 1000 ppm, или на 8,1%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к повышению значения NO_x до 1100 ppm, т.е. на 18,9%. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение NO_x повышается до 1320 ppm, т.е. на 42,7%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° приводит к повышению NO_x до 1670 ppm, или на 80,5%; при росте $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° значение NO_x достигает максимума - 2050 ppm, повышение в 2,2 раза. Концентрация CH_x в ОГ дизеля при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется 0,104%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° приводит к повышению CH_x до 0,106%, или на 1,9%. Дальнейшее увеличение установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ приводит к повышению значения CH_x до 0,108%, т.е. на 3,9%. При увеличении установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ значение CH_x повышается до 0,110%, т.е. на 5,8%. При дальнейшем увеличении установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ величина CH_x растет до 0,112%, или на 7,7%; при повышении $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° значение CH_x увеличивается до 0,115%, или на 10,6%. Концентрация CO_2 в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется 11,9%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° приводит к снижению значений CO_2 до 11,3%, или на 5,0%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к снижению значения CO_2 до 10,9%, т.е. на 8,4%. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значения CO_2 снижаются до 10,5%, или на 11,8%.



а



б

Рисунок 4.4 – Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения установочного у.о.в.т.:

а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; \square — \square – ДП; \circ — \circ – ГДП;

\times — \times – ГДП с РОГ 10%; \triangle — \triangle – ГДП с РОГ 20%; \circ — \circ – ЭТЭ; \circ — \circ – МТЭ

При последующем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение CO_2 снижается до 10,1%, или на 15,1%; при повышении $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° значение CO_2 равняется 9,8%. Снижение при этом составляет 17,7%. Концентрация CO в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется 0,23%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° снижает значения CO до 0,22%, или на 4,4%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к снижению значений CO до 0,21%, или на 8,7%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° снижает значения CO до 0,20%, или на 13,0%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° снижает значения CO до 0,19%, или на 17,4%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° снижает значения CO до 0,18%, или на 26,1% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$.

Дымность ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется 6,2 ед. по шкале Bosch. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° снижает дымность ОГ до 5,9 ед. по шкале Bosch, или на 4,8%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к снижению значения дымности до 5,8 ед. по шкале Bosch, или на 6,4%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° приводит дымность ОГ к значению 6,2 ед. по шкале Bosch, что соответствует $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° повышает дымность до 7,8 ед. по шкале Bosch, или на 25,8%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° повышает дымность до 9,9 ед. по шкале Bosch, или на 59,7%.

Анализируя кривые параметров токсичности при работе по ГДП, следует выделить, что с увеличением установочного у.о.в.т. возрастает содержание в ОГ NO_x и незначительно сажи C , снижается содержание оксида CO и диоксида углерода CO_2 и суммарных углеводородов CH_x . Применение на газодизеле РОГ не изменяет характер протекания кривых относительно установочного у.о.в.т. и приводит к снижению содержания в ОГ NO_x и CH_x (на установочных у.о.в.т. 20-26° при степени РОГ 10%), незначительному повышению содержания сажи C и повышению оксида CO и диоксида углерода CO_2 . Кроме того, необходимо отметить, что применение РОГ позволяет уменьшить объем ОГ на величину закона подачи рециркулируемых газов и, следовательно, в относительном выражении уменьшает весь спектр токсичных компонентов ОГ.

Так, рассматривая содержание NO_x в ОГ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, следует заметить, что изменение $\Theta_{\text{впр}}$ приводит к изменению содержания NO_x при работе по ГДП и ГДП с РОГ по схожей с ДП зависимости. Например, исследуя ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ величина содержания NO_x в ОГ равняется 1300 ppm, что на 21,2% меньше ГДП и ниже на 3,7% ДП. При исследованиях ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ величина содержания NO_x в ОГ равняется 1100 ppm, что на 24,1% меньше ГДП, соответствует ДП и ниже на 15,4% ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$. Последующее увеличение величины РОГ в большей степени снижает NO_x , но при этом происходит увеличение CH_x . ГДП характеризуется увеличенным содержанием CH_x по отношению к ДП. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ вызывает рост содержания CH_x в ОГ как при работе по ДП, так и по ГДП. Так, исследования дизеля по ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ показывают величину содержания CH_x в ОГ, равную 0,32%, что на 5,9% меньше чисто ГДП. Исследуя ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ величина содержания CH_x в ОГ равняется 0,36%, что на 9,9% меньше ГДП. Увеличение РОГ до 20% вызывает рост CH_x до значений, превышающих их содержание в ОГ при ГДП. Исследования сажесодержания в ОГ дизеля, работающего по ГДП как с РОГ, так и без нее характеризуются незначительными изменениями в зависимости от $\Theta_{\text{впр}}$. Кроме того, включение на ГДП РОГ не вызывает существенного роста сажи, тогда как ДП характеризуется значительным ее увеличением в ОГ (в 4...5 раз) по отношению к ГДП. Величина содержания CO в ОГ с увеличением $\Theta_{\text{впр}}$ при исследованиях дизеля по ГДП с РОГ снижается. Исследования ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ показали увеличение значений содержания CO в ОГ выше на 6,7% ГДП, ниже на 23,8% ДП и выше на 23,1% ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

Концентрация CO_2 с повышением $\Theta_{\text{впр}}$ при исследованиях дизеля как по ГДП, так и по ГДП с РОГ увеличивается, причем повышение степени РОГ оказы-

вает еще большее воздействие на CO_2 в сторону увеличения. Так, исследования ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ показывают увеличение содержания CO_2 в ОГ над ГДП на 5,4%, что на 45,9% меньше ДП и всего на 1,7% больше ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

Анализируя кривые дизеля на МТЭ, следует выделить, что при изменении установочного у.о.в.т. содержание NO_x характеризуется аналогичной зависимостью ДП – увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ вызывает повышение содержания NO_x в ОГ. Так, содержание NO_x в ОГ дизеля при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 665 ppm. При увеличении $\Theta_{\text{впр МТЭ}}$ до 23° значение NO_x повышается до 775 ppm, т.е. на 16,5%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр МТЭ}}$ до 26° значение NO_x повышается до 853 ppm, т.е. на 28,3%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение NO_x также повышается до 990 ppm, т.е. на 48,9%. Величина содержания CH_x в ОГ дизеля при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ равняется 0,13%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает значения CH_x до 0,12%, или на 7,7%. Дальнейшее увеличение установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ повышает значение CH_x до 0,13%, т.е. соответствует значению при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$; при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ величина CH_x равняется 0,14%, что составляет уже 16,7% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. Концентрация CO_2 в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ равняется 10,0%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает CO_2 до 9,8%, или на 2,0%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° снижает CO_2 до 9,2%, или на 8,0%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° снижает CO_2 до 8,5%, или на 15,0%. Концентрация CO в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ равняется 0,105%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° вызывает рост CO до 0,110%, или на 4,8%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает значения CO до 0,140%, или на 33,3%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° повышает значения CO до 0,210%, т.е. ровно в 2,0 раза. Величина дымности ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ равняется 1,0 ед. по шкале Bosch. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает дымность ОГ до 0,9 ед. по шкале Bosch, или на 10,0%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает значения дымности ОГ до 1,2 ед. по шкале Bosch, или

на 33,3% по отношению к $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° дымность увеличивается до 2,0 ед. по шкале Bosch, или в 2,2 раза.

Рассматривая дизель 4Ч 11,0/12,5 по ДП и на МТЭ при разных $\Theta_{\text{впр}}$ и частоте вращения 2200 мин^{-1} , следует пояснить, что величины содержания токсичных компонентов в ОГ при исследовании его на МТЭ изменены по отношению к кривым ДП. Содержание NO_x в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$ ниже ДП. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ значение NO_x снижается с 1100 до 774 ppm, т.е. на 29,6%. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ значение NO_x снижается с 1320 до 853 ppm, т.е. на 35,4%. Концентрация CH_x в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, выше ДП на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$. Рассматривая переход дизеля с ДП на МТЭ значения CH_x увеличиваются при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ с 0,108 до 0,12%, или на 11,1%; при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ с 0,11 до 0,13%, или на 18,2%. Концентрация CO_2 в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, ниже ДП на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ значения CO_2 снижаются с 10,9 (ДП) до 9,8% (МТЭ), или на 10,1%. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ значение CO_2 уменьшается с 10,5 до 9,2%, т.е. на 12,4%. Кривая содержания CO в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, носит отличительный характер изменения по сравнению с ДП. Так, при установочном у.о.в.т. 29° CO больше, чем при работе по ДП, а на всех остальных исследуемых углах происходит снижение. При $\Theta_{\text{впр}}$, равном 23 и 26° , величина содержания CO в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, уменьшается по отношению к ДП с 0,21 до 0,110%, т.е. на 47,6%, и с 0,20 до 0,14%, или на 30,0% соответственно. Дымность ОГ дизеля, работающего на МТЭ, меньше ДП. Так, переход дизеля на МТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ уменьшает величину дымности в 5,2 раза, а при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ - в 6,4 раза.

Исследуя кривые, соответствующие работе дизеля на ЭТЭ, следует обратить внимание на то, что концентрация NO_x в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 610 ppm. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение NO_x повышается до 657 ppm, т.е. на 7,7%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение NO_x повышается до 730 ppm, т.е. на 19,7%; а при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение NO_x продолжает

повышаться до 825 ppm, т.е. на 35,2%. Концентрация CH_x в ОГ при $\Theta_{\text{впр}}=20^\circ$ равняется 0,30%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает содержание CH_x до 0,22%, или на 26,7%. Дальнейшее увеличение установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}}=26^\circ$ значение CH_x уменьшается до $\text{CH}_x=0,20\%$, т.е. на 33,3%; при увеличении установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}}=29^\circ$ значение CH_x уменьшается до 0,19%, или на 36,7%. Концентрация CO_2 в ОГ при $\Theta_{\text{впр}}=20^\circ$ составляет 8,2%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает CO_2 до 8,0%, или на 2,4%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° снижает CO_2 до 7,6%, или на 7,3%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° снижает CO_2 до 6,0%, или на 26,8%. Концентрация CO в ОГ при $\Theta_{\text{впр}}=20^\circ$ равняется 0,16%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает CO до 0,15%, или на 6,3%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает CO до 0,17%, или на 13,3% по отношению к $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° величина CO растет до 0,24%, или на 60,0%. Значения дымности ОГ при $\Theta_{\text{впр}}=20^\circ$ равняются 1,3 ед. по шкале Bosch. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает дымность до 1,2 ед. по шкале Bosch, т.е. на 7,7%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает дымность до 1,5 ед. по шкале Bosch, или на 25,0% по отношению к $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° дымность растет до 2,6 ед. по шкале Bosch, или в 2,2 раза.

Сравнивая кривые, соответствующие работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 по ДП и на ЭТЭ на разных $\Theta_{\text{впр}}$ при $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ следует заметить, что показатели токсичности ОГ отличаются, и в закономерностях изменения имеются некоторые отличия. Концентрация NO_x в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$ ниже ДП. При $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$ значение NO_x снижается с 1100 до 657 ppm, т.е. на 40,3%. При $\Theta_{\text{впр}}=26^\circ$ значение NO_x снижается с 1320 до 730 ppm, или на 44,7%. Концентрация CH_x в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, выше ДП на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$. Применение ЭТЭ при $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$ увеличивает концентрацию CH_x с 0,108 до 0,22%, а при $\Theta_{\text{впр}}=26^\circ$ - с 0,110 до 0,20%. Величина содержания CO_2 в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, ниже ДП.

Таблица 4.5 – Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4С 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели			
	NO_x , ppm	С, ед. по шкале Bosch	CO_2 , %	СО, %
Дизельное	1100	5,8	10,9	0,21
ПГ	1450 (увеличение на 31,8%)	0,9 (снижение в 6,4 раза)	5,6 (снижение на 48,6%)	0,15 (снижение на 28,6%)
ПГ с РОГ 10%	1100 (соответствует ДП)	1,0 (снижение в 5,8 раз)	5,9 (снижение на 45,9%)	0,16 (снижение на 23,8%)
ПГ с РОГ 20%	750 (снижение на 31,8%)	1,1 (снижение в 5,3 раза)	7,0 (снижение на 35,8%)	0,18 (снижение на 14,3%)
МТЭ	775 (снижение на 29,6%)	0,9 (снижение в 6,4 раза)	9,8 (снижение на 10,1%)	0,11 (снижение на 47,6%)
ЭТЭ	657 (снижение на 40,3%)	1,2 (снижение в 4,8 раза)	8,0 (снижение на 26,6%)	0,15 (снижение на 28,6%)

Таблица 4.6 – Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4С 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели			
	NO_x , %	С, ед. по шкале Bosch	CO_2 , %	СО, %
Дизельное	1320	6,2	10,5	0,20
ПГ	1650 (увеличение на 25,0%)	1,0 (снижение в 6,2 раза)	5,5 (снижение на 47,6%)	0,12 (снижение на 40,0%)
ПГ с РОГ 10%	1300 (снижение на 1,5%)	1,1 (снижение в 5,6 раз)	5,8 (снижение на 44,8%)	0,13 (снижение на 35,0%)
ПГ с РОГ 20%	900 (снижение на 31,8%)	1,2 (снижение в 5,2 раза)	6,4 (снижение на 39,1%)	0,16 (снижение на 20,0%)
МТЭ	853 (снижение на 35,4%)	1,2 (снижение в 5,2 раза)	9,2 (снижение на 12,4%)	0,14 (снижение на 30,0%)
ЭТЭ	730 (снижение на 44,7%)	1,5 (снижение в 4,1 раза)	7,6 (снижение на 27,6%)	0,17 (снижение на 15,0%)

При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ величина CO_2 при переключении с ДП на ЭТЭ уменьшается с 10,9 до 8,0%, или на 26,6%. Увеличивая $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ CO_2 при переключении на ЭТЭ уменьшается с 10,5 до 7,6%, т.е. на 27,6%. Кривые концентрации СО в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, носят отличительный характер изменения по сравнению с ДП. Так, при установочном у.о.в.т. 29° СО больше, чем при работе по ДП, а на всех остальных исследуемых углах происходит их снижение. При $\Theta_{\text{впр}}$ равном 23 и 26° концентрация СО в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, уменьшается по отношению к ДП с 0,21 до 0,15%, т.е. на 28,6%, и с 0,20 до 0,17%, т.е. на 15,0% соответственно. Значения дымности ОГ при переключении на ЭТЭ уменьшаются. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ величина дымности ОГ уменьшается в 4,1 раза, а при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ - в 4,8 раза.

Таблица 4.7 – Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при оптимальных значениях $\Theta_{\text{впр}}$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели			
	NO_x , ppm	C, ед. по шкале Bosch	CO_2 , %	СО, %
Дизельное	1320	6,2	10,5	0,20
ПГ	1450 (увеличение на 9,9%)	0,9 (снижение в 6,9 раза)	5,6 (снижение на 46,7%)	0,15 (снижение на 25,0%)
ПГ с РОГ 10%	1100 (снижение на 16,7%)	1,0 (снижение в 6,2 раз)	5,9 (снижение на 43,8%)	0,16 (снижение на 20,0%)
ПГ с РОГ 20%	750 (снижение на 43,2%)	1,1 (снижение в 5,6 раза)	7,0 (снижение на 33,3%)	0,18 (снижение на 10,0%)
МТЭ	775 (снижение на 41,3%)	0,9 (снижение в 6,9 раза)	9,8 (снижение на 6,7%)	0,11 (снижение на 45,0%)
ЭТЭ	657 (снижение на 50,2%)	1,2 (снижение в 5,2 раза)	8,0 (снижение на 23,8%)	0,15 (снижение на 25,0%)

В результате исследований содержания вредных веществ в ОГ на номинальном режиме работы при $\Theta_{\text{впр}}$, равном 23 и 26° , и оптимальных значениях $\Theta_{\text{впр}}$ применение ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ позволяет получить следующие величины (таблицы 4.5 - 4.7).

Содержание вредных веществ в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ изображено на рисунке 4.4, б. Графические зависимости содержания вредных веществ в ОГ в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ при $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ сохраняются и для частоты вращения 1700 мин^{-1} .

Анализируя зависимости токсичных веществ в ОГ ДП, следует обратить внимание на то, что с увеличением установочного у.о.в.т. происходит рост NO_x и CH_x . Содержание оксида углерода CO и диоксида CO_2 с увеличением установочного у.о.в.т. в основном снижается, кроме $\Theta_{\text{впр}}=32^\circ$, где происходит незначительный рост CO. Значение дымности (С) ОГ минимально при $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$, а при уменьшении или увеличении этого значения возрастает. Так, содержание NO_x в ОГ дизеля при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ составляет 1050 ppm. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° значение NO_x повышается до 1100 ppm, т.е. на 4,8%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к повышению значения NO_x до 1300 ppm, т.е. на 23,8%. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение NO_x повышается до 1400 ppm, т.е. на 33,3%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение NO_x повышается до 1590 ppm, т.е. на 51,4%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° значение NO_x достигает максимума - 1900 ppm, рост равняется 80,6%. Концентрация CH_x в ОГ при $\Theta_{\text{впр}}=17^\circ$ равняется 0,080%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° повышает величину CH_x до 0,082%, или на 2,5%. Дальнейшее увеличение установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ приводит к повышению значения CH_x до 0,086%, или на 7,4%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает CH_x до 0,090%, что соответствует 12,5%. При $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ CH_x растет до 0,095%, что характеризуется 18,8%; при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$ - до 0,10%, что соответствует 25,0%. Величина CO_2 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется 10,9%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° снижает CO_2 до 10,1%, или на 7,3%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к снижению значения CO_2 до 9,6%, или на 11,9%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° снижает CO_2 до 9,1%, или на 16,5%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° снижает CO_2 до 8,8%, что соответствует 19,3%; при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$ CO_2 уменьшается до 8,4%, что характеризуется

22,9% . Концентрация СО в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется 0,18% . Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° снижает СО до 0,17% , или на 5,6% . Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к снижению значения СО до 0,16% , или на 11,1% . Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° снижает СО до 0,15% , или на 16,7% . При $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ величина СО также равняется 0,15% ; при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$ СО понижается до 0,16% , или на 11,1% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$. Уровень дымности ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ соответствует 5,9 ед. по шкале Bosch . Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° снижает дымность до 5,4 ед. по шкале Bosch , или на 8,5% . Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к снижению значения дымности до 5,1 ед. по шкале Bosch , что соответствует 13,6% . При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ уровень дымности соответствует 5,6 ед. по шкале Bosch , или на 9,8% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. При $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ дымность ОГ растет до 6,9 ед. по шкале Bosch , что соответствует 35,3% ; при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$ - растет до 9,6 ед. по шкале Bosch , или на 88,2% .

Оценивая кривые графиков по ГДП и ГДП с РОГ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ легко заметить схожесть графических зависимостей концентрации вредных веществ в ОГ с частотой вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и возрастание NO_x с увеличением $\Theta_{\text{впр}}$. Так, исследуя ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ концентрация NO_x в ОГ равняется 1430 ppm, что на 18,3% меньше ГДП и выше на 2,1% ДП. Исследования ГД с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ показывают концентрацию NO_x в ОГ 1300 ppm, что на 18,8% меньше ГДП, соответствует ДП и ниже на 9,1% работы ГД с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$. Увеличивая степень РОГ получаем большее снижение NO_x в ОГ, но это приводит к росту суммарных углеводородов по отношению к ДП.

Содержание CH_x в ОГ дизеля, работающего на ПГ и ПГ с РОГ, с ростом $\Theta_{\text{впр}}$ падает. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ уровень CH_x по ГДП с 10%-ной РОГ соответст-

вует 0,29% , что на 9,4% меньше ГДП. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ на ГДП с 10%-ной РОГ величина CH_x равняется 0,31% , что уже на 13,9% меньше ГДП. Рассмотрение ГДП с 20%-ной РОГ характеризуется большим содержанием CH_x по отношению к ГДП без РОГ. Исследования концентрации сажи в ОГ дизеля, работающего по ГДП как с РОГ, так и без нее, характеризуются незначительным изменением сажесодержания при изменении $\Theta_{\text{впр}}$. Точно также можно охарактеризовать и изменение сажесодержания, сравнивая ГДП с РОГ с ГДП без нее, чего нельзя сказать про ДП, где с ростом $\Theta_{\text{впр}}$ происходит существенное изменение дымности ОГ. В целом же при переключении с ДП на ГД с РОГ и без нее происходит уменьшение дымности ОГ (в 4...5 раз). Концентрация СО с ростом $\Theta_{\text{впр}}$ при рассмотрении ГДП с РОГ незначительно снижается. На ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ величина содержания СО выше на 9,1% ГДП и ниже в 2,7 раза ДП. Концентрация CO_2 с ростом $\Theta_{\text{впр}}$ как по ГДП, так и по ГДП с РОГ уменьшается. Исследуя ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ отметим, что величина содержания CO_2 в ОГ выше на 4,1% ГДП, ниже на 46,9% ДП и выше на 2,0% ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

Исследуя графические зависимости дизеля на МТЭ при $n=1700 \text{ мин}^{-1}$, следует выделить, что при смене $\Theta_{\text{впр}}$ содержание NO_x изменяется по зависимостям, аналогичным зависимости ДП и зависимости работы на МТЭ при $n=2200 \text{ мин}^{-1}$, то есть при увеличении угла выход NO_x возрастает. Так, содержание NO_x в ОГ дизеля при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 800 ppm. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение NO_x повышается до 839 ppm, т.е. на 4,9%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение NO_x повышается до 985 ppm, т.е. на 23,1%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение NO_x также повышается до 1100 ppm, т.е. на 37,5%. Концентрация CH_x в ОГ при $\Theta_{\text{впр}}=20^\circ$ равняется 0,12%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает значения CH_x до 0,10%, или на 16,7%. Дальнейшее увеличение установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ снижает значения CH_x до 0,08%, или на 33,3%; при росте

$\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение CH_x незначительно повышается по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ до 0,085%, т.е. на 6,3%. Концентрация CO_2 в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ равняется 9,2%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает значения CO_2 до 8,8%, или на 4,4%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° снижает значения CO_2 до 8,5%, или на 7,6%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° снижает значения CO_2 до 8,3%, или на 9,8%. Концентрация CO в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует 0,10%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° повышает значения CO до 0,105%, или на 5,0%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает значения CO до 0,12%, или на 20,0%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° повышает значения CO до 0,17%, или на 70,0%. Уровень дымности ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует 0,8 ед. по шкале Bosch. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает дымность до 0,7 ед. по шкале Bosch, или на 12,5%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает дымность снова до 0,8 ед. по шкале Bosch; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° повышает дымность до 2,4 ед. по шкале Bosch, что соответствует росту в 3,4 раза по отношению к $\Theta_{\text{впр}}=23^\circ$.

Сравнивая работу дизеля 4Ч 11,0/12,5 по ДП и на МТЭ на разных $\Theta_{\text{впр}}$ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ следует пояснить, что графические зависимости параметров токсичности дизеля, работающего на МТЭ, имеют некоторые отличия с ДП, хотя аналогичны показателям при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$. Концентрация NO_x в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$ ниже ДП. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ значение NO_x снижается с 1300 до 839 ppm, т.е. на 35,5%. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ значение NO_x снижается с 1400 до 985 ppm, т.е. на 29,6%. Влияние применения МТЭ неоднозначно сказывается на содержании углеводородов CH_x в ОГ дизеля по сравнению с ДП. Так, переключение с ДП на МТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ увеличивает значения CH_x с 0,09 до 0,10%, или на 11,1%; при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ уменьшает значения CH_x с 0,09 до 0,08%, или на 11,1%. Концентрация CO_2 в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, ниже ДП на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ значения CO_2 при переключении на МТЭ снижаются с 9,6 до 8,8%, или на 8,3%. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ значение CO_2

уменьшается с 9,1 до 8,5%, т.е. на 6,6%. Кривая содержания СО в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, носит отличительный характер изменения по сравнению с ДП. Так, при установочном у.о.в.т. 29° СО больше, чем при работе по ДП, а на всех остальных исследуемых углах происходит снижение. При $\Theta_{\text{впр}}$, равном 23° и 26° , концентрация СО в ОГ дизеля, работающего на МТЭ, падает по отношению к ДП с 0,16 до 0,105%, т.е. на 34,4%, и с 0,15 до 0,12%, что характеризуется 20,0% соответственно. Дымность ОГ при переключении с ДП на МТЭ уменьшается. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ уровень дымности падает с 5,1 до 0,7 ед. по шкале Bosch, что соответствует снижению в 7,3 раза. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ уровень дымности падает с 5,6 до 0,8 ед. по шкале Bosch, что соответствует снижению в 7,0 раз.

Анализируя кривые, соответствующие работе дизеля на ЭТЭ при $n=1700 \text{ мин}^{-1}$, следует пояснить, что содержание NO_x в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 715 ppm. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение NO_x повышается до 730 ppm, т.е. на 2,1%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение NO_x повышается до 830 ppm, т.е. на 16,1%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение NO_x продолжает повышаться до 975 ppm, т.е. на 36,4%.

Концентрация CH_x в ОГ дизеля при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует 0,24%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает величину CH_x до 0,18%, или на 25,0%. Последующее повышение установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ уменьшает значения CH_x до 0,15%, т.е. на 37,5%; при увеличении установочного у.о.в.т. до $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ значение CH_x незначительно повышается до 0,16%, т.е. на 6,7% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$. Концентрация CO_2 в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует 7,9%. Повышая $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° уровень CO_2 понижается до 7,8%, или на 1,3%. Дальнейшее повышение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° снижает величину CO_2 до 7,5%, или на 5,1%; повышение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° снижает величину CO_2 до 7,0%, или на 11,4%. Концентрация СО в ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ равняется 0,13%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° снижает уровень СО до 0,10%, или на 23,1%. Последующее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает величину СО снова до 0,13%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение СО повышается до 0,22%, т.е. в 2,2

раза по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. Уровень дымности ОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует 1,0 ед. по шкале Bosch. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° незначительно снижает дымность ОГ до 0,9 ед. по шкале Bosch, или на 10,0%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° приводит уровень дымности ОГ к величине 1,3 ед. по шкале Bosch, что соответствует росту на 44,4% по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° уровень дымности ОГ уже соответствует величине равной 2,4 ед. по шкале Bosch, что выше в 2,7 раза по отношению к $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$.

Сравнивая кривые, соответствующие работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 по ДП и на ЭТЭ на разных $\Theta_{\text{впр}}$ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, следует выделить, что показатели токсичности отличаются, и в закономерностях изменения имеются некоторые отличия, но изменения имеют сходство с частотой вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$. Концентрация NO_x в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$ ниже ДП. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ значение NO_x снижается с 1300 до 730 ppm, т.е. на 43,9%. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ значение NO_x снижается с 1400 до 830 ppm, или на 40,7%. Концентрация CH_x в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ выше ДП на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при переключении с ДП на ЭТЭ величина CH_x повышается с 0,09 до 0,18%. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ переключение на ЭТЭ увеличивает CH_x с 0,09 до 0,15%. Концентрация CO_2 в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, ниже ДП на всех исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ концентрация CO_2 при переключении с ДП на ЭТЭ уменьшается с 9,6 до 7,8%, или на 18,8%. При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ величина CO_2 при переключении на ЭТЭ уменьшается с 9,1 до 7,5%, т.е. на 17,6%. Кривая концентрации СО в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, носит отличительный характер изменения по сравнению с ДП. Так, при установочном у.о.в.т. 29° СО больше, чем при работе по ДП, а на всех остальных исследуемых углах происходит снижение. При $\Theta_{\text{впр}}$, равном 23° и 26° , концентрация СО в ОГ дизеля, работающего на ЭТЭ, падает по отношению к ДП с 0,16 до 0,10%, т.е. на 37,5%, и с 0,15 до 0,13%, т.е. на

13,3% соответственно. Значения дымности ОГ при переходе на ЭТЭ также уменьшаются.

Таблица 4.8 – Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели			
	NO _x , ppm	С, ед. по шкале Bosch	CO ₂ , %	СО, %
Дизельное	1300	5,1	9,6	0,16
ПГ	1600 (увеличение на 23,1%)	0,5 (снижение в 10,2 раза)	4,9 (снижение на 49,0%)	0,05 (снижение в 3,2 раза)
ПГ с РОГ 10%	1300 (соответствует ДП)	0,6 (снижение в 8,5 раз)	5,1 (снижение на 46,9%)	0,06 (снижение в 2,7 раза)
ПГ с РОГ 20%	915 (снижение на 29,6%)	0,7 (снижение в 7,3 раза)	6,0 (снижение на 37,5%)	0,07 (снижение в 2,3 раза)
МТЭ	839 (снижение на 35,5%)	0,5 (снижение в 10,2 раза)	8,8 (снижение на 8,3%)	0,11 (снижение на 31,3%)
ЭТЭ	730 (снижение на 43,9%)	0,9 (снижение в 5,7 раза)	7,8 (снижение на 18,8%)	0,10 (снижение на 37,5%)

Таблица 4.9 – Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели			
	NO _x , ppm	С, ед. по шкале Bosch	CO ₂ , %	СО, %
Дизельное	1400	5,6	9,1	0,15
ПГ	1750 (увеличение на 25,0%)	0,6 (снижение в 9,3 раза)	4,7 (снижение на 48,4%)	0,06 (снижение в 2,5 раза)
ПГ с РОГ 10%	1430 (увеличение на 2,1%)	0,7 (снижение в 8,0 раз)	5,0 (снижение на 45,1%)	0,07 (снижение в 2,1 раза)
ПГ с РОГ 20%	1100 (снижение на 21,4%)	0,8 (снижение в 7,0 раза)	5,8 (снижение на 63,7%)	0,08 (снижение на 46,7%)
МТЭ	985 (снижение на 29,6%)	0,8 (снижение в 7,0 раза)	8,8 (снижение на 3,3%)	0,12 (снижение на 20,0%)
ЭТЭ	830 (снижение на 40,7%)	1,3 (снижение в 4,3 раза)	7,5 (снижение на 17,6%)	0,13 (снижение на 13,3%)

Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ уровень величины дымности ОГ падает с 5,1 до 0,9 ед. по шкале Bosch, что соответствует снижению в 5,7 раза, а при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ дымность ОГ уменьшается с 5,6 до 1,3 ед. по шкале Bosch, что соответствует снижению в 4,3 раза.

Таблица 4.10 – Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при оптимальных значениях $\Theta_{\text{впр}}$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту

($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели			
	NO _x , ppm	С, ед. по шкале Bosch	CO ₂ , %	CO, %
Дизельное	1400	5,6	9,1	0,15
ПГ	1600 (увеличение на 14,3%)	0,5 (снижение в 11,2 раза)	4,9 (снижение на 46,2%)	0,05 (снижение в 3,0 раза)
ПГ с РОГ 10%	1300 (снижение на 7,1%)	0,6 (снижение в 9,3 раз)	5,1 (снижение на 44,0%)	0,06 (снижение в 2,5 раза)
ПГ с РОГ 20%	915 (снижение на 34,6%)	0,7 (снижение в 8,0 раза)	6,0 (снижение на 34,1%)	0,07 (снижение в 2,1 раза)
МТЭ	839 (снижение на 40,1%)	0,5 (снижение в 11,2 раза)	8,8 (снижение на 3,3%)	0,11 (снижение на 26,7%)
ЭТЭ	730 (снижение на 47,9%)	0,9 (снижение в 6,2 раза)	7,8 (снижение на 14,3%)	0,10 (снижение на 33,3%)

В результате исследований содержания вредных веществ в ОГ на режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту, при $\Theta_{\text{впр}}$, равном 23 и 26°, и оптимальных значениях $\Theta_{\text{впр}}$ применение ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ позволяет получить следующие величины (таблицы 4.8 - 4.10).

4.3 Результаты экспериментальных исследований экологических и эффективных показателей дизеля при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от нагрузки

Исследования нагрузочных характеристик дизеля выполнялись на двух скоростных режимах (номинальный и при максимальном крутящем моменте) при $\Theta_{\text{впр}}$, равном 23 и 26°, с целью возможности сравнения оптимальных у.о.в.т. как по ДП, так и по ГД, ГД с РОГ, СТЭ.

Характеристики мощностных и экономических параметров работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, зависящие от его нагрузки, изображены на рисунке 4.5, а. Исследуя графические зависимости ДП при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ можно выделить следующие аспекты. Рост нагрузки повышает G_T от 4,4 кг/ч при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ до 15,2 кг/ч при максимальных значениях нагрузки, равных 0,71 МПа, что характеризуется увеличением в 3,5 раза. Величина g_e с повышением нагрузки падает до момента достижения эффективным давлением номинальной величины ($p_e = 0,64 \text{ МПа}$). При $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ величина g_e соответствует 406 г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,64 \text{ МПа}$ - 243 г/(кВт·ч), что характеризуется снижением на 40,2%. Рост величины p_e от 0,64 до 0,71 МПа повышает g_e до 247 г/(кВт·ч). Значение η_e возрастает от минимальных нагрузок до $p_e = 0,64 \text{ МПа}$, а при увеличении p_e до 0,71 МПа происходит незначительное снижение. При $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ η_e равно 0,20, а при $p_e = 0,64 \text{ МПа}$ η_e повышается до 0,34, что соответствует 70,0%. Величина G_b при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ равняется 355 кг/ч, при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ падает до 325 кг/ч, что соответствует 3,0%. Величина α при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ соответствует 5,1, а при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ равняется 1,6. Снижение составляет в 3,2 раза. Увеличение p_e вызывает рост температуры ОГ. При $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ t_f составляет 230°C, а при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ увеличивается до 630°C, или в 2,7 раза.

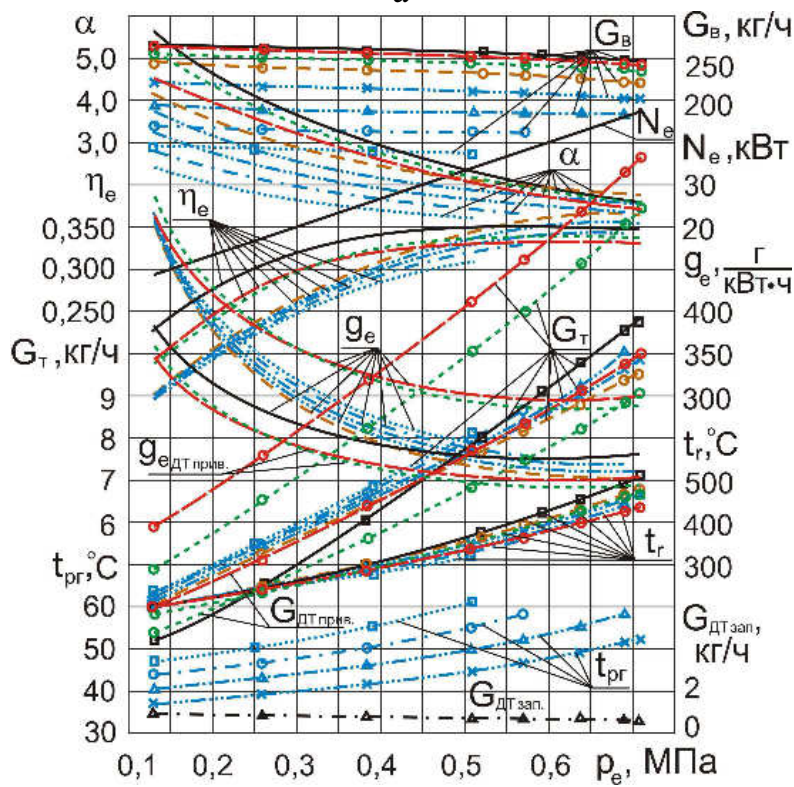
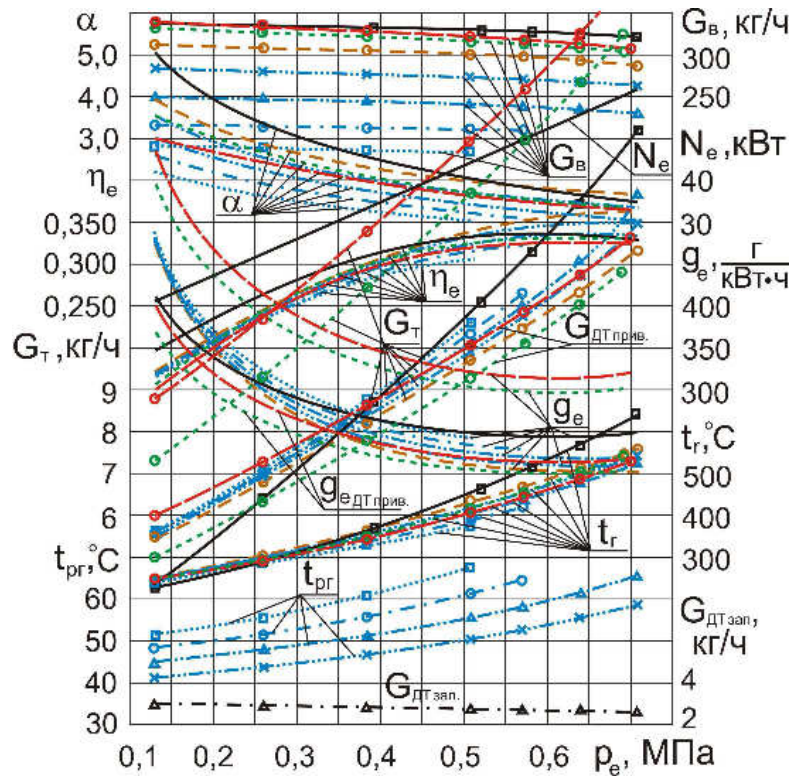


Рисунок 4.5 - Зависимости мощностных и экономических параметров дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения p_e при $\Theta_{впр} = 23^\circ$:

- а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; \blacksquare — ДП; \circ — ГДП;
- \times — ГДП с РОГ 10%; \blacktriangle — ГДП с РОГ 20%; \circ — ГДП с РОГ 30%;
- \square — ГДП с РОГ 40%; \circ — ЭТЭ; \circ — МТЭ;
- \blacktriangle — расход запального дизельного топлива

Анализируя кривые, соответствующие работе ГДП, можно отметить, что их характер протекания соответствует ДП, при этом отличаются лишь абсолютные значения. Так, применение ПГ на дизеле при сохранении значений эффективной мощности N_e приводит к снижению часового расхода воздуха G_v , часового расхода топлива G_T и α ; снижению при малых величинах p_e эффективного кпд η_e и увеличению на больших; увеличению на малых нагрузках g_e и температуры ОГ t_r , снижению их на средних и максимальных нагрузках. Использование на ГДП РОГ вызывает некоторый рост g_e , который при изменении p_e от 0,13 до 0,26 МПа составляет от 2,3 до 3,2% ($\rho=20\%$), а при $p_e = 0,64$ МПа - больше ГДП на 5,3% и на 10,3% меньше ДП. При $\rho=40\%$ в этом же диапазоне p_e от 0,13 до 0,26 МПа g_e повышается от 3,5 до 6,5%, а при $\rho=10\%$ и $p_e = 0,64$ МПа g_e больше ГДП на 2,4% и на 12,8% меньше ДП. Величина эффективного кпд η_e при $\rho=40\%$ и изменении p_e 0,13 до 0,26 МПа падает относительно чисто ГДП от 3,0 до 3,7%. При $p_e = 0,64$ МПа и $\rho=20\%$ η_e уменьшается на 6,6%. Уменьшение ρ до 10% вызывает снижение η_e всего на 3,0% по отношению к ГДП, но эта величина на 4,2% больше ДП. Значение G_T на ГДП при $\rho=20\%$ повышается на 6,4%, а при $\rho=10\%$ - на 2,7%, что на 12,5% меньше ДП. Величина t_r при исследованиях с рециркуляцией по ГДП с ростом ρ при максимальных значениях p_e несколько понижается. Значение G_v уменьшается пропорционально росту ρ . Величина t_{pr} с ростом ρ повышается и при изменении p_e от 0,13 до 0,71 МПа не выходит за границы 68°C . Повышение g_e и уменьшение η_e при исследованиях ГДП с РОГ характеризуется, прежде всего, некоторым снижением параметров процесса горения, вследствие уменьшения величин G_v и α , оказывающих непосредственное влияние на эти процессы.

Исследования дизеля на МТЭ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ показали, что графические зависимости его работы аналогичны ДП. Увеличение p_e повышает значение G_T от 8,9 кг/ч при $p_e = 0,13$ МПа до 19,3 кг/ч при $p_e = 0,70$ МПа, что характе-

ризуется ростом в 2,2 раза. Величина часового расхода дизельного топлива в составе МТЭ - $G_{\text{ДТприв.}}$ растет с повышением p_e от 6,0 кг/ч при $p_e = 0,13$ МПа до 12,8 кг/ч при $p_e = 0,70$ МПа, что соответствует увеличению в 2,1 раза. Величина g_e при повышении p_e от 0,13 до 0,64 МПа падает с 592 до 316 г/(кВт·ч), что соответствует 46,6%, затем повышается до 320 г/(кВт·ч) при достижении p_e значения 0,70 МПа. Подобной зависимостью характеризуется величина удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ - $g_{e\text{ДТприв.}}$. Так, при малом значении нагрузки, соответствующем 0,13 МПа, $g_{e\text{ДТприв.}}$ равняется 400 г/(кВт·ч), а при номинальном значении 0,64 МПа - $g_{e\text{ДТприв.}} = 213$ г/(кВт·ч). Уменьшение соответствует 46,8%. При дальнейшем повышении нагрузки до максимальных значений ($p_e = 0,70$ МПа) можно заметить незначительный рост $g_{e\text{ДТприв.}}$ до 216 г/(кВт·ч). Исследования дизеля на малых значениях p_e (0,13 МПа) показали, что величина η_e равняется 0,15, а при максимальных ($p_e = 0,70$ МПа) η_e уже равняется 0,32, повышение при этом составляет в 2,1 раза. Величина G_b при $p_e = 0,13$ МПа равняется 337 кг/ч и падает до 315 кг/ч при $p_e = 0,70$ МПа, что соответствует 22 кг/ч, т.е. 6,5%. Величина α при $p_e = 0,13$ МПа соответствует 3,0, а при $p_e = 0,70$ МПа равняется уже 1,3. Уменьшение при этом составляет в 2,3 раза. Рост p_e приводит также и к повышению температуры ОГ t_r . При $p_e = 0,13$ МПа величина t_r составляет 240°C, а при $p_e = 0,70$ МПа - 520°C, т.е. повышается в 2,2 раза.

Сравнивая эффективные параметры исследования дизеля 4Ч 11,0/12,5 по ДП и МТЭ при $n = 2200$ мин⁻¹ следует выделить сохранение мощностных показателей на МТЭ и соответствие их значениям ДП. При исследованиях на МТЭ величина G_T выше ДП. При переходе с ДП на МТЭ ($p_e = 0,13$ МПа) G_T повышается в 2,0 раза, а при нагрузке, равной 0,70 МПа, на 21,2%. Величина часового расхода дизельного топлива в составе МТЭ - $G_{\text{ДТприв.}}$ при $p_e = 0,13$ МПа растет, по отношению к ДП на 36,4%, а при повышении p_e до 0,70 МПа падает на 15,8%. Применение МТЭ вызывает рост величины g_e во всем интервале исследований p_e .

При $p_e = 0,13$ МПа этот рост соответствует 45,8% , а при $p_e = 0,64$ МПа – 30,0% . Сравнивая же значения удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ с ДП можно отметить снижение при $p_e = 0,13$ МПа на 1,5% , при $p_e = 0,64$ МПа - на 12,3% . Величина η_e на МТЭ меньше ДП на всех исследуемых значениях p_e . При $p_e = 0,13$ МПа уменьшение характеризуется 25,0% , при $p_e = 0,70$ МПа - 5,9% . Величина G_b на МТЭ незначительно повышается на малых нагрузках и снижается на средних и максимальных. Так, при $p_e = 0,13$ МПа рост характеризуется 0,6% , при $p_e = 0,70$ МПа отмечается уменьшение на 3,1% , что вероятно обуславливается наличием O_2 в дисперсной фазе МТЭ. Наличие O_2 такое же действие оказывает и на величину α . Переключение с ДП на МТЭ при $p_e = 0,13$ МПа снижает величину α на 41,2% , а при $p_e = 0,70$ МПа – на 18,8% . Применение МТЭ приводит к увеличению температуры ОГ на малых нагрузках и снижению на средних и максимальных. При $p_e = 0,13$ МПа рост соответствует 4,3% , при $p_e = 0,70$ МПа отмечено уменьшение на 17,5% .

Анализируя нагрузочные характеристики, соответствующие работе дизеля на ЭТЭ на номинальной частоте вращения необходимо отметить, что характер протекания кривых эффективных показателей аналогичен ДП при изменении их абсолютных показателей. С возрастанием среднего эффективного давления часовой расход топлива G_T повышается от 7,4 кг/ч при $p_e = 0,13$ МПа до 17,5 кг/ч при $p_e = 0,69$ МПа, следовательно увеличение составляет 10,1 кг/ч, т.е. в 2,4 раза. Следовательно, с увеличением нагрузки растет часовой расход дизельного топлива в составе ЭТЭ $G_{ДТ прив.}$ от 5,0 кг/ч при $p_e = 0,13$ МПа до 11,8 кг/ч при $p_e = 0,69$ МПа. Увеличение при этом равняется в 2,4 раза. С повышением нагрузки происходит снижение g_e . Так, при $p_e = 0,13$ МПа $g_e = 548$ г/(кВт·ч), а при номинальной нагрузке, соответствующей $p_e = 0,64$ МПа, $g_e = 297$ г/(кВт·ч). Уменьшение g_e равняется 45,8%. Дальнейшее повышение p_e до 0,69 МПа вызывает рост $g_{eЭТЭ}$ до 300 г/(кВт·ч). Соответственно изменяется и удельный эффективный расход дизельного топлива в составе ЭТЭ $g_{eДТ прив.}$. Так, при увеличении нагрузки от 0,13 до 0,64 МПа $g_{eДТ прив.}$ снижается от 370 до 200 г/(кВт·ч), или на 45,9%. При дальней-

шем повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа $g_{eДТ прив.}$ несколько увеличивается и составляет 202 г/(кВт·ч). Значение эффективного КПД η_e увеличивается с ростом нагрузки от 0,16 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,33 при $p_e = 0,69$ МПа. Увеличение составляет 0,17, или 2,1 раза. Часовой расход воздуха G_B при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) равняется 330 кг/ч и с ростом нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа уменьшается до 310 кг/ч. Снижение составляет 20 кг/ч, или 6,1%. Коэффициент избытка воздуха α при малой нагрузке, соответствующей $p_e = 0,13$ МПа, равен 3,6, а при среднем эффективном давлении равном 0,69 МПа составляет 1,4, т.е. снижается в 2,4 раза. С увеличением нагрузки увеличивается температура ОГ. Так, в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа увеличение составляет от 250 до 530°C, что соответствует увеличению в 2,1 раза.

Сравнивая эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ на номинальной частоте вращения, можно отметить, что при переходе на ЭТЭ мощностные показатели дизеля полностью сохраняются и соответствуют значениям ДП. Часовой расход топлива G_T при работе дизеля на ЭТЭ больше, чем $G_{ДТ}$ при работе по ДП. Так, при переходе с ДП на ЭТЭ при $p_e = 0,13$ МПа G_T повышается на 68,2%, а при $p_e = 0,69$ МПа - на 17,5%. Часовой расход дизельного топлива в составе ЭТЭ - $G_{ДТприв.}$ при $p_e = 0,13$ МПа повышается по сравнению с работой ДП на 13,6%, а при повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа - снижается на 22,4%. Применение ЭТЭ приводит к увеличению g_e во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это увеличение составляет 35,0%, а при $p_e = 0,64$ МПа - 22,2%. Сравнивая же значения удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ с дизельным процессом, можно отметить снижение при $p_e = 0,13$ МПа - 8,9%, а при $p_e = 0,64$ МПа - 17,7%. Значение η_e при работе на ЭТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это снижение составляет 20,0%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 2,9%. Часовой расход воздуха G_B при работе на ЭТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 1,5%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 4,6%. Снижение связано с присутствием кислорода в дисперсной фазе ЭТЭ. Присутствие кислорода таким же образом влияет и на коэффициент

избытка воздуха α . Так, при переходе на ЭТЭ при $p_e = 0,13$ МПа значение α снижается на 31,4%, а при $p_e = 0,69$ МПа – на 12,5%. Применение ЭТЭ приводит к увеличению температуры ОГ на малых нагрузках и снижению на средних и максимальных. Так, при $p_e = 0,13$ МПа рост составляет 8,7%, а при $p_e = 0,69$ МПа – снижение на 15,9%.

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном у.о.в.т. 23° и частоте вращения при максимальном крутящем моменте $n = 1700$ мин⁻¹ от изменения нагрузки представлены на рисунке 4.5, б.

Анализ кривых, соответствующих работе ДП на частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, позволяет сделать следующие выводы. При увеличении нагрузки часовой расход топлива G_T повышается от 3,2 кг/ч ($p_e = 0,13$ МПа) до 10,8 кг/ч ($p_e = 0,71$ МПа). Рост составляет в 3,4 раза. Удельный эффективный расход топлива g_e с ростом нагрузки снижается до значения, соответствующего максимальному крутящему моменту, $p_e = 0,69$ МПа, а при увеличении p_e до 0,71 МПа происходит незначительный рост. Так, при $p_e = 0,13$ МПа g_e составляет 380 г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,69$ МПа – 230 г/(кВт·ч). Снижение равняется 39,5%. Значение η_e возрастает от минимальных нагрузок до $p_e = 0,69$ МПа, а при увеличении p_e до 0,71 МПа происходит незначительное снижение. Так, при $p_e = 0,13$ МПа η_e равно 0,22, а при $p_e = 0,69$ МПа η_e повышается до 0,35, или на 59,1%. Часовой расход воздуха G_B при малом значении среднего эффективного давления ($p_e = 0,13$ МПа) составляет 270 кг/ч и снижается до 245 кг/ч при $p_e = 0,71$ МПа, или на 9,3%. Коэффициент избытка воздуха α при малой нагрузке, равной 0,13 МПа, составляет 5,6, а при максимальной, равной 0,71 МПа, уже соответствует 1,7, что ниже в 3,3 раза. При увеличении нагрузки повышается температура ОГ. Так, при $p_e = 0,13$ МПа t_r составляет 200°С, а при $p_e = 0,71$ МПа увеличивается до 505°С, или в 2,5 раза.

Анализируя кривые, соответствующие работе ГДП, можно отметить, что их характер протекания соответствует ДП, при этом отличаются лишь абсолютные значения. Так, применение ПГ на дизеле при сохранении значений эффективной

мощности приводит к снижению часового расхода воздуха, часового расхода топлива и коэффициента избытка воздуха; снижению на малых нагрузках эффективного кпд и увеличению на больших; увеличению на малых нагрузках g_e и температуры ОГ, снижению их на средних и максимальных нагрузках. При работе на ГДП с РОГ возрастает g_e . При малом эффективном давлении в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа удельный эффективный расход топлива при работе с 40%-ной РОГ возрастает на 4,0...8,0%. При работе с 20%-ной РОГ на больших нагрузках при $p_e = 0,69$ МПа g_e выше на 8,9%, а снижение степени рециркуляции до 10% приводит к росту g_e на 3,9% относительно ГДП, что на 9,6% ниже ДП. Эффективный кпд при работе на газе с 10%-ной РОГ на больших нагрузках при $p_e = 0,69$ МПа меньше на 3,5% чисто ГДП. Температура ОГ при работе с РОГ снижается незначительно. Расход воздуха снижается пропорционально увеличению степени РОГ. Температура рециркулируемых ОГ увеличивается с увеличением степени рециркуляции и во всём диапазоне изменения нагрузок при степени рециркуляции $\rho=40\%$ не превышает 62°C .

Анализ кривых при работе дизеля на МТЭ при частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, позволяет сделать следующие выводы. Характер изменения показателей аналогичен работе ДП. При увеличении нагрузки повышается G_T от 5,9 кг/ч при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) до 14,7 кг/ч при максимальных ($p_e = 0,71$ МПа). Рост составляет в 2,5 раза. При повышении нагрузки от 0,13 до 0,71 МПа происходит рост часового расхода дизельного топлива в составе МТЭ $G_{\text{ДТприв}}$ от 4,0 до 9,9 кг/ч соответственно. Повышение составляет 2,5 раза. Удельный эффективный расход топлива g_e с ростом нагрузки снижается до значения, соответствующего максимальному крутящему моменту $p_e = 0,69$ МПа. Так, при $p_e = 0,13$ МПа g_e равен 511 г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,69$ МПа $g_e = 299$ г/(кВт·ч). Снижение составляет 41,5%. Таким же образом изменяется значение удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ - $g_{\text{ДТприв}}$ с 345 до 202 г/(кВт·ч) при изменении нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа соответственно. Снижение также составляет 41,5%. Значение η_e при малой нагрузке ($p_e = 0,13$ МПа) составляет 0,19, а при нагрузке, равной 0,71 МПа, $\eta_e = 0,33$, при

этом повышение составляет 73,7%. Часовой расход воздуха G_B при малом значении среднего эффективного давления ($p_e = 0,13$ МПа) равняется 265 кг/ч и снижается до 240 кг/ч при $p_e = 0,71$ МПа, или на 9,4%. При повышении нагрузки от 0,13 до 0,71 МПа коэффициент избытка воздуха α снижается от 4,4 до 1,5, или в 2,9 раза. При увеличении нагрузки повышается температура ОГ. Так, при $p_e = 0,13$ МПа t_r составляет 200°C, а при $p_e = 0,71$ МПа - 430°C, т.е. повышается в 2,2 раза.

Сравнивая эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ на частоте вращения при максимальном крутящем моменте, можно отметить, что мощностные показатели дизеля при переходе на МТЭ полностью сохраняются и соответствуют значениям ДП. Часовой расход топлива G_T при работе дизеля на МТЭ выше ДП. Так, при переходе с ДП на МТЭ ($p_e = 0,13$ МПа) G_T повышается на 84,4%, при нагрузке, равной 0,71 МПа, на 37,0%. Часовой расход дизельного топлива в составе МТЭ - $G_{DTприв.}$ при $p_e = 0,13$ МПа повышается, по сравнению с работой ДП на 25,0%, а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа - снижается на 8,3%. Применение МТЭ приводит к увеличению g_e во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это увеличение составляет 34,5%, а при $p_e = 0,69$ МПа – 30,0%. Сравнивая же значения удельного эффективного расхода ДТ в составе МТЭ с дизельным процессом можно отметить снижение при $p_e = 0,13$ МПа – 9,2%, а при $p_e = 0,69$ МПа – 12,2%. Значение η_e при работе на МТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это снижение составляет 13,6%, а при $p_e = 0,71$ МПа - 5,7%. Часовой расход воздуха G_B при работе на МТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 1,9%, а при $p_e = 0,71$ МПа - 2,0%. Снижение связано с присутствием кислорода в дисперсной фазе МТЭ. Присутствие кислорода таким же образом влияет и на коэффициент избытка воздуха α . При переходе на МТЭ ($p_e = 0,13$ МПа) значение α уменьшается на 21,4%, а при величине нагрузки, равной 0,71 МПа, на 11,8%. Применение МТЭ приводит к снижению температуры ОГ на средних нагрузках и максимальных.

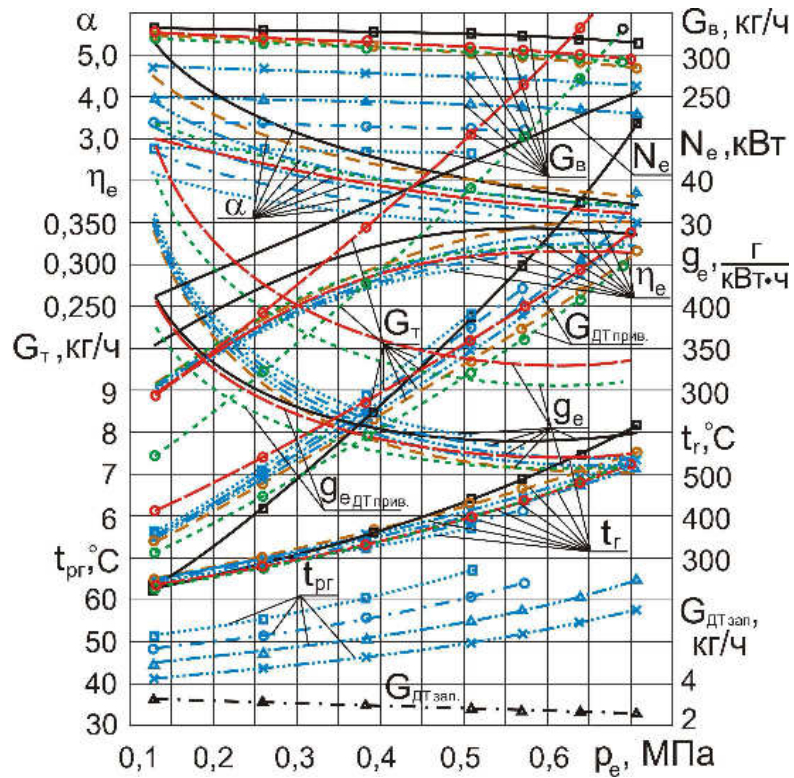
Так, при $p_e = 0,13$ МПа температура ОГ соответствует ДП, а при $p_e = 0,71$ МПа – снижается на 14,9%.

Анализируя эффективные показатели в функции от среднего эффективного давления при работе на ЭТЭ на частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, необходимо отметить, что зависимости протекания кривых в целом повторяют ДП при изменении их абсолютных показателей. С ростом среднего эффективного давления часовой расход топлива G_T увеличивается от 4,9 кг/ч при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) до 13,5 кг/ч при максимальной нагрузке ($p_e = 0,71$ МПа). Увеличение составляет в 2,8 раза. Соответственно, с увеличением нагрузки растет часовой расход дизельного топлива в составе ЭТЭ $G_{ДТ\ прив.}$ от 3,3 кг/ч при $p_e = 0,13$ МПа до 9,1 кг/ч при $p_e = 0,71$ МПа. Рост составляет в 2,8 раза. С увеличением среднего эффективного давления снижается g_e . Так, при $p_e = 0,13$ МПа $g_e = 533$ г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,69$ МПа - $g_e = 286$ г/(кВт·ч). Понижение g_e равняется 46,3%. Соответственно изменяется и удельный эффективный расход дизельного топлива в составе ЭТЭ $g_{eДТ\ прив.}$. Так, при повышении нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа $g_{eДТ\ прив.}$ снижается от 360 до 193 г/(кВт·ч), или на 46,4%. Значение эффективного КПД η_e возрастает с ростом нагрузки от 0,18 при малом значении среднего эффективного давления ($p_e = 0,13$ МПа) до 0,34 при максимальном значении ($p_e = 0,69$ МПа). Увеличение составляет 88,9%. Часовой расход воздуха G_B при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) составляет 260 кг/ч, а с ростом среднего эффективного давления до $p_e = 0,71$ МПа уменьшается до 235 кг/ч. Снижение составляет 9,6%. Коэффициент избытка воздуха α при малой нагрузке, соответствующей $p_e = 0,13$ МПа, равен 5,1, а при максимальном значении среднего эффективного давления ($p_e = 0,71$ МПа) составляет 1,6, т.е. снижается в 3,2 раза. С увеличением нагрузки увеличивается температура отработавших газов. Так, в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа увеличение составляет от 190 до 470°С, что соответствует увеличению в 2,5 раза.

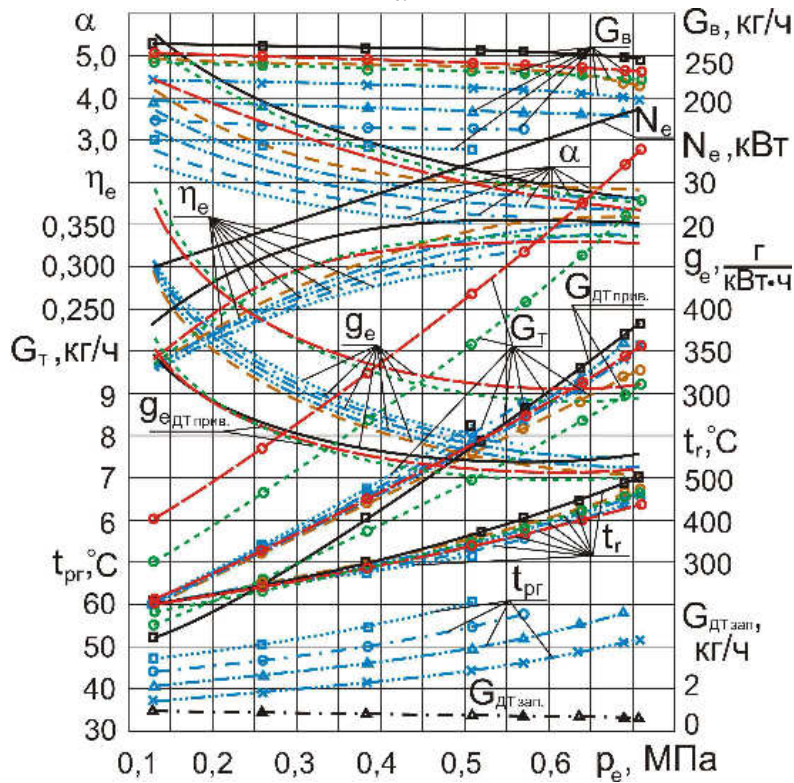
Сравнивая эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ на частоте вращения при максимальном крутящем моменте, можно отметить, что мощностные показатели дизеля при переходе на ЭТЭ

полностью сохраняются и соответствуют значениям ДП. Часовой расход топлива G_T при работе дизеля на ЭТЭ больше, чем G_{DT} при работе по ДП. Так, при переходе с ДП на ЭТЭ при $p_e = 0,13$ МПа G_T повышается на 53,1%, а при $p_e = 0,69$ МПа - на 22,4%. Часовой расход дизельного топлива в составе ЭТЭ - $G_{DTприв.}$ при $p_e = 0,13$ МПа повышается по сравнению с работой ДП на 3,1%, а при повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа - снижается на 17,8%. Применение ЭТЭ приводит к увеличению g_e во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это возрастание составляет 40,3%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 24,3%. Сравнивая же значения удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ с ДП, можно отметить снижение при $p_e = 0,13$ МПа - 5,3%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 16,1%. Значение η_e при работе на ЭТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это снижение составляет 18,2%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 2,9%. Часовой расход воздуха G_B при работе на ЭТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 3,7%, а при $p_e = 0,71$ МПа - 4,1%. Снижение связано с присутствием кислорода в дисперсной фазе ЭТЭ. Присутствие кислорода таким же образом влияет и на коэффициент избытка воздуха α . При переводе на ЭТЭ ($p_e = 0,13$ МПа) значение α понижается на 8,9%, при величине нагрузки, равной 0,71 МПа, на 5,9%. Применение ЭТЭ приводит к снижению температуры ОГ во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 5,0%, а при $p_e = 0,71$ МПа - 6,9%.

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном у.о.в.т. 26° (оптимальном для ДП) и номинальной частоте вращения $n = 2200$ мин⁻¹ от изменения нагрузки представлены на рисунке 4.6, а. Из графиков видно, что при $\Theta_{впр} = 26^\circ$ общая картина изменения показателей работы дизеля не меняется. Анализ кривых, соответствующих работе ДП на номинальной частоте вращения, позволяет сделать некоторые выводы. При повышении нагрузки с минимальной ($p_e = 0,13$ МПа) до максимальной ($p_e = 0,71$ МПа) часовой расход топлива G_T растет с 4,3 до 15,3 кг/ч соответственно. Повышается в 3,6 раза.



а



б

Рисунок 4.6 – Зависимости мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$:
 а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; \square — \square — ДП; \circ — \circ — ГДП;
 \times — \times — ГДП с РОГ 10%; \triangle — \triangle — ГДП с РОГ 20%; \circ — \circ — ГДП с РОГ 30%;
 \square — \square — ГДП с РОГ 40%; \circ — \circ — ЭТЭ; \circ — \circ — МТЭ;
 \triangle — \triangle — расход запального дизельного топлива

Удельный эффективный расход топлива g_e с ростом нагрузки снижается до значения, соответствующего номинальной нагрузке, $p_e = 0,64$ МПа. Так, при $p_e = 0,13$ МПа g_e составляет 405 г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,64$ МПа - 240 г/(кВт·ч). Снижение равняется 40,7%. При увеличении нагрузки p_e от 0,64 до 0,71 МПа g_e повышается до 249 г/(кВт·ч). Значение η_e возрастает от минимальных нагрузок до $p_e = 0,64$ МПа, а при увеличении p_e до 0,71 МПа происходит незначительное снижение. Так, при $p_e = 0,13$ МПа η_e равно 0,21, а при $p_e = 0,64$ МПа η_e повышается до 0,34, или на 61,9%. Часовой расход воздуха G_B при среднем эффективном давлении 0,13 МПа составляет 330 кг/ч и снижается до 320 кг/ч при максимальной нагрузке ($p_e = 0,71$ МПа), или на 3,0%. Коэффициент избытка воздуха α при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) равен 5,3, а при максимальных ($p_e = 0,71$ МПа) равняется 1,5. Снижение составляет 2,5 раза. При увеличении нагрузки повышается температура ОГ. Так, при $p_e = 0,13$ МПа t_r составляет 225°C, а при $p_e = 0,71$ МПа увеличивается до 610°C, или в 2,7 раза.

Анализируя кривые, соответствующие работе ГДП, можно отметить, что их характер протекания соответствует ДП, при этом отличаются лишь абсолютные значения. Так, применение ПГ на дизеле при сохранении значений эффективной мощности приводит к снижению часового расхода воздуха, часового расхода топлива и коэффициента избытка воздуха; снижению на малых нагрузках эффективного кпд и увеличению на больших; увеличению на малых нагрузках g_e и температуры ОГ, снижению их на средних и максимальных нагрузках. Применение РОГ на ГДП приводит к росту g_e . Причем, при малом эффективном давлении в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа g_e , например, при работе с 20%-ной РОГ возрастает от 2,0 до 3,0% соответственно, тогда как при номинальной нагрузке g_e выше на 5,3% ГДП, что ниже на 8,8% ДП. Применение 40%-ной РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа приводит к росту g_e от 3,5 до 4,5% соответственно. Снижение же степени рециркуляции до 10% на номинальном режиме приводит к росту g_e всего на 2,5% относительно ГДП, что на 11,3% ниже ДП. Эффективный кпд при работе на ПГ с 40%-ной РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа снижается на 3,1...3,8% относительно

чисто ГДП. При работе на номинальной нагрузке с 20%-ной РОГ η_e ниже на 7,1%. Снижение же степени рециркуляции до 10% на номинальном режиме приводит к снижению η_e на 3,1% относительно ГДП и соответствует дизельному. Часовой расход топлива на номинальном режиме при работе на газе с 20%-ной РОГ увеличивается на 5,4%, при работе с 10%-ной РОГ увеличивается на 2,7%, что ниже на 12,5% ДП. Температура ОГ при работе с РОГ снижается незначительно на больших нагрузках с увеличением степени РОГ. Расход воздуха снижается пропорционально количеству присаженных во впускной коллектор ОГ. Температура рециркулируемых ОГ увеличивается с увеличением степени рециркуляции и во всём диапазоне изменения нагрузок при степени рециркуляции $\rho=40\%$ не превышает 67°C . Рост g_e и снижение эффективного кпд при работе на ГДП с РОГ относительно чисто ГДП связаны с ухудшением процесса сгорания в результате ограниченности необходимого количества воздуха для окисления топлива.

Анализ кривых при работе дизеля на МТЭ на номинальной частоте вращения позволяет сделать следующие выводы. Характер изменения показателей аналогичен работе ДП. При увеличении нагрузки повышается часовой расход топлива G_T от 9,0 кг/ч при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) до 17,7 кг/ч при номинальной ($p_e = 0,64$ МПа), или на 96,7%. Часовой расход дизельного топлива в составе МТЭ - $G_{\text{ДТприв}}$ также повышается при увеличении нагрузки от 6,1 кг/ч при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) до 12,9 кг/ч при максимальных ($p_e = 0,70$ МПа). Увеличение составляет в 2,1 раза. Удельный эффективный расход топлива g_e с ростом нагрузки снижается до значения, соответствующего номинальной нагрузке $p_e = 0,64$ МПа. Так, при $p_e = 0,13$ МПа g_e равен 595 г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,64$ МПа g_e - 328 г/(кВт·ч). Снижение составляет 44,9%. При дальнейшем повышении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа наблюдается незначительный рост g_e до 334 г/(кВт·ч). Также при изменении нагрузки от 0,13 до 0,64 МПа изменяется значение удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ - $g_{e\text{ДТприв}}$ от 402 до 221 г/(кВт·ч) соответственно. Уменьшение составляет 45,0%. При дальнейшем повышении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа наблюдается незначительный рост $g_{e\text{ДТприв}}$ до 225 г/(кВт·ч). При малой нагрузке ($p_e = 0,13$ МПа) значение η_e составляет 0,14,

а при нагрузке, близкой к максимальной ($p_e = 0,70$ МПа), $\eta_e = 0,31$, при этом повышение составляет в 2,2 раза. Часовой расход воздуха G_B при малом значении среднего эффективного давления 0,13 МПа составляет 325 кг/ч и снижается до 295 кг/ч при $p_e = 0,70$ МПа, или на 9,2%. Коэффициент избытка воздуха α снижается с 3,0 до 1,2 при изменении нагрузки от 0,13 до 0,70 МПа соответственно. Понижение составляет в 2,5 раза. При увеличении нагрузки повышается температура ОГ. Так, при $p_e = 0,13$ МПа t_r составляет 230°C, а при $p_e = 0,70$ МПа - 515°C, т.е. повышается в 2,2 раза.

Сравнивая эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ на номинальной частоте вращения необходимо отметить, что при переходе на МТЭ мощностные показатели полностью сохраняются и соответствуют значениям ДП. Часовой расход топлива G_T при работе на МТЭ выше ДП. При переводе с ДП на МТЭ ($p_e = 0,13$ МПа) G_T повышается в 2,1 раза, при величине нагрузки, равной 0,64 МПа, на 30,6%. Часовой расход дизельного топлива в составе МТЭ - $G_{DTприв.}$ при $p_e = 0,13$ МПа повышается, по сравнению с работой ДП на 41,9%, а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа - снижается на 14,6%. Применение МТЭ приводит к увеличению g_e во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это увеличение составляет 46,9%, а при $p_e = 0,64$ МПа – 36,7%. Сравнивая же значения удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ с дизельным процессом можно отметить снижение при $p_e = 0,13$ МПа – 0,8%, а при $p_e = 0,64$ МПа – 8,8%. Значение η_e при работе на МТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это снижение составляет 33,3%, а при $p_e = 0,70$ МПа - 8,8%. При работе дизеля на МТЭ происходит и уменьшение G_B . Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 1,5%, а при $p_e = 0,70$ МПа – 7,8%. Снижение связано с присутствием кислорода в дисперсной фазе МТЭ. Присутствие кислорода таким же образом влияет и на коэффициент избытка воздуха α . Так, при переходе на МТЭ при $p_e = 0,13$ МПа значение α снижается на 43,4%, а при $p_e = 0,70$ МПа – на 20,0%. Применение МТЭ приводит к увеличению температуры ОГ на малых нагрузках и снижению на средних

и максимальных. Так, при $p_e = 0,13$ МПа увеличение составляет 2,2%, а при $p_e = 0,70$ МПа – снижение на 15,6%.

Анализируя нагрузочные характеристики, соответствующие работе дизеля на ЭТЭ на номинальной частоте вращения, можно отметить, что кривые изменения эффективных показателей аналогичны ДП при изменении их абсолютных показателей. С ростом среднего эффективного давления часовой расход топлива увеличивается от 7,5 кг/ч при малой нагрузке ($p_e = 0,13$ МПа) до 17,7 кг/ч при среднем эффективном давлении 0,69 МПа, или в 2,4 раза. С увеличением нагрузки также растет и часовой расход дизельного топлива в составе ЭТЭ $G_{\text{ДТ прив.}}$ от 5,1 до 12,0 кг/ч при изменении нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа, соответственно. Увеличение в 2,4 раза. С увеличением нагрузки уменьшается g_e . Так, при $p_e = 0,13$ МПа $g_e = 551$ г/(кВт·ч), а при номинальной нагрузке, соответствующей $p_e = 0,64$ МПа, $g_e = 305$ г/(кВт·ч). Уменьшение составило 44,7%. Соответственно изменяется и удельный эффективный расход дизельного топлива в составе ЭТЭ $g_{e\text{ДТ прив.}}$. Так, при увеличении нагрузки от 0,13 до 0,64 МПа $g_{e\text{ДТ прив.}}$ снижается от 375 до 206 г/(кВт·ч), или на 45,1%. Значение эффективного КПД η_e увеличивается с ростом нагрузки от 0,15 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,32 при $p_e = 0,69$ МПа. Увеличение составляет в 2,1 раза. Часовой расход воздуха при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) составляет 320 кг/ч, а с ростом нагрузки до 0,69 МПа G_B снижается до 290 кг/ч. Снижение составляет 9,4%. Коэффициент избытка воздуха α при малой нагрузке ($p_e = 0,13$ МПа) равен 3,4, а при среднем эффективном давлении, равном 0,69 МПа, α составляет 1,3, т.е. снижается в 2,6 раза. С повышением нагрузки увеличивается температура отработавших газов. Так, в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа увеличение составляет от 235 до 525°С, что соответствует увеличению в 2,2 раза.

Сравнивая эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ на номинальной частоте вращения, можно отметить, что мощностные показатели дизеля при переходе на ЭТЭ полностью сохраняются и соответствуют значениям ДП. Часовой расход топлива G_T при работе дизеля на ЭТЭ больше, чем $G_{\text{ДТ}}$ при работе по ДП. При переводе с ДП на ЭТЭ

($p_e = 0,13$ МПа) G_T повышается на 74,4%, при величине нагрузки, равной 0,69 МПа, на 18,0%. Часовой расход дизельного топлива в составе ЭТЭ - $G_{DTприв}$ при $p_e = 0,13$ МПа повышается по сравнению с работой ДП на 18,6%, а при повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа - снижается на 20,5%. Применение ЭТЭ приводит к увеличению g_e во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это увеличение составляет 36,1%, а при $p_e = 0,64$ МПа - 27,1%. Сравнивая же значения удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ с дизельным процессом можно отметить снижение при $p_e = 0,13$ МПа - 7,4%, а при $p_e = 0,64$ МПа - 14,2%. Значение η_e при работе на ЭТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это снижение составляет 28,6%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 5,9%. Часовой расход воздуха G_B при работе на ЭТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 3,0%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 9,4%. Снижение связано с присутствием кислорода в дисперсной фазе ЭТЭ. Присутствие кислорода таким же образом влияет и на коэффициент избытка воздуха α . Так, при переходе на ЭТЭ при $p_e = 0,13$ МПа значение α снижается на 35,8%, а при $p_e = 0,69$ МПа - на 13,3%. Применение ЭТЭ приводит к увеличению температуры ОГ на малых нагрузках и снижению на средних и максимальных. Так, при $p_e = 0,13$ МПа увеличение составляет 4,5%, а при $p_e = 0,69$ МПа - снижение на 13,9%.

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном у.о.в.т. 26° и частоте вращения при максимальном крутящем моменте $n = 1700$ мин⁻¹ от изменения нагрузки представлены на рисунке 4.6, б.

Анализ кривых, соответствующих работе по ДП на частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, позволяет сделать следующие выводы. При увеличении нагрузки часовой расход топлива повышается от 3,1 кг/ч при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) до 10,7 кг/ч при максимальных ($p_e = 0,71$ МПа). Увеличение составляет в 3,5 раза. Удельный эффективный расход топлива g_e с ростом нагрузки снижается до значения, соответствующего максимальному крутящему моменту, $p_e = 0,69$ МПа, а при увеличении p_e до 0,71 МПа

происходит незначительный рост. Так, при $p_e = 0,13$ МПа g_e составляет 348 г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,69$ МПа - 229 г/(кВт·ч). Снижение равняется 34,2%. Значение η_e возрастает от минимальных нагрузок до $p_e = 0,69$ МПа, а при увеличении p_e до 0,71 МПа происходит незначительное снижение. Так, при $p_e = 0,13$ МПа η_e равно 0,230, а при $p_e = 0,69$ МПа η_e повышается до 0,355, или на 54,3%. Часовой расход воздуха G_B при среднем эффективном давлении, равном 0,13 МПа, составляет 265 кг/ч и снижается до 243 кг/ч при $p_e = 0,71$ МПа, или на 8,3%. Коэффициент избытка воздуха α при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) равен 5,5, а при максимальных ($p_e = 0,71$ МПа) равняется 1,6, т.е. снижается в 3,4 раза. При увеличении нагрузки повышается температура ОГ. Так, при $p_e = 0,13$ МПа t_r составляет 198°C, а при $p_e = 0,71$ МПа увеличивается до 500°C, или в 2,5 раза.

Анализируя кривые, соответствующие работе ГДП, можно отметить, что характер их протекания соответствует ДП, при этом отличаются лишь абсолютные значения. Так, применение ПГ на дизеле при сохранении значений эффективной мощности приводит к снижению часового расхода воздуха, часового расхода топлива и коэффициента избытка воздуха; снижению на малых нагрузках эффективного кпд и увеличению на больших; увеличению на малых нагрузках g_e и температуры ОГ, снижению их на средних и максимальных нагрузках. При работе на ГДП с РОГ возрастает g_e . При малом эффективном давлении в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа удельный эффективный расхода топлива при работе с 40%-ной РОГ возрастает на 3,8...7,6%. При работе с 20%-ной РОГ на больших нагрузках при $p_e = 0,69$ МПа g_e выше на 6,4%, а снижение степени рециркуляции до 10% приводит к росту g_e на 3,9% относительно ГДП, что на 7,9% ниже ДП. Эффективный кпд при работе на газе с 10%-ной РОГ на больших нагрузках при $p_e = 0,69$ МПа меньше на 2,8% чисто ГДП. Температура ОГ при работе с РОГ снижается незначительно. Расход воздуха снижается пропорционально увеличению степени РОГ. Температура рециркулируемых ОГ увеличивается с увеличением степени рециркуляции и во всём диапазоне изменения нагрузок при степени рециркуляции $\rho=40\%$ не превышает 61°C.

Анализ кривых при работе дизеля на МТЭ при частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, позволяет сделать следующие выводы. Характер изменения показателей аналогичен работе ДП. При увеличении нагрузки повышается часовой расход топлива G_T от 6,0 кг/ч при $p_e = 0,13$ МПа до 14,8 кг/ч при $p_e = 0,71$ МПа. Увеличение составляет в 2,5 раза. Часовой расход дизельного топлива в составе МТЭ - $G_{ДТприв.}$ также повышается при увеличении нагрузки от 4,1 кг/ч при малом значении среднего эффективного давления 0,13 МПа до 10,0 кг/ч при максимальной нагрузке ($p_e = 0,71$ МПа). Увеличение составляет в 2,5 раза. Удельный эффективный расход топлива g_e с ростом нагрузки снижается до значения, соответствующего максимальному крутящему моменту $p_e = 0,69$ МПа. Так, при $p_e = 0,13$ МПа g_e равен 518 г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,69$ МПа g_e - 312 г/(кВт·ч). Снижение составляет 39,8%. Также изменяется значение удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ - $g_{eДТприв.}$ от 350 до 211 г/(кВт·ч) при изменении нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа соответственно. Снижение также составляет 39,7%. При $p_e = 0,13$ МПа значение η_e составляет 0,18, а при p_e , равном 0,71 МПа, $\eta_e = 0,33$, при этом повышение составляет 83,3%. Часовой расход воздуха при среднем эффективном давлении ($p_e = 0,13$ МПа) составляет 255 кг/ч и снижается до 235 кг/ч при $p_e = 0,71$ МПа, или на 7,8%. Коэффициент избытка воздуха α снижается с 4,3 до 1,4 при повышении нагрузки от 0,13 до 0,71 МПа соответственно. Уменьшение составляет в 3,1 раза. При увеличении нагрузки повышается температура ОГ. Так, при $p_e = 0,13$ МПа t_r составляет 200°C, а при $p_e = 0,71$ МПа - 425°C, т.е. повышается в 2,1 раза.

Сравнивая эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ на частоте вращения при максимальном крутящем моменте, можно отметить, что мощностные показатели дизеля при переходе на МТЭ полностью сохраняются и соответствуют значениям ДП. При работе дизеля на МТЭ часовой расход топлива G_T выше ДП. Так, при переходе с ДП на МТЭ при $p_e = 0,13$ МПа G_T повышается на 93,5%, а при $p_e = 0,71$ МПа - на 38,3%. Часовой расход дизельного топлива в составе МТЭ - $G_{ДТприв.}$ при $p_e = 0,13$ МПа повышается, по сравнению с работой ДП, на 32,3%, а при увеличении нагрузки до

$p_e = 0,71$ МПа - снижается на 6,5%. Применение МТЭ приводит к увеличению g_e во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это увеличение составляет 48,9%, а при $p_e = 0,69$ МПа – 36,2%. Сравнивая же значения удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ с дизельным процессом, можно отметить незначительное повышение при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) на 0,6%, а при $p_e = 0,69$ МПа - снижение на 7,9%. Значение η_e при работе на МТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это снижение составляет 21,7%, а при $p_e = 0,71$ МПа - 7,0%. Часовой расход воздуха G_B при работе на МТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 3,8%, а при $p_e = 0,71$ МПа - 3,3%. Снижение связано с присутствием кислорода в дисперсной фазе МТЭ. Присутствие кислорода таким же образом влияет и на коэффициент избытка воздуха α . Так, при переходе на МТЭ при $p_e = 0,13$ МПа значение α снижается на 21,8%, а при $p_e = 0,71$ МПа – на 12,5%. Применение МТЭ приводит к снижению температуры ОГ на средних нагрузках и максимальных. Так, при $p_e = 0,13$ МПа температура ОГ незначительно выше ДП, а при $p_e = 0,71$ МПа – снижается на 15,0%.

Анализируя нагрузочные характеристики при работе дизеля на ЭТЭ на частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, необходимо отметить, что зависимости изменения эффективных показателей аналогичны ДП при изменении их абсолютных показателей. С ростом p_e часовой расход топлива G_T увеличивается от 5,0 кг/ч при малых значениях среднего эффективного давления 0,13 МПа до 13,6 кг/ч при максимальных нагрузках ($p_e = 0,71$ МПа). Увеличение составляет в 2,8 раза. Соответственно, с увеличением нагрузки растет часовой расход дизельного топлива в составе ЭТЭ $G_{ДТ прив.}$ от 3,4 кг/ч при $p_e = 0,13$ МПа до 9,2 кг/ч при $p_e = 0,71$ МПа. Увеличение составляет в 2,7 раза. С повышением нагрузки происходит снижение g_e . Так, при $p_e = 0,13$ МПа $g_e = 544$ г/(кВт·ч), а при $p_e = 0,69$ МПа - g_e снижается до 290 г/(кВт·ч), или на 46,7%. Соответственно изменяется и удельный эффективный расход дизельного топлива в составе ЭТЭ $g_{eДТ прив.}$. Так, при повышении нагрузки от 0,13 до

0,69 МПа $g_{\text{едТ прив.}}$ снижается от 367 до 196 г/(кВт·ч), или на 46,6%. Эффективный кпд возрастает с повышением нагрузки от 0,17 при малом p_e , равном 0,13 МПа, до 0,34 при $p_e = 0,69$ МПа. Повышение в 2,0 раза. Часовой расход воздуха G_B при нагрузках, равных 0,13 МПа, равняется 243 кг/ч, а с повышением среднего эффективного давления до 0,71 МПа понижается до 223 кг/ч. Снижение составляет 8,2%. Коэффициент избытка воздуха α при малой нагрузке ($p_e = 0,13$ МПа) равен 5,0, а при максимальном среднем эффективном давлении ($p_e = 0,71$ МПа) составляет 1,5, т.е. снижается в 3,3 раза. С увеличением нагрузки увеличивается температура отработавших газов. Так, в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа увеличение составляет от 196 до 430°C, что соответствует увеличению в 2,2 раза.

Сравнивая эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ на частоте вращения при максимальном крутящем моменте, можно отметить, что мощностные показатели дизеля при переходе на ЭТЭ полностью сохраняются и соответствуют значениям ДП. Часовой расход топлива G_T при работе дизеля на ЭТЭ больше, чем $G_{\text{дТ}}$ при работе по ДП. При переводе с ДП на ЭТЭ ($p_e = 0,13$ МПа) G_T повышается на 61,3%, при величине нагрузки, равной 0,69 МПа, на 24,8%. Часовой расход дизельного топлива в составе ЭТЭ - $G_{\text{дТ прив.}}$ при $p_e = 0,13$ МПа повышается по сравнению с работой ДП на 9,7%, а при повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа - снижается на 17,8%. Применение ЭТЭ приводит к увеличению g_e во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это увеличение составляет 56,3%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 26,6%. Сравнивая же значения удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ с дизельным процессом, можно отметить некоторое увеличение при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) на 5,5%, а при среднем эффективном давлении 0,69 МПа - снижение на 14,4%. Значение η_e при работе на ЭТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа это снижение составляет 26,1%, а при $p_e = 0,69$ МПа - 4,2%. Часовой расход воздуха G_B при работе на ЭТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 8,3%, а при $p_e = 0,71$ МПа - 8,2%. Снижение связано с присутстви-

ем кислорода в дисперсной фазе ЭТЭ. Присутствие кислорода таким же образом влияет и на коэффициент избытка воздуха α . При переводе на ЭТЭ ($p_e = 0,13$ МПа) значение α снижается на 9,0%, при величине нагрузки, равной 0,71 МПа, на 6,3%. Применение ЭТЭ приводит к снижению температуры ОГ во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа снижение составляет 1,5%, а при $p_e = 0,71$ МПа – 14,0%.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения 2200 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. 23° (оптимальном для ГДП, ГДП с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) представлено на рисунке 4.7, а.

Анализ содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе ДП на номинальной частоте вращения, позволяет сделать следующие выводы. Содержание NO_x в ОГ при увеличении нагрузки возрастает от 260 ppm при $p_e = 0,13$ МПа до 1250 ppm при $p_e = 0,58$ МПа, т.е. в 4,8 раза. Далее происходит незначительное снижение до 1100 ppm при максимальном значении среднего эффективного давления ($p_e = 0,71$ МПа), или на 12,0%. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 3,5%, а при увеличении нагрузки до максимальной - $p_e = 0,71$ МПа, значение CO_2 повышается до 13,4%, т.е. в 3,8 раза. Наблюдается незначительное повышение суммарных углеводородов во всем диапазоне увеличения нагрузки. Так, при малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) значение CH_x составляет 0,09%, а при увеличении нагрузки до 0,71 МПа значение CH_x повышается до 0,11%. Увеличение составляет 22,2%. Содержание CO в ОГ снижается с 0,08% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,03% при $p_e = 0,38$ МПа. Снижение составляет в 2,7 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает увеличение CO до 0,33% при $p_e = 0,71$ МПа, т.е. в 11,0 раз.

Дымность ОГ (С) с увеличением нагрузки повышается. Так, при малом значении среднего эффективного давления 0,13 МПа дымность составляет 1,4 ед. по шкале Bosch, а при p_e , соответствующем 0,71 МПа, повышается до 8,4 ед. по шкале Bosch, т.е. в 6,0 раз.

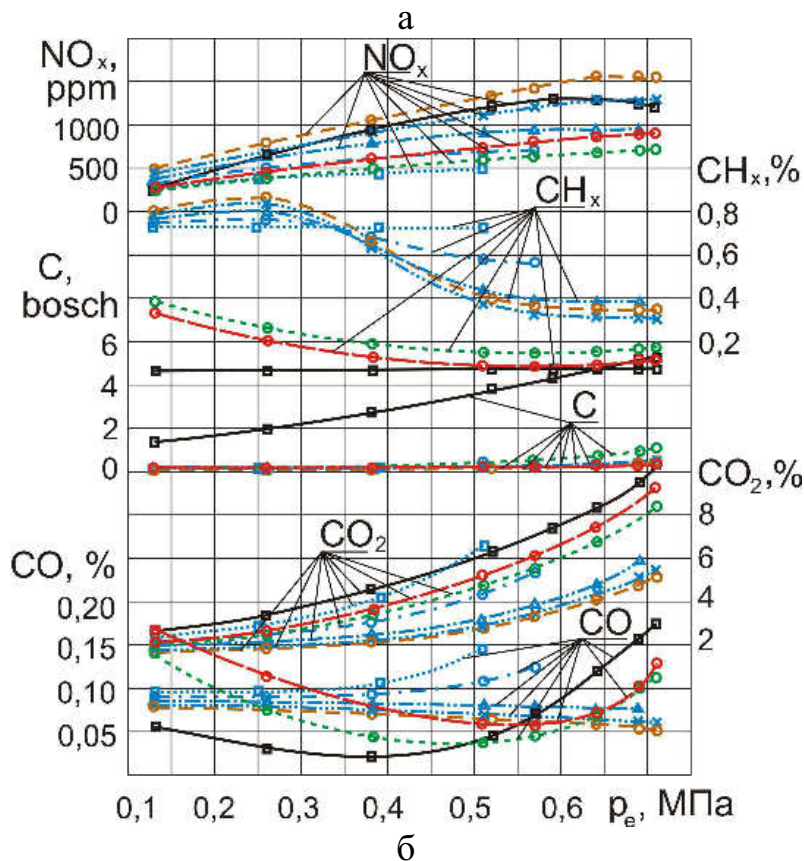
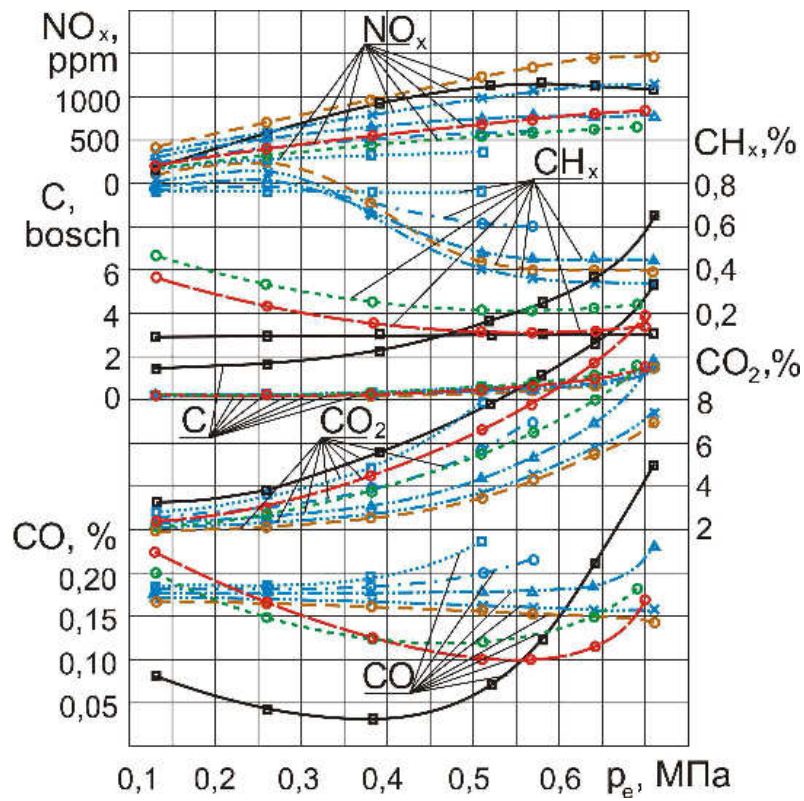


Рисунок 4.7 – Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{впр} = 23^\circ$:
 а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; \blacksquare — \square – ДП; \circ — \circ – ГДП;
 \times — \times – ГДП с РОГ 10%; \triangle — \triangle – ГДП с РОГ 20%; \circ — \circ – ГДП с РОГ 30%;
 \square — \square – ГДП с РОГ 40%; \circ — \circ – ЭТЭ; \circ — \circ – МТЭ

Из графиков видно, что применение ПГ на дизеле 4Ч 11,0/12,5 приводит к увеличению содержания NO_x в ОГ. Так, на номинальном режиме работы это увеличение составляет 31,8%, а при $p_e = 0,13$ МПа выброс NO_x увеличивается на 53,9%. Применение РОГ снижает содержание NO_x в ОГ во всём диапазоне нагрузок. При работе по ГДП с 40%-ной РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение NO_x от 1,9 до 2,6 раз по отношению к ГДП и от 19,2 до 55,0% по отношению к дизельному. При работе газодизеля на номинальном режиме с 10%-ной РОГ содержание NO_x в ОГ ниже на 24,1% ГДП и соответствует ДП.

Применение ПГ вызывает увеличение содержания суммарных углеводородов во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа увеличение CH_x составляет с 0,09 до 0,84%, а при $p_e = 0,71$ МПа увеличение составляет с 0,11 до 0,40%. Применение РОГ вызывает неоднозначное влияние на содержание суммарных углеводородов в ОГ. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ на малых нагрузках от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение CH_x от 8,7 до 14,5% по отношению к ГДП, но при $p_e = 0,51$ МПа происходит увеличение почти на 50%. При работе на номинальном режиме с 10%-ной РОГ происходит снижение CH_x на 9,9%, а при увеличении степени РОГ до 20% происходит увеличение выброса CH_x с ОГ на 12,5% относительно чисто ГДП. Существенно снижается концентрация в ОГ сажи при работе по ГДП. Так, применение ПГ с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,64$ МПа приводит к снижению содержания сажи по отношению к ДП с 5,8 до 1,0 ед. по шкале Bosch, или в 5,8 раза. Влияние РОГ на содержание сажи в ОГ газодизеля незначительное. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ на малых нагрузках увеличение сажесодержания в ОГ не превышает 5%. При работе на номинальном режиме с 10%-ной РОГ происходит увеличение выбросов сажи на 10,0%, при степени РОГ $\rho = 20\%$ – на 18,2%.

Применение ПГ с РОГ приводит к снижению CO_2 во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,26$ МПа приводит к снижению CO_2 с 3,8 до 3,4%, или на 10,5%. При работе газодизеля с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,64$ МПа приводит к снижению CO_2 с 10,9 до 5,9%, или на

45,9%. Применение ПР с РОГ вызывает увеличение СО на малых нагрузках и снижение на максимальных и близких к ним. Так, при работе газодизеля с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,64$ МПа приводит к снижению СО с 0,21 до 0,16%, или на 23,8%. Применение же РОГ на газодизеле приводит к росту СО и СО₂ во всём диапазоне изменения нагрузок. Так при работе с 40%-ной РОГ при средних нагрузках от 0,26 до 0,38 МПа рост составляет от 12,3 до 18,7% и от 50,2 до 92,0% для СО и СО₂ соответственно. При работе с 20%-ной РОГ на номинальной нагрузке рост составляет 20,0 и 25,0%, при снижении РОГ до 10% увеличение составляет 6,7 и 5,4% для СО и СО₂ соответственно. Необходимо отметить, что значительный рост суммарных углеводородов на больших нагрузках обусловлен неполнотой сгорания топлива в условиях недостатка окислителя с увеличением степени РОГ.

Применение РОГ на ГД 4Ч 11,0/12,5 позволяет эффективно уменьшить токсичность ОГ по оксидам азота. Основной вопрос, который необходимо решить при оборудовании газодизеля системой РОГ, – разработка автоматически регулируемого привода, изменяющего закон управления перепуском ОГ в зависимости от режима работы двигателя. Зависимость изменения степени РОГ от нагрузки дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе представлена на рисунке 4.8.

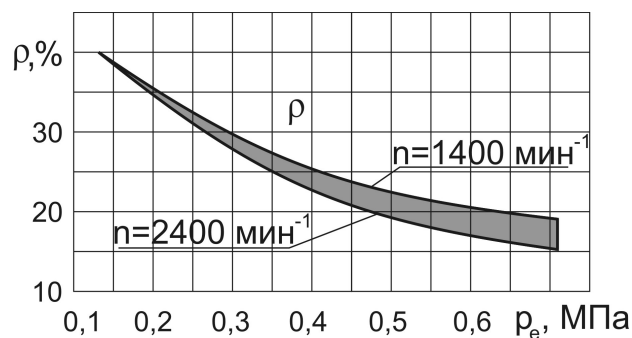


Рисунок 4.8 - Зависимость степени РОГ ГД 4Ч 11,0/12,5 от изменения нагрузки

Для всех частот вращения коленчатого вала газодизеля увеличение степени рециркуляции на различных нагрузочных режимах приводит к большему снижению концентрации оксидов азота в ОГ.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующие работе дизеля на МТЭ на номинальной частоте вращения при $\Theta_{впр} = 23^\circ$,

можно констатировать следующее. При повышении нагрузки содержание NO_x в ОГ увеличивается от 270 ppm при величине нагрузки, равной 0,13 МПа, до 775 ppm при величине нагрузки, равной 0,70 МПа, или в 2,9 раза. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,7%, а при увеличении нагрузки до 0,70 МПа значение CO_2 повышается до 12,0%, или в 4,4 раза. Содержание CH_x в ОГ снижается с 0,38% при малом значении среднего эффективного давления 0,13 МПа до 0,11% при средней нагрузке 0,57 МПа. Снижение составляет в 3,5 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает незначительное увеличение CH_x до 0,13% при $p_e = 0,70$ МПа, или на 18,2%. Содержание CO в ОГ снижается с 0,23% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,10% при $p_e = 0,57$ МПа, или в 2,3 раза. При дальнейшем увеличении нагрузки до 0,70 МПа значение CO повышается до 0,17%, или на 70,0%. Дымность ОГ с ростом нагрузки повышается. Так, при $p_e = 0,13$ МПа дымность равняется 0,1 ед. по шкале Bosch, при p_e , равном 0,70 МПа, повышается до 1,7 ед. по шкале Bosch, или в 17,0 раз.

Сравнивая кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ, необходимо отметить следующее. Содержание NO_x при работе на МТЭ ниже ДП практически во всем диапазоне изменения нагрузок, кроме $p_e = 0,13$ МПа. Так, при $p_e = 0,13$ МПа содержание NO_x в ОГ при работе на МТЭ незначительно выше на 3,8% ДП, а при дальнейшем увеличении нагрузки происходит уже значительное снижение NO_x и при $p_e = 0,70$ МПа это снижение составляет 29,6%. Содержание CO_2 в ОГ при работе на МТЭ ниже во всем диапазоне изменения нагрузок по отношению к ДП. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа концентрация CO_2 в ОГ составляет 3,5%, а при работе на МТЭ снижается до 2,7%, или на 22,9%. При $p_e = 0,70$ МПа это снижение составляет 7,7%. Применение МТЭ увеличивает содержание CH_x в ОГ. При нагрузке, равной 0,70 МПа, содержание CH_x при работе на МТЭ больше на 15,4%. Применение МТЭ приводит к снижению содержания CO в ОГ при нагрузках свыше $p_e = 0,57$ МПа и к увеличению при нагрузках, меньших этого значения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение МТЭ приводит к увеличению CO с 0,08 до

0,23%, или в 2,9 раз. При $p_e = 0,70$ МПа применение МТЭ приводит к снижению СО от 0,31 до 0,17%, или на 45,2%. Дымность ОГ (С) при работе дизеля на МТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение дымности снижается с 1,4 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. в 14,0 раз. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа значение дымности при переходе на МТЭ снижается с 7,8 до 1,7 ед. по шкале Bosch, т.е. в 4,6 раза.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующие работе дизеля на ЭТЭ на номинальной частоте вращения при $\Theta_{впр} = 23^\circ$, можно констатировать следующее. При увеличении нагрузки содержание NO_x в ОГ возрастает от 250 ppm при значении среднего эффективного давления 0,13 МПа до 715 ppm при максимальной нагрузке ($p_e = 0,69$ МПа), или в 2,9 раза. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,8%, а при повышении нагрузки до 0,69 МПа значение CO_2 повышается до 9,2%, или в 3,3 раза. Содержание CH_x в ОГ снижается с 0,44% при малой нагрузке ($p_e = 0,13$ МПа) до 0,21% при среднем эффективном давлении, равном 0,57 МПа. Уменьшение составляет в 2,1 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает незначительное увеличение CH_x до 0,23% при $p_e = 0,69$ МПа, или на 9,5%. Содержание СО в ОГ снижается с 0,20% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,12% при $p_e = 0,57$ МПа, или на 40,0%. При дальнейшем повышении нагрузки до 0,69 МПа значение СО повышается до 0,18%, или на 50,0%. Дымность ОГ с увеличением нагрузки повышается. Так, при малом значении нагрузки ($p_e = 0,13$ МПа) дымность составляет 0,1 ед. по шкале Bosch, а при нагрузке, равной 0,69 МПа, повышается до 1,9 ед. по шкале Bosch, или в 19,0 раз.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ необходимо отметить следующее. Содержание NO_x при работе на ЭТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение содержания NO_x в ОГ при переходе на ЭТЭ снижается с 260 до 250 ppm, или на 3,8%. При $p_e = 0,69$ МПа значение содержания NO_x в ОГ при переходе на ЭТЭ снижается с 1100 до 715 ppm, или на 35,0%. Содержание диоксида углерода в ОГ при работе на ЭТЭ ниже во всем

диапазоне изменения нагрузок по отношению к ДП. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа концентрация CO_2 в ОГ составляет 3,5%, а при работе на ЭТЭ снижается до 2,8%, или на 20,0%. При $p_e = 0,69$ МПа это снижение составляет 26,4%. Применение ЭТЭ приводит к снижению содержания CO в ОГ при нагрузках выше $p_e = 0,57$ МПа и к увеличению при нагрузках, меньших этого значения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение ЭТЭ приводит к увеличению CO с 0,08 до 0,20%, или в 2,5 раза. При $p_e = 0,69$ МПа применение ЭТЭ приводит к снижению CO от 0,29 до 0,18%, или на 37,9%. Дымность ОГ при работе дизеля на ЭТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение дымности снижается с 1,4 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. в 14,0 раз. При повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа значение дымности при переходе на ЭТЭ снижается с 7,7 до 1,9 ед. по шкале Bosch, т.е. в 4,1 раза.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения 1700 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. 23° представлено на рисунке 4.7, б.

Закономерности изменения содержания токсичных компонентов в ОГ в зависимости от изменения нагрузки при $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ сохраняются и для частоты вращения 1700 мин^{-1} . Анализ содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе ДП на частоте вращения при максимальном крутящем моменте, позволяет сделать следующие выводы.

Содержание NO_x в ОГ при увеличении нагрузки возрастает от 290 ppm при $p_e = 0,13$ МПа до 1300 ppm при $p_e = 0,58$ МПа, т.е. в 4,5 раза. Далее происходит незначительное снижение до 1200 ppm при максимальном значении среднего эффективного давления 0,71 МПа, или на 7,7%. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,8%, а при увеличении нагрузки до максимальной - $p_e = 0,71$ МПа, значение CO_2 повышается до 10,4%, или в 3,7 раз. Наблюдается незначительное повышение суммарных углеводородов во всем диапазоне увеличения нагрузки. Так, при малой нагрузке, равной 0,13 МПа, значение CH_x составляет 0,07%, а при увеличении нагрузки до 0,71 МПа значение CH_x повышается до 0,09%. Увеличение

составляет 28,6%. Содержание CO в ОГ снижается с 0,06 до 0,02% при повышении нагрузки от 0,13 до 0,38 МПа, соответственно. Снижение составляет ровно в 3,0 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает увеличение CO до 0,18% при $p_e = 0,71$ МПа, или в 9,0 раз. Дымность ОГ (С) с увеличением нагрузки повышается. Так, при среднем эффективном давлении ($p_e = 0,13$ МПа) дымность составляет 1,3 ед. по шкале Bosch, а при максимальной нагрузке, равной 0,71 МПа, повышается до 5,4 ед. по шкале Bosch, или в 4,2 раза.

Из графиков видно, что применение ПГ на дизеле 4Ч 11,0/12,5 приводит к увеличению содержания NO_x в ОГ. Так, при $p_e = 0,69$ МПа это увеличение составляет 23,1%, а при $p_e = 0,13$ МПа выброс NO_x увеличивается на 72,4%. Применение РОГ снижает содержание NO_x в ОГ во всём диапазоне нагрузок. При работе по ГДП с 40%-ной РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение NO_x от 2,1 до 2,7 раз. При работе газодизеля при $p_e = 0,69$ МПа с 10%-ной РОГ содержание NO_x в ОГ ниже на 18,8% ГДП и соответствует ДП. При работе газодизеля с 40%-ной РОГ на малых нагрузках от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение CH_x от 10,0 до 18,2%. При работе при $p_e = 0,69$ МПа с 10%-ной РОГ происходит снижение CH_x на 13,9%, а при увеличении степени РОГ до 20% происходит увеличение выброса CH_x с ОГ на 8,3% относительно чисто ГДП. Необходимо отметить, что рост суммарных углеводородов на больших нагрузках обусловлен неполнотой сгорания топлива в условиях недостатка окислителя с увеличением степени РОГ.

Существенно снижается содержание в ОГ сажи при работе по ГДП и ГДП с РОГ. Так, применение ПГ с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,69$ МПа приводит к снижению содержания сажи по отношению к ДП с 5,1 до 0,6 ед. по шкале Bosch, или в 8,5 раза. Влияние РОГ на содержание сажи в ОГ газодизеля незначительное. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ на малых нагрузках увеличение сажесодержания в ОГ не превышает 5%. При работе с $p_e = 0,69$ МПа с 10%-ной РОГ происходит увеличение выбросов сажи на 20,0%, при степени РОГ $\rho = 20\%$ – на 32,6%. Применение ПГ с РОГ приводит к снижению CO_2 во всем диапазоне изме-

нения нагрузок. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,26$ МПа приводит к снижению CO_2 с 3,6 до 3,0%, или на 16,7%. При работе газодизеля с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,69$ МПа приводит к снижению CO_2 с 9,6 до 5,1%, или на 46,9%. Применение ПР с РОГ вызывает увеличение СО на малых нагрузках и снижение на максимальных и близких к ним. Так, при работе газодизеля с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,69$ МПа приводит к снижению СО с 0,16 до 0,06%, или в 2,7%. Применение же РОГ на газодизеле приводит к росту СО и CO_2 во всём диапазоне изменения нагрузок. Так, при работе с 40%-ной РОГ при средних нагрузках от 0,26 до 0,38 МПа рост составляет от 20,0 до 57,1% и от 66,7 до 100,0% для СО и CO_2 соответственно.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ при работе дизеля на МТЭ на частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, при $\Theta_{впр} = 23^\circ$, можно констатировать следующее. При возрастании нагрузки содержание NO_x в ОГ повышается с 280 ppm ($p_e = 0,13$ МПа) до 839 ppm при нагрузке, равной 0,69 МПа, или в 3,0 раза. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,3%, а при повышении нагрузки до 0,69 МПа значение CO_2 повышается до 8,8%, или в 3,8 раза. Содержание CH_x в ОГ понижается с 0,34% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,09% при $p_e = 0,57$ МПа. Уменьшение в 3,8 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает незначительное увеличение CH_x до 0,10% при $p_e = 0,69$ МПа, или на 11,1%. Содержание СО в ОГ снижается с 0,17% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,06% при $p_e = 0,57$ МПа, или в 2,8 раза. При дальнейшем увеличении нагрузки до 0,69 МПа значение СО повышается до 0,105%, или на 75,0%. Дымность ОГ с ростом значений нагрузки увеличивается. При величине нагрузки, равной 0,13 МПа, дымность составляет 0,1 ед. по шкале Bosch, а при p_e , соответствующем 0,69 МПа, повышается до 0,4 ед. по шкале Bosch, что соответствует увеличению в 4,0 раза.

Сравнивая кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ, необходимо отметить следующее. Содержание NO_x при работе на МТЭ ниже ДП практически во всем диа-

пазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа содержание NO_x в ОГ при работе на МТЭ ниже всего на 3,5% ДП, а при дальнейшем повышении нагрузки происходит уже значительное снижение NO_x и при $p_e = 0,69$ МПа это снижение составляет 35,5%. Содержание CO_2 в ОГ при работе на МТЭ ниже во всем диапазоне изменения нагрузок по отношению к ДП. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа концентрация CO_2 в ОГ составляет 2,8%, а при работе на МТЭ снижается до 2,3%, или на 17,9%. При $p_e = 0,69$ МПа это снижение составляет с 9,6 до 8,8%, или 8,3%. Применение МТЭ увеличивает содержание CH_x в ОГ. При нагрузке, равной 0,69 МПа, содержание CH_x при работе на МТЭ больше на 11,1% ДП. Применение МТЭ приводит к снижению содержания CO в ОГ при нагрузках выше $p_e = 0,57$ МПа и к увеличению при нагрузках, меньших этого значения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение МТЭ приводит к увеличению CO с 0,06 до 0,17%, или в 2,8 раза. При $p_e = 0,69$ МПа применение МТЭ приводит к снижению CO от 0,16 до 0,105%, или на 34,4%. Дымность ОГ (C) при работе дизеля на МТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение дымности снижается с 1,3 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. в 13,0 раз. При повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа значение дымности при переходе на МТЭ снижается с 5,1 до 0,5 ед. по шкале Bosch, т.е. в 10,2 раза.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ при работе дизеля на ЭТЭ и частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, можно констатировать следующее. При повышении значений нагрузки содержание NO_x в ОГ увеличивается с 270 ppm ($p_e = 0,13$ МПа) до 730 ppm при величине нагрузки, равной 0,69 МПа, или в 2,7 раза. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,1%, а при повышении нагрузки до 0,69 МПа значение CO_2 повышается до 7,8%, или в 3,7 раза. Содержание CH_x в ОГ снижается с 0,39 до 0,16% при повышении нагрузки от 0,13 до 0,57 МПа соответственно. Понижение составляет в 2,4 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает незначительное увеличение CH_x до 0,18% при $p_e = 0,69$ МПа, или на 12,5%. Содержание CO в ОГ снижается с 0,14% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,03% при

$p_e = 0,57$ МПа, или в 4,7 раза. При дальнейшем увеличении нагрузки до 0,69 МПа значение СО повышается до 0,10%, или в 3,3 раза. Дымность ОГ (С) с увеличением нагрузки повышается. Так, при изменении нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа происходит повышение дымности ОГ от 0,1 до 0,9 ед. по шкале Bosch соответственно. Увеличение составляет в 9,0 раз.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ необходимо отметить следующее. Содержание NO_x при работе на ЭТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение содержания NO_x в ОГ при переходе на ЭТЭ снижается с 290 до 270 ppm, или на 6,7%. При $p_e = 0,69$ МПа значение содержания NO_x в ОГ при переходе на ЭТЭ снижается с 1300 до 730 ppm, или на 43,8%. Содержание диоксида углерода в ОГ при работе на ЭТЭ ниже во всем диапазоне изменения нагрузок по отношению к ДП. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа концентрация CO_2 в ОГ составляет 2,8%, а при работе на ЭТЭ снижается до 2,1%, или на 25,0%. При $p_e = 0,69$ МПа это снижение составляет с 9,6 до 7,8%, или на 18,8%. Применение ЭТЭ вызывает увеличение содержания CH_x в ОГ. Так, при нагрузке ($p_e = 0,13$ МПа) содержание CH_x при работе на ЭТЭ увеличивается с 0,07 до 0,39%. Применение ЭТЭ приводит к снижению содержания СО в ОГ при нагрузках свыше $p_e = 0,57$ МПа и к увеличению при нагрузках, меньших этого значения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение ЭТЭ приводит к увеличению СО с 0,06 до 0,14%, или в 2,3 раза. При $p_e = 0,69$ МПа применение ЭТЭ приводит к снижению СО от 0,16 до 0,10%, или на 37,5%. Дымность ОГ при работе дизеля на ЭТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение дымности снижается с 1,3 до 0,1 ед. по шкале Bosch, т.е. в 13,0 раз. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа значение дымности при переходе на ЭТЭ уменьшается с 5,1 до 0,9 ед. по шкале Bosch, т.е. в 5,7 раза.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения 2200 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. 26° (оптимальном для ДП) представлено на рисунке 4.9, а.

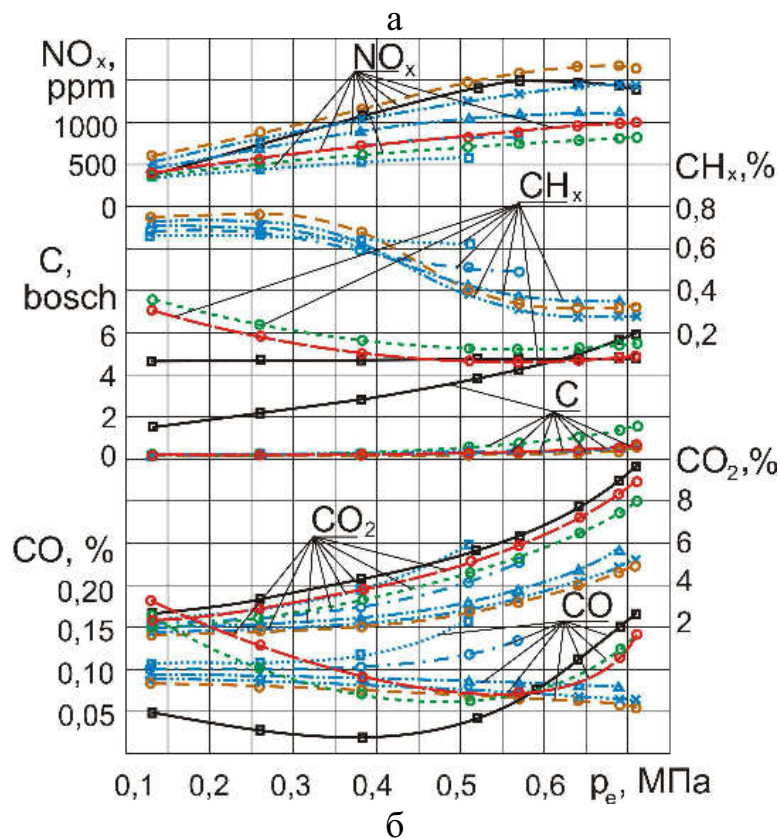
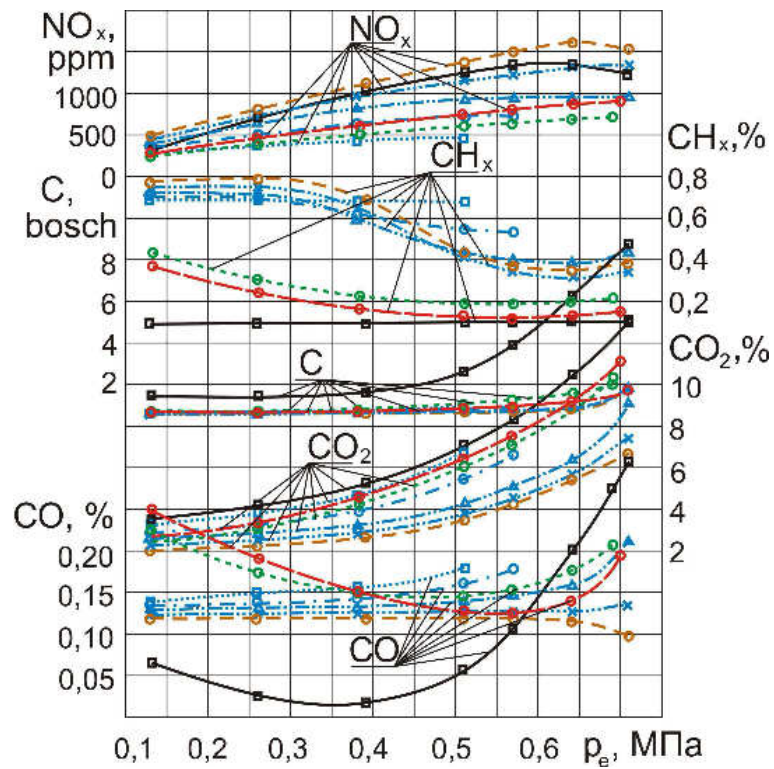


Рисунок 4.9 – Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$:

а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; \square — \square – ДП; \circ — \circ – ГДП;

\times — \times – ГДП с РОГ 10%; \triangle — \triangle – ГДП с РОГ 20%; \diamond — \diamond – ГДП с РОГ 30%;

\square — \square – ГДП с РОГ 40%; \circ — \circ – ЭТЭ; \circ — \circ – МТЭ

Анализ содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе ДП на номинальной частоте вращения, позволяет сделать следующие выводы. Содержание NO_x в ОГ при повышении нагрузки от 0,13 до 0,58 МПа возрастает от 300 до 1320 ppm, соответственно, или в 4,4 раза. Далее, при повышении нагрузки до 0,71 МПа происходит незначительное снижение до 1250 ppm, или на 5,3%. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 3,4%, а при увеличении нагрузки до максимальной - $p_e = 0,71$ МПа, значение CO_2 повышается до 12,8%, или в 3,8 раза. Наблюдается незначительное повышение суммарных углеводородов во всем диапазоне увеличения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение CH_x составляет 0,10%, а при увеличении нагрузки до 0,71 МПа значение CH_x повышается до 0,12%, т.е. на 20,0%. С повышением нагрузки от 0,13 до 0,38 МПа происходит понижение содержания СО в ОГ с 0,07 до 0,02% соответственно. Уменьшение составляет в 3,5 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает увеличение СО до 0,31% при $p_e = 0,71$ МПа, т.е. в 15,5 раз. Дымность ОГ с увеличением нагрузки повышается. Так, при повышении нагрузки от 0,13 до 0,71 МПа происходит рост дымности от 1,6 до 8,6 ед. по шкале Bosch соответственно, или в 5,4 раза.

Из графиков видно, что применение ПГ на дизеле 4Ч 11,0/12,5 приводит к увеличению содержания NO_x в ОГ. Так, на номинальном режиме работы это увеличение составляет 25,0%, а при $p_e = 0,13$ МПа выброс NO_x увеличивается на 63,3%. Применение РОГ снижает содержание NO_x в ОГ во всём диапазоне нагрузок. При работе по ГДП с 40%-ной РОГ в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение NO_x от 2,0 до 2,7 раз по отношению к ГДП и от 20,0 до 57,1% по отношению к дизельному.

При работе газодизеля на номинальном режиме с 10%-ной РОГ содержание NO_x в ОГ ниже на 20,0% ГДП и соответствует ДП. Применение ПГ вызывает увеличение содержания суммарных углеводородов во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,71$ МПа увеличение CH_x составляет с 0,11 до 0,39%. Применение же РОГ вызывает неоднозначное влияние на содержание суммарных уг-

леводородов в ОГ. Так, при работе на номинальном режиме с 10%-ной РОГ происходит снижение CH_x на 8,6% по отношению к ГДП, а при увеличении степени РОГ до 20% происходит увеличение выброса CH_x с ОГ на 11,4% относительно чисто ГДП. Существенно снижается концентрация в ОГ сажи при работе по ГДП. Так, применение ПГ с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,64$ МПа приводит к снижению содержания сажи по отношению к ДП с 6,2 до 1,2 ед. по шкале Bosch, или в 5,2 раза. Влияние РОГ на содержание сажи в ОГ газодизеля незначительное. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ на малых нагрузках увеличение сажесодержания в ОГ не превышает 5%. При работе на номинальном режиме с 10%-ной РОГ происходит увеличение выбросов сажи на 12,0%, при степени РОГ $\rho = 20\%$ – на 27,1%. Применение ПГ с РОГ приводит к снижению CO_2 во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,26$ МПа приводит к снижению CO_2 с 4,2 до 3,8%, или на 9,5%. При работе газодизеля с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,64$ МПа приводит к снижению CO_2 с 10,5 до 5,8%, или на 44,8%. Применение ПГ с РОГ вызывает увеличение СО на малых нагрузках и снижение на максимальных и близких к ним. Так, при работе газодизеля с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,64$ МПа приводит к снижению СО с 0,20 до 0,14%, или на 30,0%. Применение же РОГ на газодизеле приводит к росту СО и CO_2 во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при работе с 40%-ной РОГ при средних нагрузках от 0,26 до 0,38 МПа рост составляет от 25,0 до 33,3% и от 72,7 до 83,3% для СО и CO_2 соответственно. При работе с 20%-ной РОГ на номинальной нагрузке рост составляет 33,3 и 16,4%, при снижении РОГ до 10% увеличение составляет 8,3 и 5,5% для СО и CO_2 соответственно. Необходимо отметить, что значительный рост суммарных углеводородов на больших нагрузках обусловлен неполнотой сгорания топлива в условиях недостатка окислителя с увеличением степени РОГ.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующие работе дизеля на МТЭ на номинальной частоте вращения при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, можно констатировать следующее. При увеличении нагрузки содержание NO_x в ОГ возрастает от 280 ppm ($p_e = 0,13$ МПа) до 900 ppm ($p_e = 0,70$ МПа), или в

3,2 раза. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,6%, а при увеличении нагрузки до 0,70 МПа значение CO_2 повышается до 11,0%, или в 4,2 раза. С повышением нагрузки от 0,13 до 0,57 МПа происходит уменьшение содержания CH_x в ОГ с 0,36 до 0,12%, соответственно. Уменьшение составляет в 3,0 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает незначительное увеличение CH_x до 0,14% при $p_e = 0,70$ МПа, или на 16,7%. Содержание СО в ОГ снижается с 0,25% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,13% при $p_e = 0,57$ МПа, или в 1,9 раза. При дальнейшем увеличении нагрузки до 0,70 МПа значение СО повышается до 0,19%, или на 46,2%. С повышением нагрузки происходит рост дымности ОГ. Так, с увеличением нагрузки от 0,13 до 0,70 МПа происходит повышение дымности от 0,2 до 1,8 ед. по шкале Bosch соответственно, или в 9,0 раз.

Сравнивая кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ, необходимо отметить следующее. Содержание NO_x при работе на МТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа содержание NO_x в ОГ при работе на МТЭ ниже на 6,7% ДП, а при дальнейшем увеличении нагрузки происходит уже значительное снижение NO_x и при $p_e = 0,70$ МПа это снижение составляет 28,0%. Содержание CO_2 в ОГ при работе на МТЭ ниже во всем диапазоне изменения нагрузок по отношению к ДП. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа концентрация CO_2 в ОГ составляет 3,4%, а при работе на МТЭ снижается до 2,6%, или на 23,5%. При $p_e = 0,70$ МПа это снижение составляет 12,0%. Применение МТЭ приводит к росту значения содержания CH_x в ОГ. При величине нагрузки, равной 0,70 МПа, содержание CH_x при работе на МТЭ увеличивается на 21,5% по отношению к ДП. Применение МТЭ приводит к снижению содержания СО в ОГ при нагрузках выше $p_e = 0,57$ МПа и к увеличению при нагрузках меньших этого значения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение МТЭ приводит к увеличению СО с 0,07 до 0,25%, или в 3,6 раза. При $p_e = 0,70$ МПа применение МТЭ приводит к снижению СО от 0,9 до 0,19%, или в 2,1 раза. Дымность ОГ (С) при работе дизеля на МТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение

дымности снижается с 1,6 до 0,2 ед. по шкале Bosch, т.е. в 8,0 раз. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа значение дымности при переходе на МТЭ снижается с 8,2 до 1,9 ед. по шкале Bosch, или в 4,3 раза.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующие работе дизеля на ЭТЭ на номинальной частоте вращения при $\Theta_{впр} = 26^\circ$, можно констатировать следующее. При возрастании нагрузки содержание NO_x в ОГ возрастает от 270 ppm ($p_e = 0,13$ МПа) до 700 ppm ($p_e = 0,69$ МПа), или в 2,6 раза. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,5%, а при повышении нагрузки до 0,69 МПа значение CO_2 повышается до 10,2%, или в 4,1 раза. При повышении нагрузки от 0,13 до 0,57 МПа происходит уменьшение содержания CH_x в ОГ с 0,42 до 0,19% соответственно. Снижение в 2,2 раза. Дальнейшее повышение нагрузки вызывает незначительное увеличение CH_x до 0,21% при $p_e = 0,69$ МПа, или на 10,5%. Содержание CO в ОГ снижается с 0,23% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,14% при $p_e = 0,57$ МПа, или на 39,1%. При дальнейшем возрастании нагрузки до 0,69 МПа значение CO повышается до 0,21%, или на 50,0%. С повышением нагрузки происходит рост дымности в ОГ. Так, при повышении p_e от 0,13 до 0,69 МПа значение дымности ОГ повышается с 0,2 до 2,0 ед. по шкале Bosch соответственно, или в 10,0 раз.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ необходимо отметить следующее. Содержание NO_x при работе на ЭТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение содержания NO_x в ОГ при переходе на ЭТЭ снижается с 300 до 270 ppm, или на 10,0%. При $p_e = 0,69$ МПа значение содержания NO_x в ОГ при переходе на ЭТЭ снижается с 1260 до 730 ppm, или на 42,1%. Содержание диоксида углерода в ОГ при работе на ЭТЭ ниже во всем диапазоне изменения нагрузок по отношению к ДП. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа концентрация CO_2 в ОГ составляет 3,4%, а при работе на ЭТЭ снижается до 2,5%, или на 26,5%. При $p_e = 0,69$ МПа это снижение составляет 27,6%. Применение ЭТЭ вызывает рост содержания CH_x в ОГ. Так, применение ЭТЭ на

малых нагрузках ($p_e = 0,13$ МПа) приводит к увеличению содержания CH_x в ОГ в 4,2 раза, а при нагрузке 0,69 МПа содержание CH_x увеличивается на 47,6% по отношению к ДП. Применение ЭТЭ приводит к снижению содержания СО в ОГ при нагрузках свыше $p_e = 0,57$ МПа и к увеличению при нагрузках, меньших этого значения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение ЭТЭ приводит к увеличению СО с 0,07 до 0,23%, или в 3,3 раза. При $p_e = 0,69$ МПа применение ЭТЭ приводит к снижению СО от 0,29 до 0,21%, или на 27,6%. Дымность ОГ при работе дизеля на ЭТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение дымности снижается с 1,6 до 0,2 ед. по шкале Bosch, т.е. в 8,0 раз. При повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа значение дымности при переходе на ЭТЭ уменьшается с 8,0 до 2,0 ед. по шкале Bosch, т.е. в 4,0 раза.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения 1700 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. 26° представлено на рисунке 4.9, б. Закономерности изменения содержания токсичных компонентов в ОГ в зависимости от изменения нагрузки при $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ сохраняются и для частоты вращения 1700 мин^{-1} . Анализ содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе ДП на частоте вращения при максимальном крутящем моменте, позволяет сделать следующие выводы. Содержание NO_x в ОГ при повышении p_e растет от 330 ppm при $p_e = 0,13$ МПа до 1500 ppm при $p_e = 0,58$ МПа, т.е. в 4,5 раза. Далее при повышении нагрузки до 0,71 МПа происходит незначительное снижение до 1380 ppm, что соответствует 8,0%. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,6%, а при увеличении нагрузки до максимальной - $p_e = 0,71$ МПа, значение CO_2 повышается до 9,8%, или в 3,8 раза. Наблюдается незначительное повышение суммарных углеводородов во всем диапазоне увеличения p_e . Так, при повышении p_e от 0,13 до 0,71 МПа значений CH_x растут, соответственно, от 0,08 до 0,09%, или на 12,5%. С ростом нагрузки от 0,13 до 0,38 МПа происходит уменьшение значений СО в ОГ с 0,050 до 0,015% соответственно. Снижение в 3,3 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки до 0,71 МПа вызывает рост значений СО до 0,17%, или в 11,8 раз. Дым-

ность ОГ с увеличением нагрузки возрастает. При росте нагрузки с 0,13 до 0,71 МПа происходит повышение значений дымности от 1,5 до 6,0 ед. по шкале Bosch соответственно, или в 4,0 раза.

Из графиков видно, что применение ПГ на дизеле 4Ч 11,0/12,5 приводит к возрастанию содержания NO_x в ОГ. Так, при $p_e = 0,69$ МПа это увеличение составляет 25,0%, а при $p_e = 0,13$ МПа выброс NO_x увеличивается на 81,8%. Применение РОГ снижает содержание NO_x в ОГ во всём диапазоне нагрузок. При работе по ГДП с 40%-ной РОГ в интервале изменения нагрузки от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение NO_x в 2,1 и 1,8 раз соответственно. При работе ГД при величине нагрузки, равной 0,69 МПа, с 10%-ной РОГ содержание NO_x в ОГ меньше на 18,3% ГДП и выше всего на 2,1% дизельного. Применение ПГ вызывает увеличение содержания суммарных углеводородов во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,71$ МПа увеличение CH_x составляет с 0,09 до 0,33%. Применение РОГ вызывает неоднозначное влияние на содержание суммарных углеводородов в ОГ. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ на малых нагрузках от 0,13 до 0,26 МПа происходит снижение CH_x от 15,8 до 18,0%, но при $p_e = 0,51$ МПа происходит увеличение на 47,6%. При работе при $p_e = 0,69$ МПа с 10%-ной РОГ происходит снижение CH_x на 9,4%, а при увеличении степени РОГ до 20% происходит увеличение выброса CH_x с ОГ на 9,4% относительно чисто ГДП. Необходимо отметить, что значительный рост суммарных углеводородов на больших нагрузках обусловлен неполнотой сгорания топлива в условиях недостатка окислителя с увеличением степени РОГ. Существенно снижается содержание в ОГ сажи при работе по ГДП и ГДП с РОГ. Так, применение ПГ с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,69$ МПа приводит к снижению содержания сажи по отношению к ДП с 5,6 до 0,6 ед. по шкале Bosch, или в 9,3 раза. Влияние РОГ на содержание сажи в ОГ газодизеля незначительное. Так, при работе газодизеля с 40%-ной РОГ на малых нагрузках увеличение сажесодержания в ОГ не превышает 5%. При работе с $p_e = 0,69$ МПа с 10%-ной РОГ происходит увеличение выбросов сажи на 21,5%, при степени РОГ $\rho = 20\%$ – на 36,7%. Применение ПГ с РОГ приводит к снижению CO_2 во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при работе газодизеля

с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,26$ МПа приводит к снижению CO_2 с 3,4 до 2,9%, или на 14,7%. При работе газодизеля с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,69$ МПа приводит к снижению CO_2 с 9,1 до 5,0%, или на 45,1%. Применение ПГ с РОГ вызывает увеличение СО на малых нагрузках и снижение на максимальных и близких к ним. Так, при работе газодизеля с 10%-ной РОГ при $p_e = 0,69$ МПа приводит к снижению СО с 0,150 до 0,067%, или в 2,2%. Применение же РОГ на газодизеле приводит к росту СО и CO_2 во всём диапазоне изменения нагрузок. Так, при работе с 40%-ной РОГ при средних нагрузках от 0,26 до 0,38 МПа рост составляет от 37,5 до 60,0% и от 61,1 до 85,0% для СО и CO_2 соответственно.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ при работе дизеля на МТЭ на частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ можно констатировать следующее. При увеличении нагрузки содержание NO_x в ОГ возрастает от 290 ppm при $p_e = 0,13$ МПа до 985 ppm при $p_e = 0,69$ МПа, или в 3,4 раза. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,13$ МПа значение CO_2 составляет 2,4%, а при повышении нагрузки до 0,69 МПа значение CO_2 повышается до 8,5%, или в 3,5 раза. При увеличении нагрузки от 0,13 до 0,57 МПа происходит уменьшение значений CH_x в ОГ от 0,32 до 0,08%. Снижение составляет в 4,0 раза. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает незначительное увеличение CH_x до 0,09% при $p_e = 0,69$ МПа, или на 12,5%. Содержание СО в ОГ снижается с 0,18% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,07% при $p_e = 0,57$ МПа, или в 2,6 раза. При дальнейшем увеличении нагрузки до 0,69 МПа значение СО повышается до 0,13%, или на 85,7%. С повышением нагрузки происходит рост дымности ОГ. Так, при повышении p_e от 0,13 до 0,69 МПа значения дымности ОГ растут, соответственно, от 0,09 до 0,4 ед. по шкале Bosch, или в 4,4 раза.

Сравнивая кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ, необходимо отметить следующее. Содержание NO_x при работе на МТЭ ниже ДП практически во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа содержание NO_x в ОГ при работе на МТЭ ниже всего на 12,1% ДП, а при дальнейшем повышении нагрузки

происходит уже значительное снижение NO_x и при $p_e = 0,69$ МПа это снижение составляет 29,6%. Содержание CO_2 в ОГ при работе на МТЭ ниже во всем диапазоне изменения нагрузок по отношению к ДП. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа концентрация CO_2 в ОГ составляет 2,6%, а при работе на МТЭ снижается до 2,4%, или на 7,7%. При $p_e = 0,69$ МПа это снижение составляет с 9,1 до 8,5%, или 6,6%. Применение МТЭ неоднозначно влияет на концентрацию CH_x в ОГ. При величине нагрузки, равной 0,13 МПа, содержание CH_x на МТЭ выше ДП, а при $p_e = 0,69$ МПа содержание CH_x уже снижается на 11,1%. Применение МТЭ приводит к снижению содержания СО в ОГ при нагрузках свыше $p_e = 0,57$ МПа и к увеличению при нагрузках, меньших этого значения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение МТЭ приводит к увеличению СО с 0,05 до 0,18%, или в 3,6 раза. При $p_e = 0,69$ МПа применение МТЭ приводит к снижению СО от 0,15 до 0,12%, или на 20,0%. Дымность ОГ (С) при работе дизеля на МТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение дымности снижается с 1,5 до 0,09 ед. по шкале Bosch, т.е. в 16,7 раз. При повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа значение дымности при переходе на МТЭ снижается с 5,8 до 0,6 ед. по шкале Bosch, т.е. в 9,7 раза.

Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ при работе дизеля на ЭТЭ и частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, можно констатировать следующее. При повышении нагрузки содержание NO_x в ОГ увеличивается от 280 ppm ($p_e = 0,13$ МПа) до 830 ppm ($p_e = 0,69$ МПа), или в 3,0 раза. При увеличении нагрузки повышается и содержание CO_2 в ОГ. Так, при повышении нагрузки от 0,13 до 0,69 МПа значения CO_2 увеличиваются от 2,2 до 7,5%, или в 3,4 раза. А содержание CH_x с ростом нагрузки от 0,13 до 0,57 МПа снижается с 0,36 до 0,12%. Уменьшение в 3,0 раза. Дальнейшее повышение нагрузки вызывает незначительное увеличение CH_x до 0,16% при $p_e = 0,69$ МПа, или на 33,3%. Содержание СО в ОГ снижается с 0,17% при $p_e = 0,13$ МПа до 0,06% при $p_e = 0,57$ МПа, или в 2,8 раза. При дальнейшем повышении нагрузки до 0,69 МПа значение СО повышается до 0,13%, или в 2,2 раза. Дымность ОГ с ростом нагрузки увеличивается. При повышении нагруз-

ки с 0,13 до 0,69 МПа происходит рост значений дымности от 0,09 до 1,3 ед. по шкале Bosch соответственно, или в 14,4 раз.

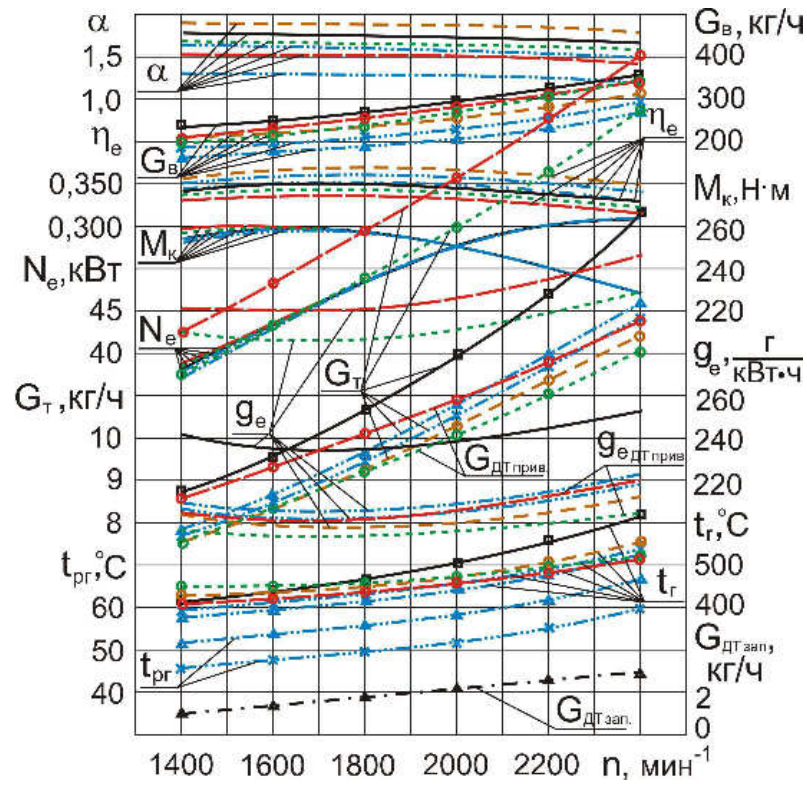
Анализируя кривые содержания токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ, необходимо отметить следующее. Содержание NO_x при работе на ЭТЭ ниже ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение содержания NO_x в ОГ при переходе на ЭТЭ снижается с 330 до 280 ppm, или на 15,2%. При $p_e = 0,69$ МПа значение содержания NO_x в ОГ при переходе на ЭТЭ снижается с 1400 до 830 ppm, или на 40,7%. Содержание диоксида углерода в ОГ при работе на ЭТЭ ниже во всем диапазоне изменения нагрузок по отношению к ДП. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа концентрация CO_2 в ОГ составляет 2,6%, а при работе на ЭТЭ снижается до 2,2%, или на 15,4%. При $p_e = 0,69$ МПа это снижение составляет с 9,1 до 7,5%, или на 17,6%. Применение ЭТЭ приводит к росту значений CH_x в ОГ. Так, при работе на ЭТЭ при малых значениях нагрузки, равных 0,13 МПа, происходит возрастание значений CH_x с 0,08 до 0,36%, а при нагрузке 0,69 МПа - значения CH_x возрастают на 66,7% по отношению к ДП. Применение ЭТЭ приводит к снижению содержания СО в ОГ при нагрузках свыше $p_e = 0,57$ МПа и к увеличению при нагрузках, меньших этого значения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение ЭТЭ приводит к увеличению СО с 0,05 до 0,17%, или в 3,4 раза. При $p_e = 0,69$ МПа применение ЭТЭ приводит к снижению СО от 0,15 до 0,13%, или на 15,4%. Дымность ОГ при работе дизеля на ЭТЭ снижается во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение дымности снижается с 1,5 до 0,09 ед. по шкале Bosch, т.е. в 13,0 раз. При повышении нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа значение дымности при переходе на ЭТЭ уменьшается с 5,6 до 1,3 ед. по шкале Bosch, т.е. в 4,3 раза.

4.4 Результаты экспериментальных исследований экологических и эффективных показателей дизеля при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от частоты вращения

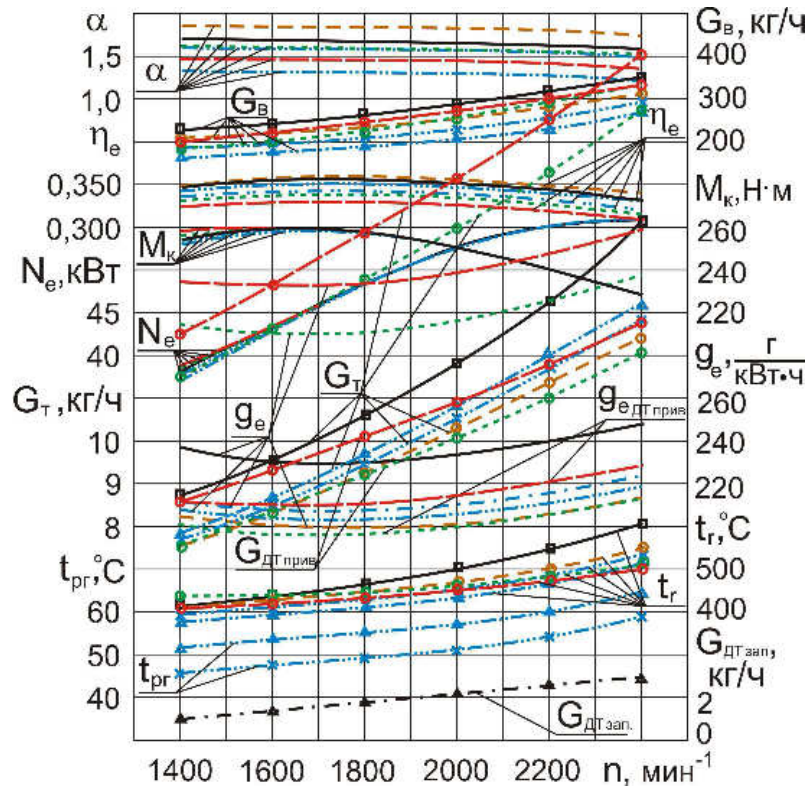
Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном у.о.в.т. 23° (оптимальном для ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) от изменения частоты вращения без регуляторной ветви представлены на рисунке 4.10, а.

Анализ кривых, соответствующих работе ДП, позволяет сделать следующие выводы [53, 54]. Увеличение частоты вращения приводит к росту G_T , N_e , G_B и температуры ОГ t_r . Так, в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ увеличение составляет - G_T от 8,8 до 15,3 кг/ч, или на 73,9%; N_e от 38 до 56 кВт, или на 47,4%; G_B от 230 до 360 кг/ч, или на 56,5%; t_r от 410 до 610°С, или на 48,8%. Значение g_e минимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 230 г/(кВт·ч).

При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ g_e увеличивается на 9,6%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ увеличение g_e составляет 4,8%. Значение эффективного КПД η_e максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 0,35. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ η_e снижается на 5,7%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение η_e составляет 2,9%. Значение крутящего момента M_k также максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 259 Н·м. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ M_k снижается на 11,2%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение M_k составляет 2,7%. Увеличение частоты вращения приводит к снижению коэффициента избытка воздуха α от 1,8 при $n = 1200$ мин⁻¹ до 1,7 при $n = 2400$ мин⁻¹, или на 5,6%. Анализируя кривые, соответствующие работе двигателя на ПГ, можно отметить, что увеличение частоты вращения приводит к росту G_T , запальной порции дизельного топлива $G_{дт}$, N_e , G_B и температуры ОГ t_r . Значение g_e минимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 198 г/(кВт·ч). Значение эффективного КПД η_e максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 0,37.



а



б

Рисунок 4.10 – Зависимость мощностных и экономические показателей дизеля 4С 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения частоты вращения коленчатого вала: а – $\Theta_{впр} = 23^\circ$; б – $\Theta_{впр} = 26^\circ$; — — — — — ДП; - - - - - ГДП; - ГД с РОГ 10%; - - - - - ГД с РОГ 20%; - - - - - ЭТЭ; - - - - - МТЭ; $\blacktriangle \cdots \blacktriangle$ – расход запального дизельного топлива

Значение крутящего момента M_k также максимально при частоте вращения 1700 мин^{-1} и составляет $259 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Коэффициент избытка воздуха α с увеличением частоты вращения незначительно снижается. Анализируя графики работы дизеля на ПГ с РОГ видно, что при работе газодизеля с 10%-ной РОГ эффективная мощность и крутящий момент остаются практически на уровне чисто ГДП. При увеличении степени рециркуляции до 20% происходит снижение эффективной мощности и крутящего момента. Так применение 20%-ной РОГ при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ приводит к падению эффективной мощности на 2,5% относительно чисто ГДП. При работе по ГДП при увеличении частоты вращения в диапазоне с 1400 до 2400 мин^{-1} g_e изменяется в пределах с 204 до 213 г/кВт·ч, при работе на ПГ с 10 и 20%-ной РОГ g_e изменяется в пределах с 207 до 218 г/кВт·ч и с 214 до 224 г/кВт·ч соответственно. Таким образом, применение 10 и 20%-ной РОГ в диапазоне n с 1400 до 2400 мин^{-1} приводит к увеличению g_e до 1,5-2,4% и до 4,9-5,2% соответственно. Значение эффективного КПД, максимум которого достигается при частоте, которая соответствует максимальному крутящему моменту, по ГДП составляет 0,37, а по газодизельному с 10 и 20%-ной РОГ – 0,36 и 0,35, что ниже на 2,7 и 5,4% соответственно. При работе газодизеля с РОГ часовой расход воздуха и α уменьшаются пропорционально увеличению степени рециркуляции. Температура ОГ при работе с рециркуляцией снижается незначительно с увеличением степени РОГ. Температура рециркулируемых ОГ при работе с 20%-ной РОГ на всех скоростных режимах не превышает 67°C .

Анализ кривых, соответствующих работе двигателя на МТЭ, позволяет сделать следующие выводы. Увеличение частоты вращения приводит к росту G_T , расхода дизельного топлива в составе МТЭ $G_{\text{ДТприв}}$, N_e , G_B и температуры ОГ t_r . Так, в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин^{-1} увеличение составляет: G_T с 12,6 до 19,0 кг/ч, или на 50,8%; $G_{\text{ДТприв}}$ с 8,5 до 12,8 кг/ч, или на 50,6%; N_e от 39 до 56 кВт, или на 43,6%; G_B от 210 до 340 кг/ч, или на 61,9%; t_r от 410 до 510°C , или на 24,4%. Значения g_e и удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ $g_{e\text{ДТприв}}$ минимальны при частоте вращения 1700 мин^{-1} и составляют 299 и 202 г/(кВт·ч) соответственно. При увеличении частоты вращения до

2400 мин⁻¹ g_e увеличивается на 9,0%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ увеличение g_e составляет 1,0%. Значение эффективного КПД η_e максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 0,33. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ η_e снижается на 4,6%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение η_e составляет 0,6%. Значение крутящего момента M_k также максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 259 Н·м. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ M_k снижается на 11,2%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение M_k незначительное. Увеличение частоты вращения приводит к снижению коэффициента избытка воздуха α от 1,6 при $n = 1400$ мин⁻¹ до 1,4 при $n = 2400$ мин⁻¹, или на 12,5%.

Сравнивая эффективные показатели дизеля при работе по ДП и на МТЭ, можно отметить, что в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ применение МТЭ приводит к увеличению G_T на 43,2 и 24,2%; g_e на 25,3 и 29,4% соответственно. В этом же диапазоне частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ применение МТЭ приводит к снижению α на 11,1 и 17,7%; G_B на 8,7 и 5,6%; $G_{ДТприв}$ на 3,4 и 16,3%; $g_{eДТприв}$ на 15,4 и 12,7%; η_e на 3,5 и 4,6% соответственно. Здесь можно отметить, что снижение часового расхода воздуха обусловлено присутствием в молекулах МТЭ дополнительного атома кислорода. Значения крутящего момента и эффективной мощности при частоте вращения 2400 мин⁻¹ соответствуют ДП, а при $n = 1400$ мин⁻¹ незначительно возрастают. Температура ОГ при частоте вращения 1400 мин⁻¹ соответствует ДП, а при $n = 2400$ мин⁻¹ снижается на 16,4%.

Анализ кривых, соответствующих работе двигателя на ЭТЭ, позволяет сделать следующие выводы. Увеличение частоты вращения приводит к росту G_T , расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ $G_{ДТприв}$, N_e , G_B и температуры ОГ t_r . Так, в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ увеличение составляет: G_T с 11,4 до 17,8 кг/ч, или на 56,1%; $G_{ДТприв}$ с 7,7 до 12,0 кг/ч, или на 55,8%; N_e от 38,5 до 56 кВт, или на 45,5%; G_B от 200 до 340 кг/ч, или на 70,0%; t_r от 450 до 505°С, или на 12,2%. Значения g_e и удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ $g_{eДТприв}$ минимальны при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляют 286 и 193 г/(кВт·ч) соответственно. При увеличении частоты вращения до

2400 мин⁻¹ g_e увеличивается на 7,7%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ увеличение g_e составляет 1,4%. Значение эффективного КПД η_e максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 0,34. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ η_e снижается на 5,9%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение η_e составляет 1,5%. Значение крутящего момента M_k также максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 259 Н·м. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ M_k снижается на 11,2%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение M_k незначительное. Увеличение частоты вращения приводит к снижению коэффициента избытка воздуха α от 1,7 при $n = 1400$ мин⁻¹ до 1,6 при $n = 2400$ мин⁻¹, или на 5,9%.

Сравнивая эффективные показатели дизеля при работе по ДП и на ЭТЭ, можно отметить, что в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ применение ЭТЭ приводит к увеличению G_T на 29,6 и 16,3%; g_e на 20,3 и 22,2% соответственно. В этом же диапазоне частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ применение ЭТЭ приводит к снижению α на 5,6 и 5,9%; G_B на 13,0 и 5,6%; $G_{ДТприв}$ на 12,5 и 21,6%; $g_{eДТприв}$ на 18,7 и 19,1%; η_e на 1,5 и 3,0% соответственно. Значения крутящего момента и эффективной мощности при частоте вращения 2400 мин⁻¹ соответствуют ДП, а при $n = 1400$ мин⁻¹ незначительно возрастают. Температура ОГ при частоте вращения 1400 мин⁻¹ на 8,9% превышает ДП, а при $n = 2400$ мин⁻¹ снижается на 17,2%.

Зависимости мощностных и экономических показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном у.о.в.т. 26° (оптимальном для ДП) от изменения частоты вращения без регуляторной ветви представлены на рисунке 4.10, б.

Из графиков видно, что общая картина изменения эффективных показателей работы дизеля не изменилась при их различных абсолютных числовых значениях. Анализ кривых, соответствующих работе ДП, позволяет сделать следующие выводы. Увеличение частоты вращения приводит к росту G_T , N_e , G_B и температуры ОГ t_r . Так, в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ увеличение составляет: G_T от 8,8 до 15,1 кг/ч, или на 71,6%; N_e от 38 до 56 кВт, или на 47,4%; G_B от 220 до 350 кг/ч, или на 59,1%; t_r от 405 до 605°С, или на 49,4%. Значе-

ние g_e минимально при частоте вращения 1700 мин^{-1} и составляет 228 г/(кВт·ч) . При увеличении частоты вращения до 2400 мин^{-1} g_e увеличивается на $9,7\%$, а при снижении частоты вращения до 1400 мин^{-1} увеличение g_e составляет $4,4\%$. Значение эффективного кпд η_e максимально при частоте вращения 1700 мин^{-1} и составляет $0,36$. При увеличении частоты вращения до 2400 мин^{-1} η_e снижается на $8,3\%$, а при снижении частоты вращения до 1400 мин^{-1} уменьшение η_e составляет $2,8\%$. Значение крутящего момента M_k также максимально при частоте вращения 1700 мин^{-1} и составляет 260 Н·м . При увеличении частоты вращения до 2400 мин^{-1} M_k снижается на $11,2\%$, а при снижении частоты вращения до 1400 мин^{-1} уменьшение M_k составляет $2,7\%$. Увеличение частоты вращения приводит к снижению коэффициента избытка воздуха α от $1,7$ при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до $1,6$ при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на $5,9\%$.

Анализируя кривые, соответствующие работе двигателя на ПГ, можно отметить, что увеличение частоты вращения приводит к росту G_T , запальной порции дизельного топлива $G_{ДТ}$, N_e , G_B и температуры ОГ t_r . Значение g_e минимально при частоте вращения 1700 мин^{-1} и составляет 199 г/(кВт·ч) . Значение эффективного кпд η_e максимально при частоте вращения 1700 мин^{-1} и составляет $0,37$. Значение крутящего момента M_k также максимально при частоте вращения 1700 мин^{-1} и составляет 260 Н·м . Коэффициент избытка воздуха α с увеличением частоты вращения незначительно снижается. Анализируя графики работы дизеля на ПГ с РОГ, видно, что при работе газодизеля с 10% -ной РОГ эффективная мощность и крутящий момент остаются практически на уровне чисто ГДП. При увеличении степени рециркуляции до 20% происходит снижение эффективной мощности и крутящего момента. Так, применение 20% -ной РОГ при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ приводит к падению эффективной мощности на $2,6\%$ относительно чисто ГДП. При работе по ГДП при увеличении частоты вращения в диапазоне с 1400 до 2400 мин^{-1} g_e изменяется в пределах с 205 до 214 г/кВт·ч , при работе на ПГ с 10 и 20% -ной РОГ g_e изменяется в пределах с 208 до 219 г/кВт·ч и с 215 до 225 г/кВт·ч соответственно. Таким образом, применение 10 и 20% -ной РОГ в диапазоне n с 1400 до 2400 мин^{-1} приводит к увеличению g_e на $1,5-2,3\%$ и $4,9-5,1\%$ соответственно. Значение эффективного кпд, максимум которого достигается при частоте, которая соответствует

максимальному крутящему моменту, по ГДП составляет 0,37, а по газодизельному с 10 и 20%-ной РОГ – 0,35 и 0,34, что ниже на 5,4 и 8,1% соответственно. При работе газодизеля с РОГ часовой расход воздуха и α уменьшаются пропорционально увеличению степени рециркуляции. Температура ОГ при работе с рециркуляцией снижается незначительно с увеличением степени РОГ. Температура рециркулируемых ОГ при работе с 20%-ной РОГ на всех скоростных режимах не превышает 65°C.

Анализ кривых, соответствующих работе двигателя на МТЭ, позволяет сделать следующие выводы. Увеличение частоты вращения приводит к росту G_T , расхода дизельного топлива в составе МТЭ $G_{ДТприв}$, N_e , G_B и температуры ОГ t_r . Так, в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ увеличение составляет: G_T с 12,6 до 19,1 кг/ч, или на 51,6%; $G_{ДТприв}$ с 8,5 до 12,9 кг/ч, или на 51,8%; N_e от 39 до 56 кВт, или на 43,6%; G_B от 200 до 330 кг/ч, или на 65,0%; t_r от 405 до 500°C, или на 23,5%. Значения g_e и удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе МТЭ $g_{eДТприв}$ минимальны при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляют 312 и 211 г/(кВт·ч) соответственно. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ g_e увеличивается на 8,3%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ увеличение g_e составляет 1,3%. Значение эффективного КПД η_e максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 0,328. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ η_e снижается на 5,5%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение η_e составляет 0,9%. Значение крутящего момента M_k также максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 260 Н·м. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ M_k снижается на 11,2%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение M_k незначительное. Увеличение частоты вращения приводит к снижению коэффициента избытка воздуха α от 1,4 при $n=1400$ мин⁻¹ до 1,3 при $n=2400$ мин⁻¹, или на 7,1%.

Сравнивая эффективные показатели дизеля при работе по ДП и на МТЭ, можно отметить, что в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ применение МТЭ приводит к увеличению G_T на 43,2 и 26,5%; g_e на 32,8 и 35,2% соответственно. В этом же диапазоне частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ приме-

нение МТЭ приводит к снижению α на 17,7 и 18,8%; G_B на 9,1 и 5,7%; $G_{ДТприв}$ на 3,4 и 14,6%; $g_{eДТприв}$ на 10,5 и 18,8%; η_e на 7,1 и 6,1% соответственно. Здесь можно отметить, что снижение часового расхода воздуха обусловлено присутствием в молекулах МТЭ дополнительного атома кислорода. Значения крутящего момента и эффективной мощности при частоте вращения 2400 мин⁻¹ соответствуют ДП, а при $n = 1400$ мин⁻¹ незначительно возрастают. Температура ОГ при частоте вращения 1400 мин⁻¹ соответствует ДП, а при $n = 2400$ мин⁻¹ снижается на 17,4%.

Анализ кривых, соответствующих работе двигателя на ЭТЭ, позволяет сделать следующие выводы. Увеличение частоты вращения приводит к росту G_T , расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ $G_{ДТприв}$, N_e , G_B и температуры ОГ t_r . Так, в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ увеличение составляет: G_T с 11,4 до 17,9 кг/ч, или на 57,0%; $G_{ДТприв}$ с 7,7 до 12,1 кг/ч, или на 57,1%; N_e от 38,5 до 56 кВт, или на 45,5%; G_B от 190 до 330 кг/ч, или на 73,7%; t_r от 440 до 500,°С, или на 13,6%. Значения g_e и удельного эффективного расхода дизельного топлива в составе ЭТЭ $g_{eДТприв}$ минимальны при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляют 290 и 196 г/(кВт·ч) соответственно. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ g_e увеличивается на 9,3%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ увеличение g_e составляет 2,1%. Значение эффективного КПД η_e максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 0,335. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ η_e снижается на 4,5%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение η_e составляет 1,5%. Значение крутящего момента M_k также максимально при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и составляет 260 Н·м. При увеличении частоты вращения до 2400 мин⁻¹ M_k снижается на 11,2%, а при снижении частоты вращения до 1400 мин⁻¹ уменьшение M_k незначительное. Увеличение частоты вращения приводит к снижению коэффициента избытка воздуха α от 1,6 при $n=1400$ мин⁻¹ до 1,5 при $n=2400$ мин⁻¹, или на 6,3%.

Сравнивая эффективные показатели дизеля при работе по ДП и на ЭТЭ можно отметить, что в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ применение ЭТЭ приводит к увеличению G_T на 29,6 и 18,5%; g_e на 24,4 и 26,8% соответственно. В этом же диапазоне частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ приме-

ние ЭТЭ приводит к снижению α на 5,9 и 6,3%; G_B на 13,6 и 5,7%; $G_{ДТприв}$ на 12,5 и 19,9%; $g_{eДТприв}$ на 16,0 и 14,4%; η_e на 5,7 и 3,0% соответственно. Значения крутящего момента и эффективной мощности при частоте вращения 2400 мин⁻¹ соответствуют ДП, а при $n = 1400$ мин⁻¹ незначительно возрастают. Температура ОГ при частоте вращения 1400 мин⁻¹ на 8,0% превышает ДП, а при $n = 2400$ мин⁻¹ снижается на 17,4%.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном у.о.в.т. 23° в зависимости от изменения частоты вращения представлено на рисунке 4.11, а. Анализируя содержание токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе ДП, можно сделать следующие выводы. При увеличении частоты вращения коленчатого вала содержание NO_x в ОГ снижается. Так, при $n = 1400$ мин⁻¹ NO_x составляет 1300 ppm, а при $n = 2400$ мин⁻¹ снижается до 1000 ppm, или на 23,1%. Содержание CO в ОГ увеличивается во всем диапазоне изменения частоты вращения от 0,145% при $n = 1400$ мин⁻¹ до 0,24% при $n = 2400$ мин⁻¹, или на 65,5%. При увеличении частоты вращения с $n = 1400$ мин⁻¹ до $n = 2400$ мин⁻¹ происходит рост содержания CO_2 в ОГ от 8,7 до 11,7%, или на 34,5%. При увеличении частоты вращения повышается также и содержание суммарных углеводородов CH_x в ОГ от 0,05% при $n = 1400$ мин⁻¹ до 0,11% при $n = 2400$ мин⁻¹, или в 2,2 раза. С повышением частоты вращения увеличивается дымность ОГ. Так, при $n = 1400$ мин⁻¹ составляет 4,4 ед. по шкале Bosch, а при частоте $n = 2400$ мин⁻¹ повышается до 6,1 ед. по шкале Bosch, т.е. на 38,6%.

Анализируя графики содержания токсичных компонентов при работе по газодизельному и газодизельному с РОГ процессам, можно отметить, что характер протекания кривых соответствует ДП, при этом изменяются лишь их числовые значения. Так, при работе по ГДП с 20%-ной РОГ при увеличении частоты вращения с 1400 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение содержания NO_x с 900 до 700 ppm, или на 22,2%, что ниже ДП на 30,8 и 30,0% соответственно. Содержание суммарных углеводородов увеличивается как с увеличением частоты вращения, так и с применением ПГ.

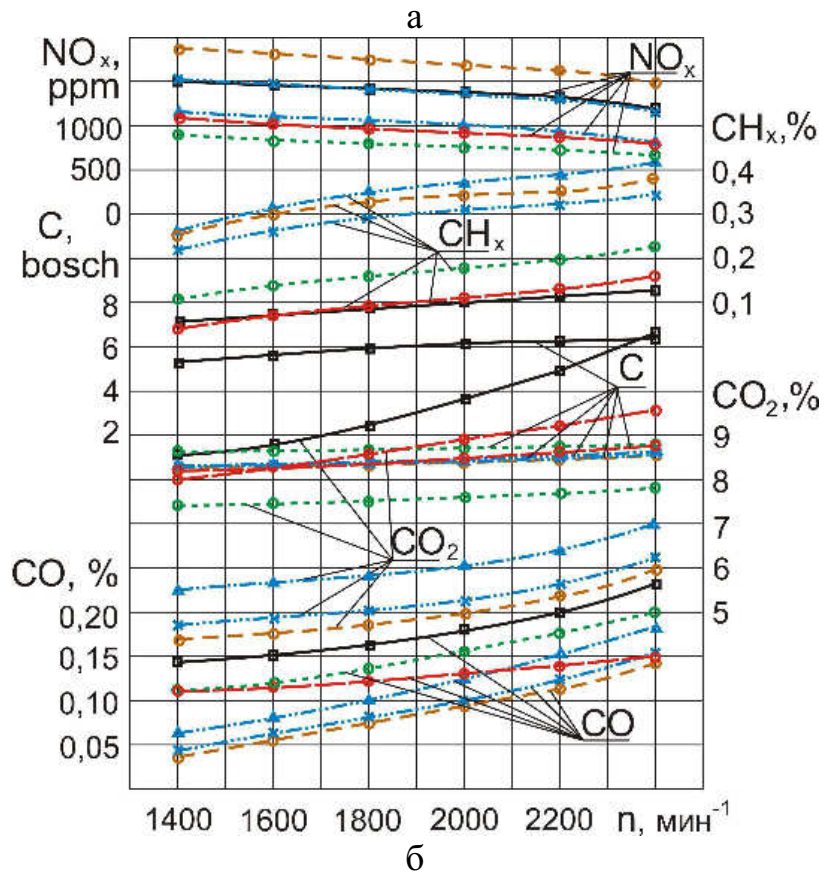
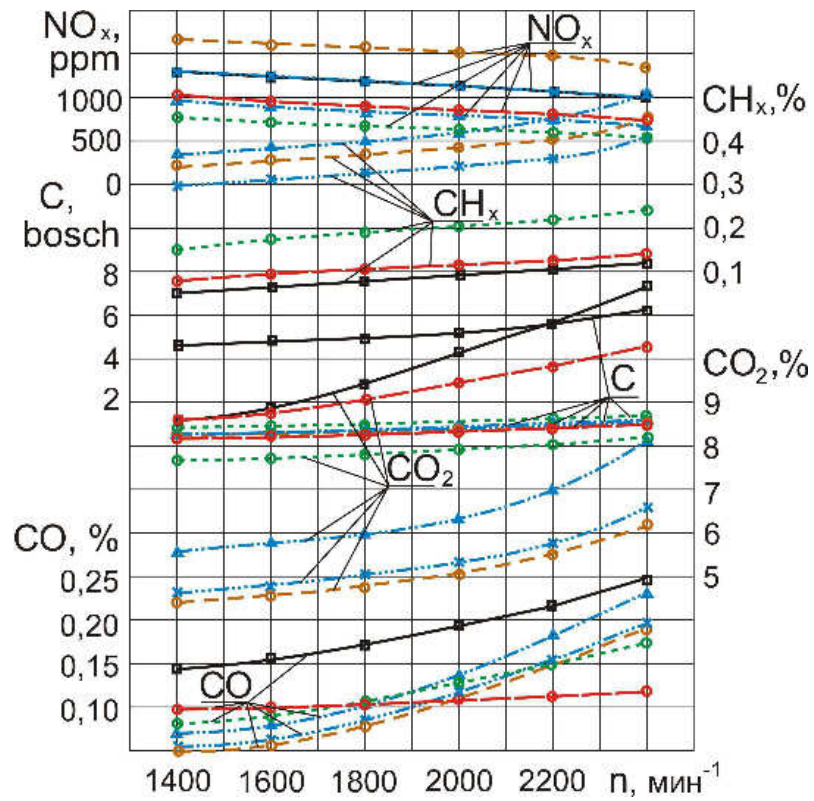


Рисунок 4.11 - Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения частоты вращения коленчатого вала: а – $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б – $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$; \blacksquare — ДП; \circ — ГДП; \times — ГДП с РОГ 10%; \blacktriangle — ГДП с РОГ 20%; \circ (green) — ЭТЭ; \circ (red) — МТЭ

Применение на газодизеле 10%-ной РОГ приводит к снижению содержания CH_x в ОГ на 11,8 и 9,1% соответственно. Но применение уже 20%-ной РОГ на газодизеле вызывает увеличение содержания CH_x в ОГ на 8,8 и 15,9% для частот вращения 1400 до 2400 мин^{-1} соответственно. Увеличение частоты вращения вызывает повышение содержания CO и CO_2 в ОГ. Применение же ПГ вызывает снижение содержания оксида и диоксида углерода, а с увеличением степени РОГ содержание CO и CO_2 опять возрастает. Но все же при работе газодизеля с 10%-ной РОГ в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин^{-1} происходит снижение CO в 2,4 раза и на 20,8% соответственно, и снижение CO_2 на 46,0 и 43,6% по отношению к ДП. Анализируя содержание сажи (С) в ОГ, видим, что при увеличении частоты вращения происходит повышение сажесодержания в ОГ как по газодизельному, так и по газодизельному с РОГ процессам. Применение ПГ значительно снижает содержание сажи в ОГ, а применение РОГ приводит к увеличению сажесодержания, причем с увеличением степени РОГ сажесодержание возрастает. Так, при работе газодизеля в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин^{-1} происходит снижение сажесодержания в 8,8 и 5,1 раза, соответственно, по отношению к ДП. Применение же 10%-ной РОГ вызывает увеличение сажесодержания, которое не превышает 10%.

Анализ содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе дизеля на МТЭ, позволяет сделать следующие выводы. При увеличении частоты вращения коленчатого вала содержание NO_x в ОГ снижается. Так, при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ NO_x составляет 1020 ppm, а при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ снижается до 750 ppm, или на 26,5%. Содержание CO в ОГ повышается во всем диапазоне изменения частоты вращения от 0,09% при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,12% при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 33,3%. Содержание CO_2 в ОГ так же повышается с увеличением частоты вращения от 8,7% при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 10,2% при значении $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 17,2%. При увеличении частоты вращения происходит повышение и суммарных углеводородов CH_x в ОГ от 0,08% при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,13% при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 62,5%. С повышением частоты вращения в ин-

тервале от 1400 до 2400 мин⁻¹ увеличивается дымность ОГ от 0,5 до 1,2 ед. по шкале Bosch, или в 2,4 раза.

Сравнивая содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ в зависимости от изменения частоты вращения, можно отметить следующее. Применение на дизеле МТЭ приводит к снижению содержания NO_x, оксида углерода СО, диоксида углерода СО₂ и саже-содержания (С) во всем диапазоне изменения частот вращения. Так, при работе на МТЭ при значениях частот вращения 1400 и 2400 мин⁻¹ снижение содержания составляет NO_x на 21,5 и 25,0%, СО на 37,9% и в 2 раза, СО₂ на 1,1 и 12,8%, сажи в 8,8 и 5,1 раза соответственно. Применение МТЭ вызывает увеличение содержания суммарных углеводородов СН_x в ОГ. Так, при работе на МТЭ при частоте вращения n=2400 мин⁻¹ происходит увеличение СН_x по отношению к ДП на 18,2%.

Анализируя содержание токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе дизеля на ЭТЭ, можно сделать следующие выводы. При увеличении частоты вращения коленчатого вала содержание NO_x в ОГ снижается. Так, при n=1400 мин⁻¹ NO_x составляет 770 ppm, а при n=2400 мин⁻¹ снижается до 540 ppm, или на 29,9%. Содержание СО в ОГ повышается во всем диапазоне изменения частоты вращения от 0,08% при n=1400 мин⁻¹ до 0,17% при n=2400 мин⁻¹, или в 2,1 раза. Содержание СО₂ в ОГ так же повышается с увеличением частоты вращения от 7,8% при n=1400 мин⁻¹ до 8,2% при значении n=2400 мин⁻¹, или на 5,1%. При увеличении частоты вращения происходит повышение и суммарных углеводородов СН_x в ОГ от 0,15% при n=1400 мин⁻¹ до 0,22% при n=2400 мин⁻¹, или на 46,7%. С повышением частоты вращения в интервале от 1400 до 2400 мин⁻¹ увеличивается дымность ОГ от 0,9 до 1,4 ед. по шкале Bosch, или на 55,6%.

Сравнивая содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ в зависимости от изменения частоты вращения, можно отметить следующее. Применение на дизеле ЭТЭ приводит к снижению содержания NO_x, оксида углерода СО, диоксида углерода СО₂ и саже-содержания (С) во всем скоростном диапазоне. Так, при работе на ЭТЭ при значениях частот вращения 1400 и 2400 мин⁻¹ снижение содержания составляет NO_x

на 40,8 и 46,0%, СО на 44,8 и 29,2%, СО₂ на 10,3 и 29,9%, сажи в 4,9 и 4,4 раза соответственно.

Содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 на установочном у.о.в.т. 26° в зависимости от изменения частоты вращения представлено на рисунке 4.11, б. Характеры изменения содержания токсичных компонентов в ОГ в зависимости от частоты вращения аналогичны рассмотренным выше для установочного у.о.в.т. 23° и отличаются лишь величиной значений. Анализ содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе ДП, позволяет сделать следующие выводы. При увеличении частоты вращения коленчатого вала содержание NO_x в ОГ снижается. Так, при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ NO_x составляет 1500 ppm, а при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ снижается до 1200 ppm, или на 20,0%. Содержание СО в ОГ увеличивается во всем скоростном диапазоне от 0,14% при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,23% при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 64,3%. При увеличении частоты вращения с $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ происходит рост содержания СО₂ в ОГ от 8,6 до 11,2%, или на 30,2%. При увеличении частоты вращения повышается также и содержание суммарных углеводородов СН_x в ОГ от 0,06% при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,12% при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или в 2,0 раза. С повышением частоты вращения растет дымность ОГ. Так, при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ составляет 5,3 ед. по шкале Bosch, а при частоте $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ повышается до 6,3 ед. по шкале Bosch, т.е. на 18,9%.

Анализируя графики содержания токсичных компонентов при работе газодизельному и газодизельному с РОГ процессам, можно отметить, что характер протекания кривых соответствует ДП, при этом изменяются лишь их числовые значения. Так, при работе по газодизельному с 20-ной РОГ процессу при увеличении частоты вращения с 1400 до 2400 мин^{-1} происходит снижение содержания NO_x с 1200 до 800 ppm, или на 33,3%, что ниже ДП на 20,0 и 33,3% соответственно. Содержание суммарных углеводородов увеличивается как с увеличением частоты вращения, так и с применением ПГ. Применение на газодизеле 10%-ной РОГ приводит к снижению содержания СН_x в ОГ на 12,0 и 10,5% соответственно. Но применение уже 20%-ной РОГ на газодизеле вызывает увеличение содержания СН_x в ОГ на 8,0 и 9,5% для частот вращения 1400 до 2400 мин^{-1} соответственно.

Увеличение частоты вращения вызывает повышение содержания CO и CO₂ в ОГ. Применение же ПГ вызывает снижение содержания оксида и диоксида углерода, а с увеличением степени РОГ содержание CO и CO₂ опять возрастает. Но все же при работе газодизеля с 10%-ной РОГ в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение CO в 3,5 раза и на 30,4%, соответственно, и снижение CO₂ на 44,2 и 44,6%, соответственно, по отношению к ДП.

Анализируя содержание сажи (С) в ОГ, видим, что при увеличении частоты вращения происходит повышение сажесодержания в ОГ как по газодизельному, так и по газодизельному с РОГ процессам. Применение ПГ значительно снижает содержание сажи в ОГ, а применение РОГ приводит к увеличению сажесодержания, причем с увеличением степени РОГ сажесодержание возрастает. Так, при работе газодизеля в диапазоне изменения частот вращения от 1400 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение сажесодержания в 8,8 и 8,6 раз, соответственно, по отношению к ДП. Применение же 10%-ной РОГ вызывает увеличение сажесодержания, которое не превышает 10%.

Анализ содержания токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе дизеля на МТЭ, позволяет сделать следующие выводы. При увеличении частоты вращения коленчатого вала содержание NO_x в ОГ снижается. Так, при $n = 1400$ мин⁻¹ NO_x составляет 1100 ppm, а при $n = 2400$ мин⁻¹ снижается до 800 ppm, или на 27,3%. Содержание CO в ОГ повышается на всем скоростном диапазоне от 0,11% при $n = 1400$ мин⁻¹ до 0,15% при $n = 2400$ мин⁻¹, или на 36,4%. Содержание CO₂ в ОГ также повышается с увеличением частоты вращения от 8,0% при $n = 1400$ мин⁻¹ до 9,5% при значении $n = 2400$ мин⁻¹, или на 18,8%. При увеличении частоты вращения происходит повышение и суммарных углеводородов CH_x в ОГ от 0,04% при $n = 1400$ мин⁻¹ до 0,16% при $n = 2400$ мин⁻¹, или в 4 раза. С повышением частоты вращения в интервале от 1400 до 2400 мин⁻¹ увеличивается дымность ОГ от 0,6 до 1,3 ед. по шкале Bosch, или в 2,2 раза.

Сравнивая содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и МТЭ в зависимости от изменения частоты вращения, можно отметить следующее. Применение на дизеле МТЭ приводит к

снижению содержания NO_x , оксида углерода CO , диоксида углерода CO_2 и саже-содержания (С) во всем скоростном диапазоне. Так, при работе на МТЭ при значениях частот вращения 1400 и 2400 мин^{-1} снижение содержания составляет NO_x на 26,7 и 33,3%, CO на 21,4 и 34,8%, CO_2 на 7,0 и 15,2%, сажи в 8,8 и 4,8 раза соответственно. Применение МТЭ вызывает неоднозначное влияние на содержание суммарных углеводородов CH_x в ОГ. Так, при работе на МТЭ при частоте вращения $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ происходит снижение CH_x на 33,3%, а при частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ – увеличение на 33,3% по отношению к ДП.

Анализируя содержание токсичных компонентов в ОГ, соответствующих работе дизеля на ЭТЭ, позволяет сделать следующие выводы. При увеличении частоты вращения коленчатого вала содержание NO_x в ОГ снижается. Так, при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ NO_x составляет 900 ppm, а при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ снижается до 650 ppm, или на 27,8%. Содержание CO в ОГ повышается во всем скоростном диапазоне от 0,11% при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,20% при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 81,8%. Содержание CO_2 в ОГ также повышается с увеличением частоты вращения от 7,4% при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 7,9% при значении $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 6,8%. При увеличении частоты вращения происходит повышение и суммарных углеводородов CH_x в ОГ от 0,11% при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,21% при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 90,9%. С повышением частоты вращения в интервале от 1400 до 2400 мин^{-1} увеличивается дымность ОГ от 1,2 до 1,7 ед. по шкале Bosch, или на 41,7%.

Сравнивая содержание токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе и ЭТЭ в зависимости от изменения частоты вращения, можно отметить следующее. Применение на дизеле ЭТЭ приводит к снижению содержания NO_x , оксида углерода CO , диоксида углерода CO_2 и саже-содержания (С) во всем скоростном диапазоне. Так, при работе на ЭТЭ при значениях частот вращения 1400 и 2400 мин^{-1} снижение содержания составляет NO_x на 40,0 и 45,8%, CO на 21,4 и 13,0%, CO_2 на 14,0 и 29,5%, сажи в 4,4 и 3,7 раза соответственно.

4.5. Основные результаты и выводы по четвертой главе

В результате экспериментальных исследований экологических и эффективных показателей дизеля при работе на ПГ и СТЭ можно сделать следующие **выводы**:

1. Для снижения содержания оксидов азота в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ на основании полученных результатов исследования предложено поддерживать следующие соотношения компонентов альтернативных топлив: газа – 80%, запальной порции дизельного топлива – 20% (при работе на ПГ); спирт (метанол или этанол) – 25%, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А – 0,5%, вода – 7%, дизельное топливо – 67,5% (при работе на смеси со спиртами). Все экспериментальные исследования дизеля проводились на топливах вышеуказанных составов. При работе на ПГ с РОГ (рециркуляция была применена для ликвидации возросших в результате использования ПГ оксидов азота) установлена закономерность подачи рециркулируемых газов от 20 до 40% в зависимости от режима работы дизеля.

2. На основании проведенных экспериментальных стендовых исследований рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 определены значения эффективных показателей и оптимальных установочных у.о.в.т.: для ДП - 26°п.к.в. до в.м.т., для ГДП, ГДП с РОГ, МТЭ и ЭТЭ - 23°п.к.в. до в.м.т. При этом установлена возможность сохранения мощностных показателей на уровне серийного дизеля. Так, при частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$: ДП - $N_e = 55,2 \text{ кВт}$; ГДП, ГДП с РОГ 10%, ГДП с РОГ 20% - $N_e = 55,2 \text{ кВт}$ (соответствует ДП); МТЭ - $N_e = 55,4 \text{ кВт}$ (увеличение на 0,4%); ЭТЭ - $N_e = 55,0 \text{ кВт}$ (снижение на 0,4%). При частоте вращения $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$: ДП - $N_e = 46,5 \text{ кВт}$; ГДП, ГДП с РОГ 10%, ГДП с РОГ 20% - $N_e = 46,5 \text{ кВт}$ (соответствует ДП); МТЭ - $N_e = 47,9 \text{ кВт}$ (увеличение на 3,0%); ЭТЭ - $N_e = 45,7 \text{ кВт}$ (снижение на 1,7%).

3. Установлены зависимости влияния режимов работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ, ПГ с различными степенями РОГ, МТЭ и ЭТЭ на эффективные показатели, токсичность и дымность ОГ.

4. Определены оптимальные значения токсичности и дымности ОГ при работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ и СТЭ при у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$.

Анализ ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$) показал следующие результаты: ДП - $\text{NO}_x = 1100 \text{ ppm}$; $C = 5,8$ ед. по шкале Bosch; $\text{CO}_2 = 10,9\%$; $\text{CO} = 0,21\%$; $\text{CH}_x = 0,11\%$; ГДП - $\text{NO}_x = 1450 \text{ ppm}$ (увеличение на 31,8%); $C = 0,9$ ед. по шкале Bosch (снижение в 6,4 раза); $\text{CO}_2 = 5,6\%$ (снижение на 48,6 %); $\text{CO} = 0,15\%$ (снижение на 28,6%); $\text{CH}_x = 0,40\%$ (увеличение в 3,6 раза); ГДП с РОГ 10% - $\text{NO}_x = 1100 \text{ ppm}$ (соответствует ДП); $C = 1,0$ ед. по шкале Bosch (снижение в 5,8 раз); $\text{CO}_2 = 5,9\%$ (снижение на 45,9%); $\text{CO} = 0,16\%$ (снижение на 23,8%); $\text{CH}_x = 0,36\%$ (увеличение в 3,3 раза); ГДП с РОГ 20% - $\text{NO}_x = 750 \text{ ppm}$ (снижение на 31,8%); $C = 1,1$ ед. по шкале Bosch (снижение в 5,3 раза); $\text{CO}_2 = 7,0\%$ (снижение на 35,8%); $\text{CO} = 0,18\%$ (снижение на 14,3%); $\text{CH}_x = 0,45\%$ (увеличение в 4,1 раза); МТЭ - $\text{NO}_x = 775 \text{ ppm}$ (снижение на 29,6%); $C = 0,9$ ед. по шкале Bosch (снижение в 6,4 раза); $\text{CO}_2 = 9,8\%$ (снижение на 10,1%); $\text{CO} = 0,11\%$ (снижение на 47,6%); $\text{CH}_x = 0,12\%$ (увеличение на 9,1%); ЭТЭ - $\text{NO}_x = 657 \text{ ppm}$ (снижение на 40,3%); $C = 1,2$ ед. по шкале Bosch (снижение в 4,8 раза); $\text{CO}_2 = 8,0\%$ (снижение на 26,6%); $\text{CO} = 0,15\%$ (снижение на 28,6%); $\text{CH}_x = 0,22\%$ (увеличение в 2 раза).

При у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$): ДП - $\text{NO}_x = 1300 \text{ ppm}$; $C = 5,1$ ед. по шкале Bosch; $\text{CO}_2 = 9,6\%$; $\text{CO} = 0,16\%$; $\text{CH}_x = 0,09\%$; ГДП - $\text{NO}_x = 1600 \text{ ppm}$ (увеличение на 23,1%); $C = 0,5$ ед. по шкале Bosch (снижение в 10,2 раза); $\text{CO}_2 = 4,9\%$ (снижение на 49,0%); $\text{CO} = 0,05\%$ (снижение в 3,2 раза); $\text{CH}_x = 0,36\%$ (увеличение в 4,0 раза); ГДП с РОГ 10% - $\text{NO}_x = 1300 \text{ ppm}$ (соответствует ДП); $C = 0,6$ ед. по шкале Bosch (снижение в 8,5 раз); $\text{CO}_2 = 5,1\%$ (снижение на 46,9%); $\text{CO} = 0,06\%$ (снижение в 2,7 раза); $\text{CH}_x = 0,31\%$ (увеличение в 3,4 раза); ГДП с РОГ 20% - $\text{NO}_x = 915 \text{ ppm}$ (снижение на 29,6%); $C = 0,7$ ед. по шкале Bosch (снижение в 7,3 раза); $\text{CO}_2 = 6,0\%$ (снижение на 37,5%); $\text{CO} = 0,07\%$ (снижение в 2,3 раза); $\text{CH}_x = 0,39\%$ (увеличение в 4,3 раза); МТЭ - $\text{NO}_x = 839 \text{ ppm}$ (снижение на 35,5%); $C = 0,5$ ед. по шкале Bosch (снижение в 10,2 раза); $\text{CO}_2 = 8,8\%$ (снижение на 8,3%); $\text{CO} = 0,11\%$ (снижение на

31,3%); $\text{CH}_x=0,10\%$ (увеличение на 11,1%); ЭТЭ - $\text{NO}_x=730$ ppm (снижение на 43,9%); $\text{C}=0,9$ ед. по шкале Bosch (снижение в 5,7 раза); $\text{CO}_2=7,8\%$ (снижение на 18,8%); $\text{CO}=0,10\%$ (снижение на 37,5%); $\text{CH}_x=0,18\%$ (увеличение в 2,0 раза).

5. Определены оптимальные значения токсичности и дымности ОГ при работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ и СТЭ при у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

Анализ ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200$ мин⁻¹, $p_e = 0,64$ МПа) показал следующие результаты: ДП - $\text{NO}_x=1320$ ppm; $\text{C}=6,2$ ед. по шкале Bosch; $\text{CO}_2=10,5\%$; $\text{CO}=0,20\%$; $\text{CH}_x=0,11\%$; ГДП - $\text{NO}_x=1650$ ppm (увеличение на 25,0%); $\text{C}=1,0$ ед. по шкале Bosch (снижение в 6,2 раза); $\text{CO}_2=5,5\%$ (снижение на 47,6 %); $\text{CO}=0,12\%$ (снижение на 40,0%); $\text{CH}_x=0,35\%$ (увеличение в 3,2 раза); ГДП с РОГ 10% - $\text{NO}_x=1300$ ppm (снижение на 1,5%); $\text{C}=1,1$ ед. по шкале Bosch (снижение в 5,6 раз); $\text{CO}_2=5,8\%$ (снижение на 44,8%); $\text{CO}=0,13\%$ (снижение на 35,0%); $\text{CH}_x=0,32\%$ (увеличение в 2,9 раза); ГДП с РОГ 20% - $\text{NO}_x=900$ ppm (снижение на 31,8%); $\text{C}=1,2$ ед. по шкале Bosch (снижение в 5,2 раза); $\text{CO}_2=6,4\%$ (снижение на 39,1%); $\text{CO}=0,16\%$ (снижение на 20,0%); $\text{CH}_x=0,39\%$ (увеличение в 3,6 раза); МТЭ - $\text{NO}_x=853$ ppm (снижение на 35,4%); $\text{C}=1,2$ ед. по шкале Bosch (снижение в 5,2 раза); $\text{CO}_2=9,2\%$ (снижение на 12,4%); $\text{CO}=0,14\%$ (снижение на 30,0%); $\text{CH}_x=0,13\%$ (увеличение на 18,2%); ЭТЭ - $\text{NO}_x=730$ ppm (снижение на 44,7%); $\text{C}=1,5$ ед. по шкале Bosch (снижение в 4,1 раза); $\text{CO}_2=7,6\%$ (снижение на 27,6%); $\text{CO}=0,17\%$ (снижение на 15,0%); $\text{CH}_x=0,20\%$ (увеличение на 81,8%).

При у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700$ мин⁻¹, $p_e = 0,69$ МПа): ДП - $\text{NO}_x=1400$ ppm; $\text{C}=5,6$ ед. по шкале Bosch; $\text{CO}_2=9,1\%$; $\text{CO}=0,15\%$; $\text{CH}_x=0,09\%$; ГДП - $\text{NO}_x=1750$ ppm (увеличение на 25,0%); $\text{C}=0,6$ ед. по шкале Bosch (снижение в 9,3 раза); $\text{CO}_2=4,7\%$ (снижение на 48,4%); $\text{CO}=0,06\%$ (снижение в 2,5 раза); $\text{CH}_x=0,32\%$ (увеличение в 3,6 раза); ГДП с РОГ 10% - $\text{NO}_x=1430$ ppm (увеличение на 2,1%); $\text{C}=0,7$ ед. по шкале Bosch (снижение в 8,0 раз); $\text{CO}_2=5,0\%$ (снижение на 45,1%); $\text{CO}=0,07\%$ (снижение в 2,1 раза); $\text{CH}_x=0,29\%$ (увеличение в 3,2 раза); ГДП с РОГ 20% - $\text{NO}_x=1100$ ppm (снижение на 21,4%); $\text{C}=0,8$ ед. по шкале Bosch (снижение в 7,0 раза); $\text{CO}_2=5,8\%$

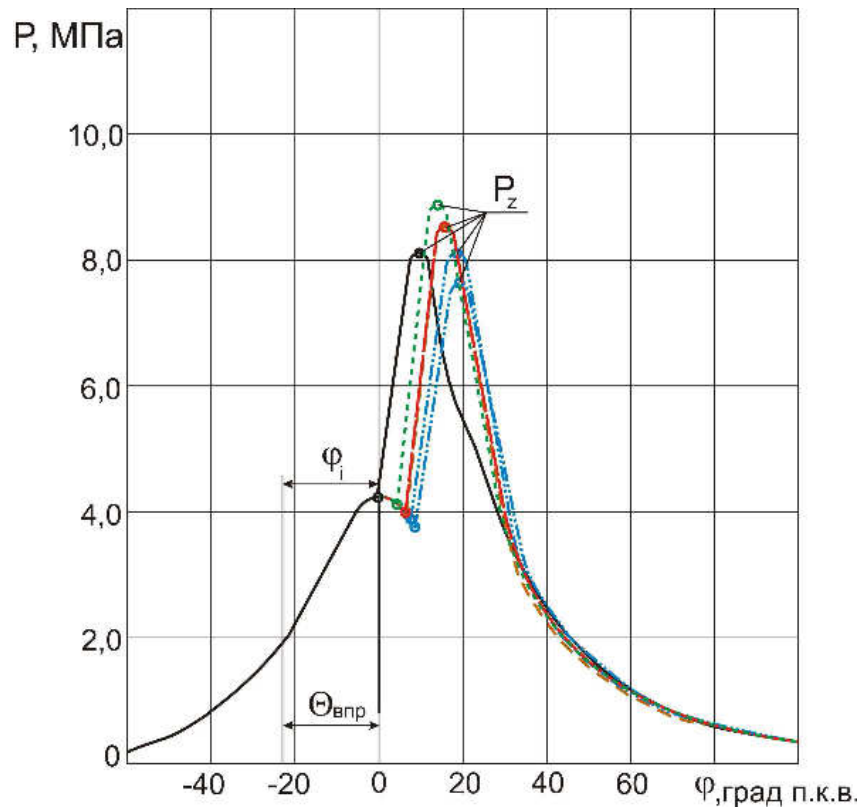
(снижение на 63,7%); $\text{CO}=0,08\%$ (снижение на 46,7%); $\text{CH}_x=0,35\%$ (увеличение в 3,9 раза); МТЭ - $\text{NO}_x=985$ ppm (снижение на 29,6%); $\text{C}=0,8$ ед. по шкале Bosch (снижение в 7,0 раза); $\text{CO}_2=8,8\%$ (снижение на 3,3%); $\text{CO}=0,12\%$ (снижение на 20,0%); $\text{CH}_x=0,08\%$ (снижение на 11,1%); ЭТЭ - $\text{NO}_x=830$ ppm (снижение на 40,9%); $\text{C}=1,3$ ед. по шкале Bosch (снижение в 4,3 раза); $\text{CO}_2=7,5\%$ (снижение на 17,6%); $\text{CO}=0,13\%$ (снижение на 13,3%); $\text{CH}_x=0,15\%$ (увеличение на 66,7%).

6. Перевод указанного дизеля с нефтяного топлива на альтернативное позволил снизить содержание в ОГ при работе на ПГ с 20%-ной РОГ оксидов азота на 43,2%, сажи в 5,6 раза, диоксида углерода на 33,3%, оксида углерода на 10,0%; при работе на МТЭ – оксидов азота на 41,3%, сажи в 6,9 раза, диоксида углерода на 6,7%, оксида углерода на 45,0%; при работе на ЭТЭ – оксидов азота на 50,2%, сажи в 5,2 раза, диоксида углерода на 23,8%, оксида углерода на 25,0%.

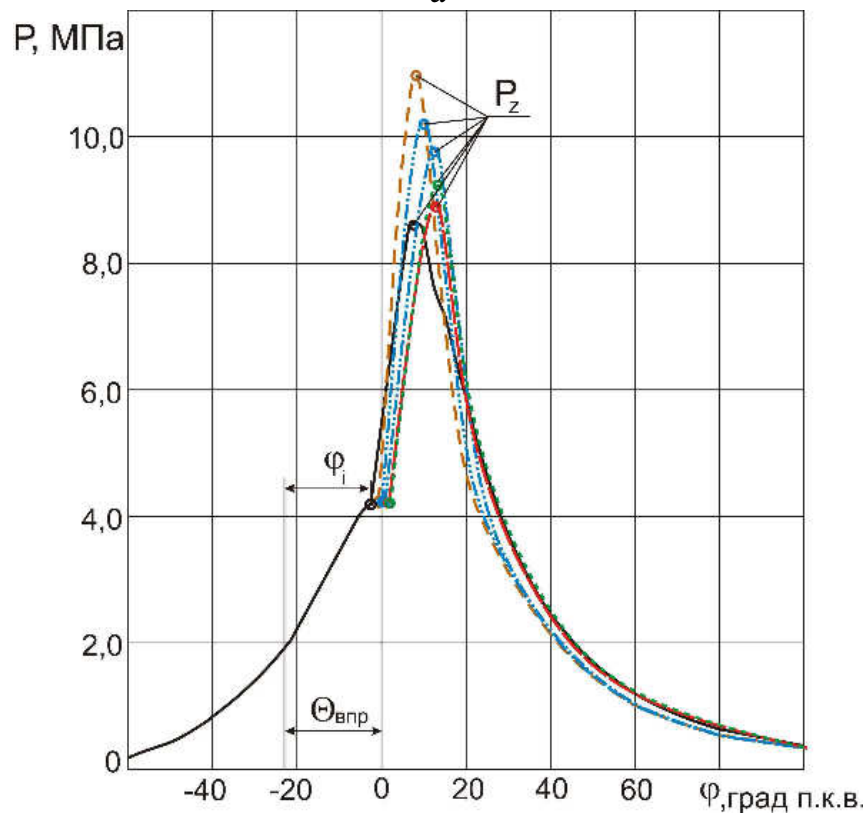
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЯ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

5.1 Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля на ПГ и СТЭ по установочному у.о.в.т

Процесс сгорания в дизеле, работающем на альтернативных топливах, еще более чувствителен в сравнении со штатным ДП ко многим конструкционным и эксплуатационным факторам. Возникновение и развитие горения, полнота сгорания ТВС альтернативного топлива также определяются особенностями и скоростями реакций, условиями тепло- и массообмена в зоне пламени и теплоотдачей в стенки ЦД. Скорость распространения фронта пламени в процессе сгорания зависит от химических и физических факторов и в совокупности со скоростью химической реакции окисления молекул альтернативного топлива в конечном счете влияет на продолжительность сгорания массы рабочей смеси в КС дизеля. Например, из-за неравномерного распределения исследуемого топлива по цилиндрам состав ТВС может оказаться близким к концентрационным пределам распространения пламени, в связи, с чем возможны пропуски воспламенения и сгорания в отдельных цилиндрах, или процесс горения может становиться медленным, переходя в фазу расширения. Очевидно, что отличительной особенностью процессов смесеобразования и горения в дизеле, работающем как на ПГ с запальной порцией дизельного топлива, так и на СТЭ, будет являться по сравнению с ДП неоднородность горючей смеси по объему цилиндра, присутствовать совершенно другая испаряемость горючего и не совпадение по времени процессов образования ТВС и ее горение. Применение альтернативных топлив с другим химическим составом и локальными условиями может приводить к отличительным показателям процесса сгорания и даже к воспламенению во время развития факела распыла. Следовательно, для научного представления действительной картины процесса сгорания в дизеле, работающего на ПГ и СТЭ, необходимо детальное и достаточно достоверное описание данного процесса, что можно выполнить только по-



а



б

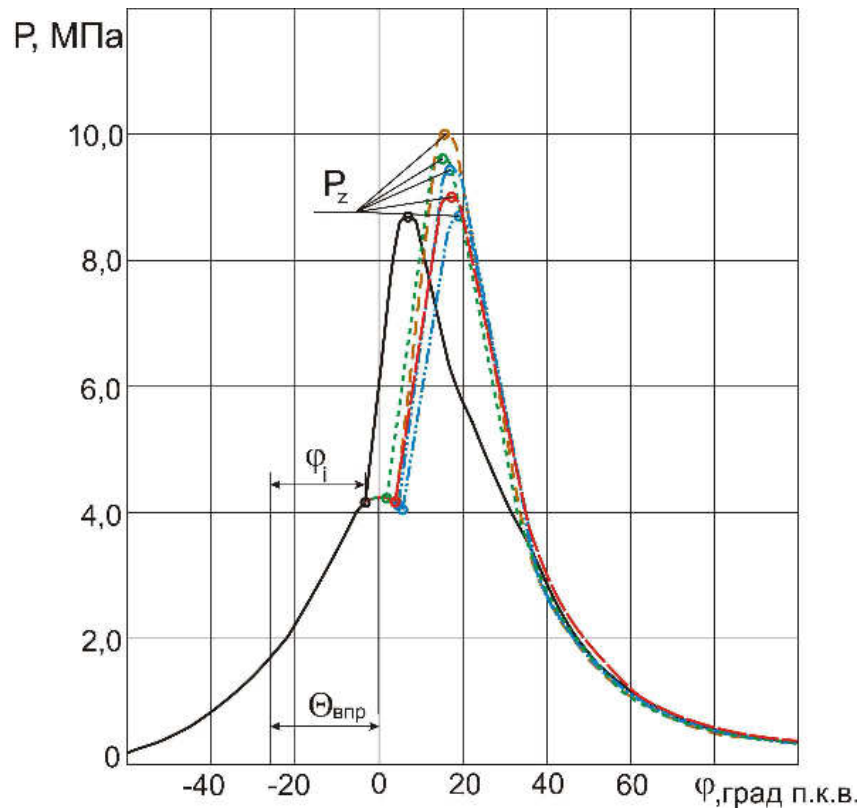
Рисунок 5.1 – Индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{впр} = 23^\circ$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$;

— ДП; — ГДП; - - ГД с РОГ 10%;
 - - ГД с РОГ 20%; - - ЭТЭ; - - МТЭ

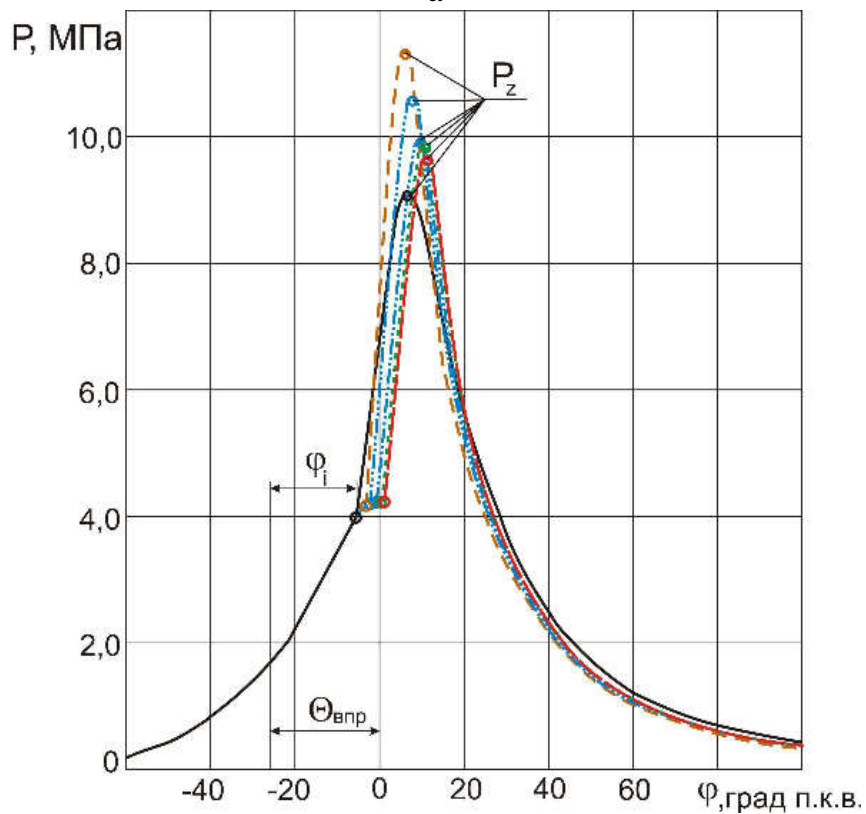
сле проведения индицирования рабочего процесса дизеля. Хорошо известно, что одно из ценных качеств индикаторной диаграммы, издавна привлекающее внимание исследователей, заключается в том, что она представляет непосредственную запись действительных физических величин, значения которых можно наблюдать без дополнительных расчетов на самой диаграмме.

На рисунке 5.1, а изображены индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. Анализируя представленные на данном режиме индикаторные диаграммы хорошо видно увеличение периода задержки воспламенения (ПЗВ) и максимального давления цикла p_z при работе на всех исследуемых альтернативных топливах [458-463]. Так, применение ЭТЭ увеличивает угол, соответствующий ПЗВ, φ_i на $5,5^\circ$, МТЭ, ГДП – на $7,5^\circ$, ГДП с РОГ 10% – на $8,5^\circ$, ГДП с РОГ 20% – на $9,5^\circ$ по отношению к ДП. При этом p_z увеличивается при работе по ГДП и МТЭ на 0,4 МПа, на ЭТЭ – на 0,8 МПа, при работе по ГДП с РОГ 10% – соответствует ДП, а при работе по ГДП с РОГ 20% – снижается на 0,6 МПа также по отношению к ДП. С увеличением степени РОГ уменьшается угол наклона кривой давления, что свидетельствует о снижении жесткости процесса сгорания. На рисунке 5.1, б изображены индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$. На режиме максимального крутящего момента также происходит увеличение ПЗВ и максимального давления цикла p_z при работе на всех исследуемых альтернативных топливах. Так, при работе по ГДП величина φ_i увеличивается на $2,0^\circ$, по ГДП с РОГ 10% – на $3,0^\circ$, по ГДП с РОГ 20% – на $4,0^\circ$, на МТЭ – на $5,0^\circ$, на ЭТЭ – на $5,5^\circ$ по сравнению с ДП. При этом p_z увеличивается при работе на МТЭ – на 0,3 МПа, на ЭТЭ – на 0,6 МПа, по ГДП – на 2,4 МПа, по ГДП с РОГ 10% – на 1,6 МПа, по ГДП с РОГ 20% – на 1,2 МПа также по отношению к ДП.

На рисунке 5.2, а изображены индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$. На номинальном режиме при этом значении у.о.в.т. также происходит увеличение ПЗВ и максимального давления цикла p_z при работе на всех исследуемых альтернативных топливах.



а



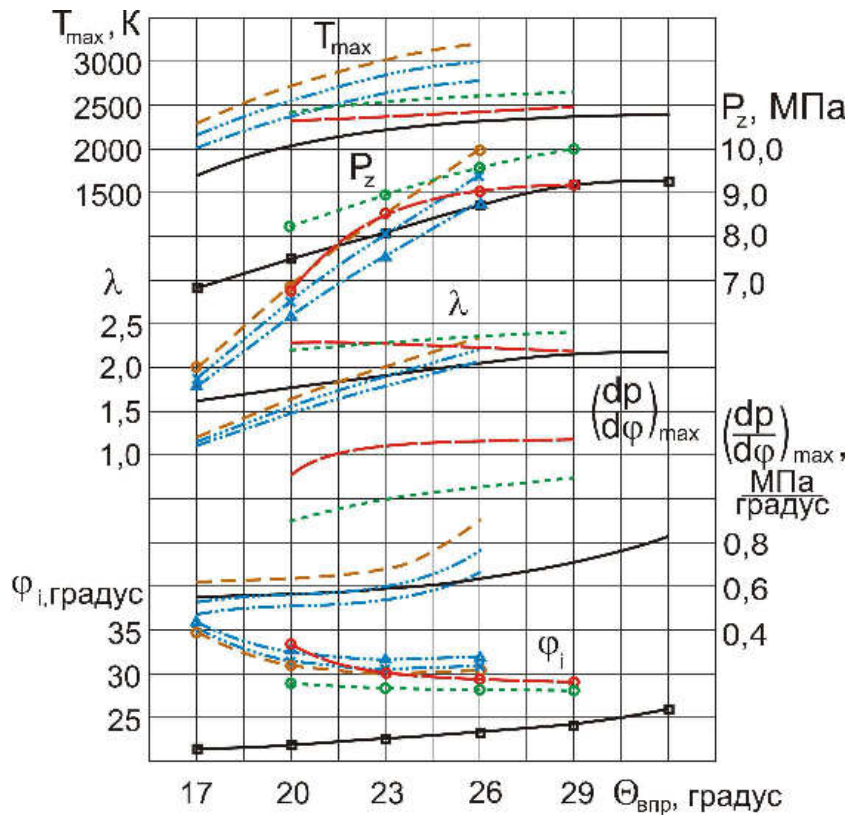
б

Рисунок 5.2 – Индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$;

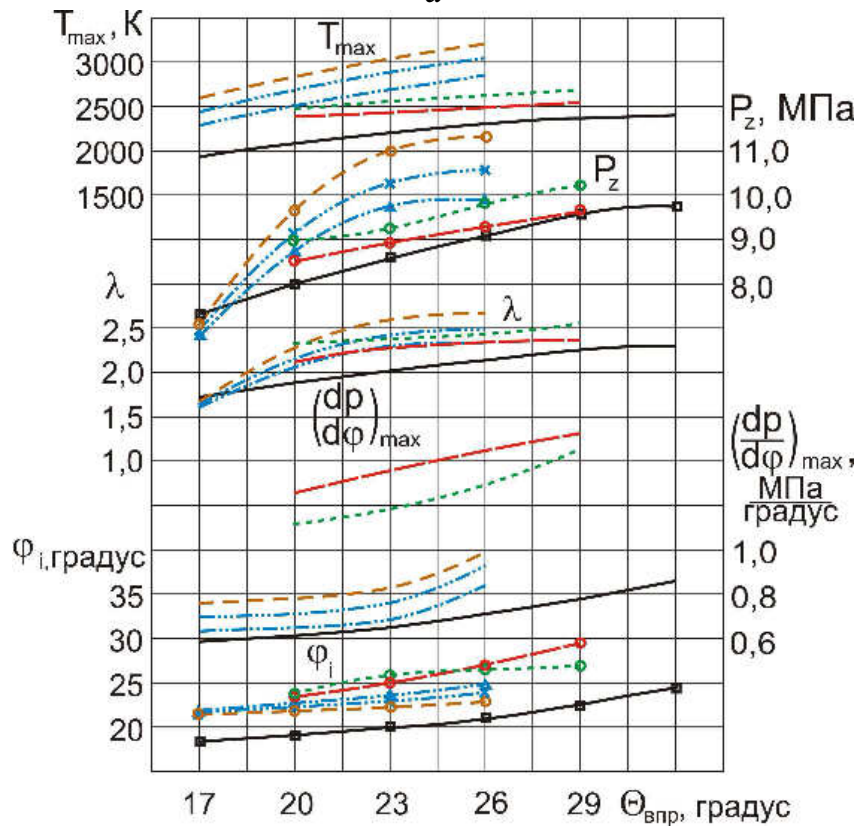
— ДП; — ГДП; ····· ГД с РОГ 10%;
 ····· ГД с РОГ 20%; ····· ЭТЭ; - - - МТЭ

Так, применение ЭТЭ увеличивает угол, соответствующий ПЗВ, φ_i на $5,0^\circ$, МТЭ – на $6,5^\circ$, ГДП – на $7,5^\circ$, ГДП с РОГ 10% – на $8,0^\circ$, ГДП с РОГ 20% – на $9,0^\circ$ по отношению к ДП. При этом p_z увеличивается при работе на МТЭ – на 0,3 МПа, на ЭТЭ – на 1,0 МПа, по ГДП – на 1,3 МПа, по ГДП с РОГ 10% – на 0,7 МПа соответственно по отношению к ДП. При работе по ГДП с РОГ 20% величина p_z равняется ДП. На рисунке 5.2, б изображены индикаторные диаграммы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$. На режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту, при этом значении у.о.в.т. также происходит увеличение ПЗВ и максимального давления цикла p_z при работе на всех исследуемых альтернативных топливах. Так, при работе по ГДП величина φ_i увеличивается на $2,0^\circ$, по ГДП с РОГ 10% – на $3,0^\circ$, по ГДП с РОГ 20% – на $4,0^\circ$, на МТЭ – на $5,5^\circ$, на ЭТЭ – на $6,0^\circ$ по сравнению с ДП. При этом p_z увеличивается при работе на МТЭ – на 0,2 МПа, на ЭТЭ – на 0,7 МПа, по ГДП – на 2,2 МПа, по ГДП с РОГ 10% – на 1,5 МПа, по ГДП с РОГ 20% – на 0,8 МПа также по отношению к ДП.

На рисунке 5.3, а изображены параметры процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5, зависящие от $\Theta_{\text{впр}}$, при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$. Анализируя графические зависимости характеристик сгорания по ДП, следует выделить, что с увеличением установочного у.о.в.т. возрастают величины степени повышения давления λ , максимального давления сгорания p_z , максимальной осредненной температуры газов в ЦД T_{max} , жесткости процесса горения $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ и значение угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Так, величина T_{max} в ЦД при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ составляет 1700 К. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° значение T_{max} повышается до 2030 К, или на 19,4%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к повышению значения T_{max} до 2190 К, т.е. на 28,8%. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение T_{max} повышается до 2280 К, или на 34,1%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение T_{max} повышается до 2350 К, т.е. на 38,2%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° значение T_{max} достигает максимума при исследуемых режимах – 2400 К, повышение составляет 41,2%.



а



б

Рисунок 5.3 – Зависимости показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения $\Theta_{впр}$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$;

— ДП; — — — ГДП; ГД с РОГ 10%;
 - · - · - ГД с РОГ 20%; - - - - - ЭТЭ; - - - - - МТЭ

Максимальное давление сгорания p_z при установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 17^\circ$ составляет 6,8 МПа. При увеличении $\Theta_{впр}$ до 20° значение p_z повышается до 7,5 МПа, или на 10,3%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{впр}$ до 23° приводит к повышению значения p_z до 8,1 МПа, т.е. на 19,1%. При увеличении $\Theta_{впр}$ до 26° значение p_z повышается до 8,7 МПа, т.е. на 27,9%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение p_z повышается до 9,1 МПа, т.е. на 33,8%; при увеличении $\Theta_{впр}$ до 32° значение p_z достигает максимума при исследуемых режимах - 9,2 МПа, что соответствует повышению на 35,3%. При $\Theta_{впр} = 17^\circ$ величина степени повышения давления λ равняется 1,65. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 20° повышает значение λ до 1,80, что соответствует 9,1%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{впр}$ до 23° приводит к повышению значения λ до 1,90, что соответствует 15,2%. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 26° повышает величину λ до 2,06, что характеризуется 24,9%. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 29° повышает величину λ до 2,18, что соответствует 32,1%; при повышении $\Theta_{впр}$ до 32° значение λ достигает максимума при исследуемых режимах - 2,20, рост составляет 33,3%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 17^\circ$ величина $(dp/d\phi)_{max}$ соответствует 0,56. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 20° повышает величину $(dp/d\phi)_{max}$ до 0,58, или на 3,6%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{впр}$ до 23° приводит к повышению значения $(dp/d\phi)_{max}$ до 0,59, что характеризуется 5,4%. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 26° повышает уровень величины $(dp/d\phi)_{max}$ до 0,63, что соответствует 12,5%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{впр}$ до 29° повышает величину $(dp/d\phi)_{max}$ до 0,71, что характеризуется 26,8%; а при $\Theta_{впр}$ до 32° величина $(dp/d\phi)_{max}$ достигает максимума при исследуемых режимах - 0,82, рост характеризуется 46,4%. Величина угла ϕ_i , которая соответствует ПЗВ, при установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 17^\circ$, составляет 21,0°п.к.в. При увеличении $\Theta_{впр}$ до 20° значение ϕ_i повышается до 22,0°п.к.в., или на 4,8%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{впр}$ до 23° приводит к повышению значения ϕ_i до 22,5°п.к.в., т.е. на 7,1%. При увеличении $\Theta_{впр}$ до 26° значение ϕ_i повышается до 23,0°п.к.в., или на 9,5%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение ϕ_i повышается до 24,0°п.к.в., т.е. на 14,3%; при увеличении $\Theta_{впр}$ до 32° значение ϕ_i достигает максимума при исследуемых режимах - 24,5°п.к.в., что соответствует 16,7%.

двух режимах - 26,0° п.к.в., повышение характеризуется 23,8% .

Рассматривая экспериментальные кривые параметров процесса горения в ЦД, работающего по ГДП, необходимо выделить, что с увеличением установочного у.о.в.т. возрастают величины p_z , T_{\max} , λ , жесткости процесса горения $(dp/d\varphi)_{\max}$ и уменьшается значение угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Применение на ГД РОГ не изменяет характер протекания кривых относительно установочного у.о.в.т. и приводит к снижению T_{\max} , p_z , λ , $(dp/d\varphi)_{\max}$ и увеличению значения угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Изучая графики ГДП с РОГ можно заметить снижение p_z и $(dp/d\varphi)_{\max}$ относительно чисто ГДП. Так, при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и 10%-ной РОГ снижение p_z равняется 9,4 МПа, что соответствует 4,3%, но что, в свою очередь, на 8,0% выше ДП. Величина угла, соответствующего ПЗВ, повышается слабо. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ максимальное давление в ЦД при ГДП равняется 8,5 МПа, при ГДП с 10%-ной РОГ – 8,1 МПа, что меньше на 4,7% ГДП, и соответствует ДП. $(dp/d\varphi)_{\max}$ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ по ГДП с 10%-ной РОГ характеризуется 0,60 МПа/град, что соответствует снижению на 13,0% по отношению к ГДП и на 26,7% ниже ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

Падение параметров процесса горения на исследуемых $\Theta_{\text{впр}}$ дизеля, работающего по ГДП с РОГ характеризуется снижением α , что вызывает некоторый рост угла, соответствующего ПЗВ. Следовательно снижается не только временной интервал процесса горения, но и его интенсивность, что не может не сказываться на процессе окисления N_2 ТВС при недостатке O_2 в форме замедления процесса образования NO_x в ЦД и, естественно, снижает концентрацию NO_x в ОГ дизеля.

Анализируя графические зависимости показателей процесса сгорания дизеля на МТЭ следует пояснить, что с увеличением установочного у.о.в.т. возрастают T_{\max} , p_z , $(dp/d\varphi)_{\max}$ в ЦД, снижаются λ и значение угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Так, T_{\max} в ЦД при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 2380 К. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение T_{\max} повышается до 2430 К, или на 2,1%. При дальнейшем увеличении

$\Theta_{впр}$ до 26° значение T_{max} повышается до 2450 К, т.е. на 2,9%; при увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение T_{max} достигает максимума при исследуемых режимах - 2490 К, повышение составляет 4,6%. Максимальное давление сгорания p_z при установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 20^\circ$ составляет 6,8 МПа. При увеличении $\Theta_{впр}$ до 23° значение p_z повышается до 8,5 МПа, или на 25,0%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{впр}$ до 26° значение p_z повышается до 9,0 МПа, т.е. на 32,4%; при увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение p_z достигает максимума при исследуемых режимах - 9,1 МПа, что соответствует повышению на 33,8%. Величина λ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 20^\circ$ равняется 2,30. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 23° снижает величину λ до 2,27, что характеризуется 1,3%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{впр}$ до 26° понижает значение λ до 2,20, т.е. на 4,4%; при увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение λ достигает минимума при исследуемых режимах - 2,19, снижение составляет 4,8%. Величина $(dp/d\phi)_{max}$ при $\Theta_{впр} = 20^\circ$ равняется 1,10. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 23° повышает величину $(dp/d\phi)_{max}$ до 1,25, что соответствует 13,6%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{впр}$ до 26° повышает величину $(dp/d\phi)_{max}$ до 1,26, или на 14,6%. Если $\Theta_{впр}$ повышается до 29° то уровень $(dp/d\phi)_{max}$ достигает максимума при исследуемых режимах - 1,28, рост характеризуется 16,4%. Величина угла ϕ_i , равняющегося ПЗВ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 20^\circ$, соответствует 33,5°п.к.в. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 23° понижает значение ϕ_i до 30,0°п.к.в., или на 10,5%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{впр}$ до 26° значение ϕ_i снижается до 29,5°п.к.в., т.е. на 11,9%; а при увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение ϕ_i достигает минимума при исследуемых режимах - 29,0°п.к.в., снижение составляет 13,4%.

Рассматривая отличия работы дизеля на МТЭ от ДП необходимо выделить, что величины параметров процесса сгорания на МТЭ повышаются. Так, при установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 20^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдаются рост T_{max} на 17,2%, $(dp/d\phi)_{max}$ на 89,7%, степени повышения давления λ на 27,8%, угла ϕ_i , соответствующего ПЗВ, на 52,3% и снижение максимального давления сгорания p_z на 9,3%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 23^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдаются рост T_{max} на 11,0%, p_z на 4,9%, $(dp/d\phi)_{max}$ в 2,1 раза, степени повы-

шения давления λ на 19,0%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 33,3%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдаются рост T_{max} на 7,5%, p_z на 3,5%, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ в 2,0 раза, степени повышения давления λ на 6,8%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 28,3%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдаются рост T_{max} на 6,0%, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ на 80,3%, степени повышения давления λ на 0,5%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 20,8%, а максимальное давление сгорания p_z соответствует ДП.

Анализируя графические зависимости параметров процесса сгорания на ЭТЭ следует выделить, что с увеличением установочного у.о.в.т. возрастают T_{max} , p_z , $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$, λ и снижаются значения угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Так, T_{max} при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 2430 К. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение T_{max} повышается до 2510 К, или на 3,2%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение T_{max} повышается до 2580 К, т.е. на 6,2%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение T_{max} достигает максимума при исследуемых режимах - 2620 К, повышение составляет 7,8%. Максимальное давление сгорания p_z при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 8,2 МПа. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение p_z повышается до 8,9 МПа, или на 8,5%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение p_z повышается до 9,7 МПа, т.е. на 18,3%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение p_z достигает максимума при исследуемых режимах - 10,0 МПа, что соответствует повышению на 22,0%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ λ равняется 2,22. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° повышает значение λ до 2,27, или на 2,3%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение λ возрастает до 2,35, т.е. на 5,9%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение λ достигает максимума при исследуемых режимах - 2,40, увеличение составляет 8,1%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ равняется 0,90. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° повышает величину $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ до 1,01, что соответствует 12,2%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает величину $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ до 1,04, или на 15,6%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° вынуждает величину $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ достичь максимума при исследуемых режимах - 1,10, повышение составляет 22,2%. Величина угла φ_i , характеризующегося ПЗВ, при установочном

у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ равняется $29,0^\circ$ п.к.в. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° , 26° и 29° понижает значение φ_i до $28,0^\circ$ п.к.в., что соответствует 3,5% .

Изучая графические зависимости 4Ч 11,0/12,5 на ЭТЭ и дизельном топливе, следует пояснить, что величины параметров процесса сгорания на ЭТЭ, так же как и на МТЭ, увеличиваются. Так, при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдаются рост величин T_{max} на 19,7%, p_z на 9,3%, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ на 55,2%, степени повышения давления λ на 23,3%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 31,8%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдаются рост T_{max} на 14,6%, p_z на 9,9%, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ на 71,2%, степени повышения давления λ на 19,5%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 24,4%.

Таблица 5.1 - Результаты исследований показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме

($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	T_{max} , К	p_z , МПа	λ	$(dp/d\varphi)_{\text{max}}$, МПа/град	φ_i , градус
Дизельное	2190	8,1	1,90	0,59	22,5
ПГ	3010 (увеличение на 37,4%)	8,5 (увеличение на 4,9%)	2,0 (увеличение на 5,3%)	0,69 (увеличение на 17,0%)	30,0 (увеличение на 33,3%)
ПГ с РОГ 10%	2790 (увеличение на 27,4%)	8,1 (соответствует ДП)	1,90 (соответствует ДП)	0,60 (увеличение на 1,7%)	31,0 (увеличение на 37,8%)
ПГ с РОГ 20%	2680 (увеличение на 22,4%)	7,5 (снижение на 7,4%)	1,80 (снижение на 5,3%)	0,54 (снижение на 8,5%)	32,0 (увеличение на 6,7%)
МТЭ	2430 (увеличение на 11,0%)	8,5 (увеличение на 4,9%)	2,26 (увеличение на 19,0%)	1,25 (увеличение в 2,1 раза)	30,0 (увеличение на 33,3%)
ЭТЭ	2510 (увеличение на 14,6%)	8,9 (увеличение на 9,9%)	2,27 (увеличение на 19,5%)	1,01 (увеличение на 71,2%)	28,0 (увеличение на 24,4%)

При установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 26^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдается рост T_{max} на 13,2% , p_z на 11,5% , $(dp/d\varphi)_{max}$ на 65,1% , степени повышения давления λ на 14,1% , угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 21,7%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 29^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдается рост T_{max} на 11,5% , p_z на 9,9% , $(dp/d\varphi)_{max}$ на 54,9% , степени повышения давления λ на 10,1% , угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 16,7% .

На основании проведенных исследований на номинальном режиме работы и установочных у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 23^\circ$ и 26° применение КПГ и РОГ, МТЭ и ЭТЭ приводит к значениям параметров процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 , указанным в таблицах 5.1, 5.2.

Таблица 5.2 - Результаты исследований показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{впр} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	T_{max} , К	p_z , МПа	λ	$(dp/d\varphi)_{max}$, МПа/град	φ_i , градус
Дизельное	2280	8,7	2,06	0,63	23,0
ПГ	3190 (увеличение на 39,9%)	10,0 (увеличение на 14,9%)	2,35 (увеличение на 14,1%)	0,90 (увеличение на 42,9%)	30,5 (увеличение на 32,6%)
ПГ с РОГ 10%	3010 (увеличение на 32,0%)	9,4 (увеличение на 8,1%)	2,20 (увеличение на 6,8%)	0,76 (увеличение на 20,6%)	31,0 (увеличение на 34,8%)
ПГ с РОГ 20%	2750 (увеличение на 20,6%)	8,7 (соответствует ДП)	2,08 (увеличение на 1,0%)	0,65 (увеличение на 3,2%)	32,0 (увеличение на 39,1%)
МТЭ	2450 (увеличение на 7,5%)	9,0 (увеличение на 3,5%)	2,20 (увеличение на 6,8%)	1,26 (увеличение в 2,0 раза)	29,0 (увеличение на 26,1%)
ЭТЭ	2580 (увеличение на 13,2%)	9,7 (увеличение на 11,5%)	2,35 (увеличение на 14,1%)	1,04 (увеличение на 65,1%)	28,0 (увеличение на 21,7%)

Результаты исследований характеристик процесса горения дизеля

4Ч 11,0/12,5, зависящие от $\Theta_{\text{впр}}$, при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ изображены на рисунке 5.3, б. Исследуя кривые параметров процесса сгорания при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ хорошо видно, что их зависимости в основном соответствуют номинальному режиму при отличающихся числовых значениях. Рассматривая кривые параметров процесса сгорания по ДП, следует выделить, что с увеличением установочного у.о.в.т. возрастают величины T_{max} , p_z , λ , $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ и значение угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Так, величина T_{max} при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ составляет 1920 К. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° значение T_{max} повышается до 2120 К, или на 10,4%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к повышению значения T_{max} до 2210 К, т.е. на 15,1%. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение T_{max} повышается до 2280 К, или на 18,8%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение T_{max} повышается до 2360 К, т.е. на 22,9%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° значение T_{max} достигает максимума при исследуемых режимах - 2410 К, повышение составляет 25,5%.

Максимальное давление сгорания p_z при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ составляет 7,3 МПа. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° значение p_z повышается до 8,0 МПа, или на 9,6%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к повышению значения p_z до 8,6 МПа, т.е. на 17,8%. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение p_z повышается до 9,1 МПа, или на 24,7%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение p_z повышается до 9,5 МПа, т.е. на 30,1%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° значение p_z достигает максимума при исследуемых режимах - 9,8 МПа, что соответствует повышению на 34,2%. Величина λ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется 1,74. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° повышает значение λ до 1,84, или на 5,8%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к повышению значения λ до 2,0, что соответствует 14,9%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает значения λ до 2,18, что характеризуется 25,3%. Дальнейший рост $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° повышает значения λ до 2,25, что соответствует 29,3%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° вызывает значения λ достичь максимума при исследуемых режимах - 2,30, повышение составляет 32,2%.

Величина $(dp/d\phi)_{\max}$ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется 0,59. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° повышает значения $(dp/d\phi)_{\max}$ до 0,61, или на 3,4%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к повышению значения $(dp/d\phi)_{\max}$ до 0,64, что соответствует 8,5%. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает значения $(dp/d\phi)_{\max}$ до 0,71, что характеризуется 20,3%. Последующее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° повышает значения $(dp/d\phi)_{\max}$ до 0,78, что соответствует 32,2%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° вызывает значения $(dp/d\phi)_{\max}$ достичь максимума при исследуемых режимах - 0,84, что характеризуется повышением 42,4%. Величина угла ϕ_i , характеризующего ПЗВ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ равняется $18,0^\circ$ п.к.в. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 20° повышает значения ϕ_i до $19,0^\circ$ п.к.в., или на 5,6%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° приводит к повышению значения ϕ_i до $20,0^\circ$ п.к.в., т.е. на 11,1%. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение ϕ_i повышается до $21,0^\circ$ п.к.в., или на 16,7%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение ϕ_i повышается до $22,0^\circ$ п.к.в., т.е. на 22,2%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 32° значение ϕ_i достигает максимума при исследуемых режимах - $24,0^\circ$ п.к.в., повышение соответствует 33,3%.

Рассматривая кривые параметров процесса сгорания ГДП, необходимо отметить, что с увеличением установочного у.о.в.т. при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ возрастают величины T_{\max} , p_z , λ , $(dp/d\phi)_{\max}$ и значения угла ϕ_i , соответствующего ПЗВ. Применение на газодизеле РОГ не изменяет характер протекания кривых относительно установочного у.о.в.т. и приводит к снижению максимальной осредненной температуры газов в ЦД T_{\max} , p_z , λ , $(dp/d\phi)_{\max}$ и увеличению значения угла ϕ_i , соответствующего ПЗВ. Так, следует выделить, что на ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ уменьшается величина p_z до 10,6 МПа, что соответствует снижению на 6,2% по отношению к ГДП и на 16,5% выше ДП. Величина $(dp/d\phi)_{\max}$ на этом же режиме падает до 0,92 МПа/град, а величина угла, характеризующего ПЗВ несколько повышается. При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ максимальное давление в ЦД при ГДП равняется 11,0 МПа, при ГДП с 10%-ной РОГ – 10,2 МПа, что соответствует снижению на 7,3% по отношению к ГДП и выше на 18,6% ДП. Величина

$(dp/d\varphi)_{\max}$ равняется 0,76 МПа/град, что больше на 8,4% ГДП и меньше на 17,4% ГДП с 10%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

Анализируя графические зависимости на МТЭ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, можно отметить, что с увеличением установочного у.о.в.т. возрастают величины T_{\max} , p_z , $(dp/d\varphi)_{\max}$, λ и значения угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Так, величина T_{\max} при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 2430 К. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение T_{\max} повышается до 2460 К, или на 1,2%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение T_{\max} повышается до 2490 К, т.е. на 2,5%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение T_{\max} достигает максимума при исследуемых режимах - 2550 К, повышение составляет 4,9%. Максимальное давление сгорания p_z при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 8,5 МПа. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение p_z повышается до 8,9 МПа, или на 4,7%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение p_z повышается до 9,3 МПа, т.е. на 9,4%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение p_z достигает максимума при исследуемых режимах - 9,6 МПа, что соответствует повышению на 12,9%. Величина λ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует значению 2,08. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° повышает значение λ до 2,30, или на 10,6%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение λ растет до 2,34, т.е. на 12,5%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение λ достигает максимума при исследуемых режимах - 2,38, повышение составляет 14,4%. Величина $(dp/d\varphi)_{\max}$ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует значению 1,27. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° повышает величину $(dp/d\varphi)_{\max}$ до 1,36, что соответствует 7,1%. Последующее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает величину $(dp/d\varphi)_{\max}$ до 1,44, что характеризуется 13,4%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° вызывает величину $(dp/d\varphi)_{\max}$ достичь максимума при исследуемых режимах - 1,53, что соответствует повышению на 20,5%. Величина угла φ_i , характеризующего ПЗВ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$, составляет 23,0°п.к.в. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение φ_i повышается до 25,0°п.к.в., или на 8,7%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение φ_i повышается до

27,0° п.к.в., т.е. на 17,4%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение φ_i достигает максимума при исследуемых режимах - 29,5° п.к.в., повышение составляет 28,3%.

Исследуя зависимости работы дизеля 4Ч11,0/12,5 на МТЭ и дизельном топливе при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, необходимо выделить увеличение параметров процесса сгорания на МТЭ. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдается рост величин T_{max} на 14,6%, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ в 2,1 раза, степени повышения давления λ на 13,0%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 21,0% и максимального давления сгорания p_z на 6,3%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдается увеличение значений T_{max} на 11,3%, p_z на 3,5%, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ в 2,1 раза, степени повышения давления λ на 15,0%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 25,0%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдается рост T_{max} на 9,2%, p_z на 2,2%, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ в 2,0 раза, степени повышения давления λ на 7,3%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 28,6%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ при переходе с ДП на МТЭ наблюдается рост T_{max} на 8,1%, p_z на 1,1%, $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ на 96,2%, степени повышения давления λ на 5,8%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 34,1%.

Анализируя параметры процесса горения ЭТЭ при $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ можно также отметить, что с увеличением установочного у.о.в.т. возрастают величины T_{max} , p_z , $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$, λ и значения угла φ_i , соответствующего ПЗВ. Так, величина T_{max} при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 2480 К. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение T_{max} повышается до 2540 К, или на 2,4%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение T_{max} повышается до 2600 К, т.е. на 4,8%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение T_{max} достигает максимума при исследуемых режимах - 2660 К, повышение составляет 7,3%. Максимальное давление сгорания p_z при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ составляет 9,0 МПа. При увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° значение p_z повышается до 9,2 МПа, или на 2,2%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение p_z повышается до 9,8 МПа, т.е. на 8,9%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение p_z достигает максимума при исследуемых режимах - 10,2 МПа, что соответствует по-

вышению на 13,3%. Величина λ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует значению 2,31. Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° повышает значение λ до 2,36, или на 2,2%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° значение λ возрастает до 2,43, т.е. на 5,2%; при увеличении $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° значение λ достигает максимума при исследуемых режимах - 2,58, увеличение составляет 11,7%. Величина $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ соответствует уровню 1,12.

Таблица 5.3 - Результаты исследований показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	T_{max} , К	P_z , МПа	λ	$(dp/d\varphi)_{\text{max}}$, МПа/град	φ_i , градус
Дизельное	2210	8,6	2,0	0,64	20,0
ПГ	3050 (увеличение на 38,0%)	11,0 (увеличение на 27,9%)	2,60 (увеличение на 30,0%)	0,83 (увеличение на 29,7%)	22,0 (увеличение на 10,0%)
ПГ с РОГ 10%	2880 (увеличение на 30,3%)	10,2 (увеличение на 18,6%)	2,40 (увеличение на 20,0%)	0,76 (увеличение на 18,8%)	24,0 (увеличение на 20,0%)
ПГ с РОГ 20%	2710 (увеличение на 22,6%)	9,2 (увеличение на 7,0%)	2,32 (увеличение на 16,0%)	0,66 (увеличение на 3,1%)	23,0 (увеличение на 15,0%)
МТЭ	2460 (увеличение на 11,3%)	8,9 (увеличение на 3,5%)	2,30 (увеличение на 15,0%)	1,36 (увеличение в 2,1 раза)	25,0 (увеличение на 25,0%)
ЭТЭ	2540 (увеличение на 14,9%)	9,2 (увеличение на 7,0%)	2,36 (увеличение на 18,0%)	1,19 (увеличение на 85,9%)	25,5 (увеличение на 27,5%)

Увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 23° повышает уровень величины $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ до 1,19, что соответствует 6,3%. Дальнейшее увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 26° повышает значения $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ до 1,31, что характеризуется 17,0%; увеличение $\Theta_{\text{впр}}$ до 29° вызывает значения $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ достичь максимума при исследуемых режимах - 1,45, что соответствует повышению 29,5%. Величина угла φ_i , характеризующего ПЗВ при

установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 20^\circ$, соответствует 23,5°п.к.в. Увеличение $\Theta_{впр}$ до 23° повышает значение φ_i до 25,5°п.к.в., или на 8,5%. При дальнейшем увеличении $\Theta_{впр}$ до 26° значение φ_i повышается до 26,5°п.к.в., что составляет 12,8%, а при увеличении $\Theta_{впр}$ до 29° значение φ_i повышается до 27,0°п.к.в., что уже составляет 14,9%.

Таблица 5.4 - Результаты исследований показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{впр} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	T_{\max} , К	p_z , МПа	λ	$(dp/d\varphi)_{\max}$, МПа/град	φ_i , градус
Дизельное	2280	9,1	2,18	0,71	21,0
ПГ	3210 (увеличение на 40,8%)	11,3 (увеличение на 24,2%)	2,70 (увеличение на 30,0%)	0,98 (увеличение на 38,0%)	23,0 (увеличение на 9,5%)
ПГ с РОГ 10%	3030 (увеличение на 32,9%)	10,6 (увеличение на 16,5%)	2,50 (увеличение на 20,0%)	0,92 (увеличение на 29,6%)	24,0 (увеличение на 14,3%)
ПГ с РОГ 20%	2780 (увеличение на 21,9%)	9,9 (увеличение на 8,8%)	2,34 (увеличение на 16,0%)	0,83 (увеличение на 16,9%)	25,0 (увеличение на 19,1%)
МТЭ	2490 (увеличение на 9,2%)	9,3 (увеличение на 2,2%)	2,34 (увеличение на 15,0%)	1,44 (увеличение в 2,0 раза)	27,0 (увеличение на 28,6%)
ЭТЭ	2600 (увеличение на 14,0%)	9,8 (увеличение на 7,7%)	2,43 (увеличение на 18,0%)	1,31 (увеличение на 84,5%)	26,5 (увеличение на 26,2%)

Исследуя графические зависимости работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ЭТЭ и дизельном топливе следует отметить увеличение параметров процесса сгорания на ЭТЭ, так же как и на МТЭ. Так, при установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 20^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдается рост T_{\max} на 17,0, p_z на 12,5, $(dp/d\varphi)_{\max}$ на 83,6%, степени повышения давления λ на 25,5%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 23,7%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 23^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюда-

ется рост T_{\max} на 14,9%, p_z на 7,0%, $(dp/d\varphi)_{\max}$ на 85,9%, степени повышения давления λ на 18,0%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 27,5%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдается рост T_{\max} на 14,0%, p_z на 7,7%, $(dp/d\varphi)_{\max}$ на 84,5%, степени повышения давления λ на 11,5%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 26,2%. При установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ при переходе с ДП на ЭТЭ наблюдается рост T_{\max} на 12,7%, p_z на 7,4%, $(dp/d\varphi)_{\max}$ на 85,9%, степени повышения давления λ на 14,7%, угла φ_i , соответствующего ПЗВ, на 22,7%.

Результаты исследований параметров процесса сгорания дизеля 4Ч11,0/12,5, работающего на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, при установочных у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и 26° и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ сведены в таблицы 5.3 и 5.4.

5.2 Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля на ПГ и СТЭ на нагрузочных режимах

На рисунке 5.4, а представлены показатели процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при частоте вращения 2200 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ на различных нагрузочных режимах работы.

Анализ кривых, соответствующих работе ДП, на номинальной частоте вращения позволяет сделать следующие выводы. Значение максимальной осредненной температуры T_{\max} повышается с 1600 К при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ до 2400 К при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$. Рост значения температуры составляет 800 К, или 50,0%. При увеличении нагрузки повышается значение $p_{z \max}$ от 5,8 МПа при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ до 8,4 МПа при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$, т.е. повышение составляет 2,6 МПа, или 44,8%. При увеличении нагрузки величина λ возрастает. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ значение $\lambda = 1,3$, при увеличении нагрузки до максимальной $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ значение λ составляет 2,0. Повышение значения λ составляет 53,9%. Значение $(dp/d\varphi)_{\max}$ повышается с 0,36 МПа/град при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ до 0,62 МПа/град при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$, или на 72,2%.

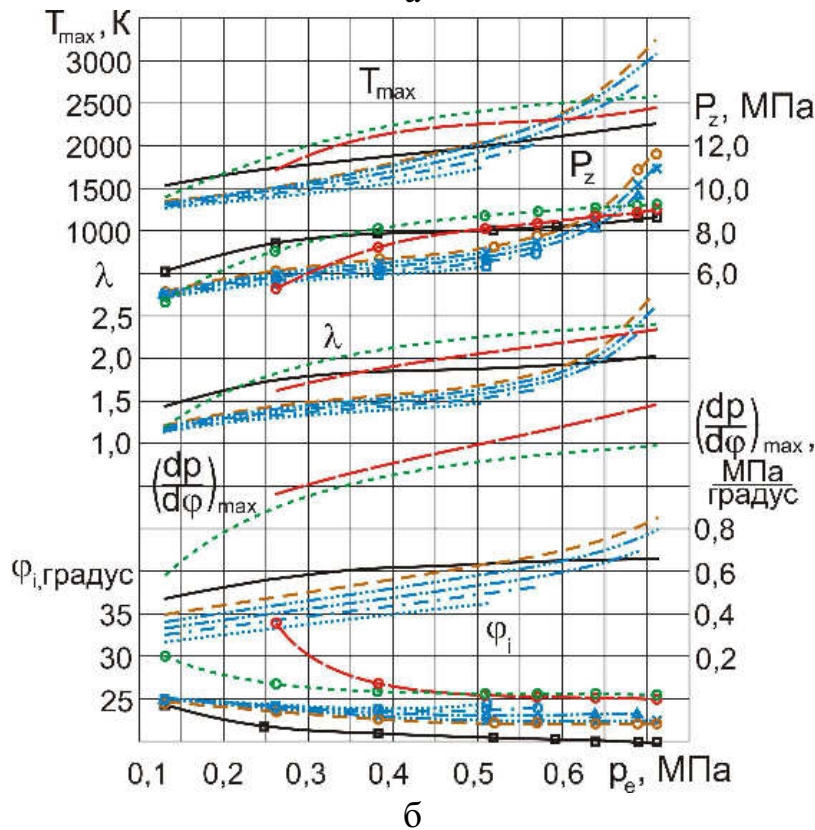
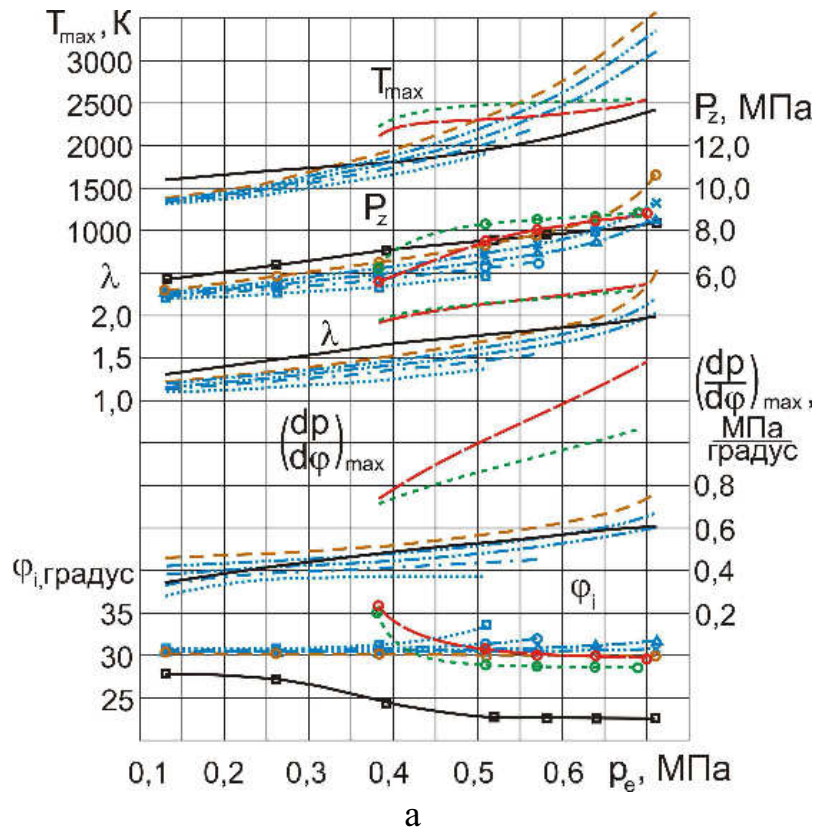


Рисунок 5.4 – Зависимости показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; ———— – ДП; - - - - - ГДП; – ГД с РОГ 10%; - · - · - · – ГД с РОГ 20%; - - - - - – ГД с РОГ 30%; ······ – ГД с РОГ 40%; – ЭТЭ; - · - · - · – МТЭ

Значение угла φ_i , соответствующего ПЗВ, с увеличением нагрузки несколько снижается. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение φ_i составляет $27,5^\circ$ п.к.в., а при нагрузке $p_e = 0,71$ МПа - $22,5^\circ$ п.к.в. Снижение составляет $5,0^\circ$ п.к.в. Рассматривая работу дизеля на ПГ, хорошо видно, что с увеличением нагрузки происходит «классический» рост максимальной осредненной температуры газов в цилиндре, максимального давления, степени повышения давления, жесткости процесса сгорания и снижение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения. Так, в диапазоне изменения нагрузки от 0,13 до 0,71 МПа значения T_{\max} увеличиваются от 1400 до 3560 К, или в 2,5 раза; $p_{z \max}$ с 5,2 до 10,4 МПа, или ровно в 2 раза; λ с 1,2 до 2,5, или в 2,1 раза; $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 0,46 до 0,76 МПа/град, или на 65,2% и снижение φ_i с $30,5$ до $29,5^\circ$ п.к.в., или на 1° п.к.в. При работе дизеля на ПГ с РОГ характер протекания кривых полностью совпадает с газодизельным процессом, а значения графиков «лежат» ниже кривых чисто ГДП (кроме φ_i) во всем диапазоне изменения нагрузок и уменьшаются с увеличением степени РОГ. Так, при работе по ГДП с 40%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ в диапазоне изменения нагрузок от 0,13 до 0,51 МПа происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на 100...400 К, максимального давления на 7,9...19,2% и жесткости процесса сгорания на 40,4...34,5%. При работе по ГДП с 10%-ной РОГ на номинальной нагрузке происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на 150°К , максимального давления на 3,5% и жесткости процесса сгорания на 15,5%; при работе с 20%-ной РОГ – максимальной осредненной температуры на 300°К , максимального давления на 9,4% и жесткости процесса сгорания на 18,8%. Угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при ГДП с РОГ выше, чем при газодизельном на всех нагрузочных режимах и увеличивается с увеличением степени РОГ.

Анализ кривых, соответствующих работе дизеля на МТЭ, на номинальной частоте вращения показывает, что характер изменения кривых схож с параметрами при работе по ДП во всем диапазоне изменения нагрузки p_e (от 0,38 до 0,70 МПа). Отсутствие значений показателей процесса сгорания при

$p_e < 0,38$ МПа связано с нестабильностью горения и пропусками воспламенения. Максимальная осредненная температура в ЦД T_{\max} растет от 2120 К при $p_e = 0,38$ МПа до 2600 К при $p_e = 0,70$ МПа. Рост значения температуры составляет 480 К, или 22,6%. При возрастании величин нагрузки повышается значение $p_{z \max}$, от 5,6 МПа ($p_e = 0,38$ МПа) до 8,8 МПа ($p_e = 0,70$ МПа), что соответствует увеличению $p_{z \max}$ на 3,2 МПа, или 57,1%. При повышении нагрузки возрастает значение λ . При $p_e = 0,38$ МПа значение λ составляет 1,83, а при увеличении нагрузки до максимальной - $\lambda = 2,33$. Повышение составляет 27,3%. Значение $(dp/d\phi)_{\max}$ повышается от 0,75 МПа/град при $p_e = 0,38$ МПа до 1,37 МПа/град при $p_e = 0,70$ МПа, или на 82,7%. Значение угла ϕ_i с увеличением нагрузки уменьшается. Так, при $p_e = 0,38$ МПа - $\phi_i = 36,0^\circ$ п.к.в., а при нагрузке $p_e = 0,70$ МПа - $\phi_i = 30,0^\circ$ п.к.в. Снижение составляет $6,0^\circ$ п.к.в.

Сравнивая числовые параметры показателей процесса сгорания в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения $n = 2200$ мин⁻¹ и оптимальных установочных у.о.в.т. при работе на дизельном топливе и МТЭ можно отметить следующее. Максимальная осредненная температура цикла при работе дизеля на МТЭ при нагрузке $p_e = 0,38$ МПа повышается и составляет 2120 К по сравнению с T_{\max} при работе по ДП, которая составляет 1750 К. Рост соответствует 21,1%. При повышении p_e до 0,70 МПа числовые параметры T_{\max} при работе дизеля на МТЭ растут и составляют 2600 К по сравнению с ДП, T_{\max} которого равняется 2400 К. Увеличение составляет 200 К, или 8,3%. При работе дизеля на МТЭ максимальное давление сгорания при нагрузке до $p_e = 0,52$ МПа меньше, чем при работе по ДП. При нагрузке, равной 0,38 МПа, значение $p_{z \max}$ снижается от 7,1 МПа при работе по ДП до значения 5,6 МПа при работе дизеля на МТЭ, т.е. на 26,8%. При нагрузке, равной, примерно, 0,52 МПа, происходит выравнивание значений $p_{z \max}$. При дальнейшем увеличении нагрузки величина $p_{z \max}$ возрастает. Так, при $p_e = 0,70$ МПа значение $p_{z \max}$ составляет 8,3 МПа при работе по ДП, а при работе дизеля на МТЭ $p_{z \max} = 8,8$ МПа, увеличение соответствует 0,5 МПа, или 6,0%. Степень повышения давления λ при $p_e = 0,38$ МПа составляет 1,68 при работе по ДП, а при работе дизеля на МТЭ

$\lambda = 1,83$, повышение составляет 8,9%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа значения λ при работе на МТЭ также превышают значения при работе по ДП на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,70$ МПа при работе по ДП значение λ равняется 2,0, а при работе на МТЭ - 2,33. Т.е. в области высокой нагрузки повышение значения λ составляет 16,5%. Величина «жесткости» процесса сгорания при работе на МТЭ выше на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,38$ МПа и работе по ДП жесткость процесса сгорания $(dp/d\phi)_{\max}$ составляет 0,52 МПа/град, а при работе дизеля на МТЭ - 0,75 МПа/град. Повышение значения составляет 44,2%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа жесткость процесса сгорания при работе по ДП составляет 0,62 МПа/град, а при работе дизеля на МТЭ $(dp/d\phi)_{\max} = 1,37$ МПа/град повышение составляет 2,2 раза. При работе дизеля на МТЭ значения ПЗВ превышают показатели ДП во всем диапазоне изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,38$ МПа при работе дизеля на МТЭ $\phi_i = 36,0^\circ$ п.к.в., а при работе по ДП $\phi_i = 24,5^\circ$ п.к.в. Повышение составляет $11,5^\circ$ п.к.в., или 46,9%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа значение ϕ_i при работе на МТЭ составляет $30,0^\circ$ п.к.в., а при работе по ДП $\phi_i = 22,5^\circ$ п.к.в. Повышение составляет $7,5^\circ$ п.к.в., или 33,3%.

При анализе нагрузочных характеристик, соответствующих работе дизеля на ЭТЭ на номинальной частоте вращения и при оптимальном установочном у.о.в.т., значения основных характеристик изменяются по схожим закономерностям, как при работе по ДП. Из графиков видно, что устойчивое горение без пропусков воспламенения горючей смеси при работе дизеля на ЭТЭ начинается при нагрузке, соответствующей $p_e = 0,38$ МПа. При повышении p_e от 0,38 до 0,69 МПа увеличиваются значения максимальной осредненной температуры от 2233 до 2530 К, соответственно. Увеличение составляет 297 К, или 13,3%. Также происходит увеличение максимального давления цикла $p_{z \max}$ от 6,3 МПа при $p_e = 0,38$ МПа до 9,1 МПа при $p_e = 0,69$ МПа, увеличение составляет 2,8 МПа, или 44,4%. Также при возрастании нагрузки происходит увеличение степени повышения давления λ от 1,91 при $p_e = 0,38$ МПа до 2,30 при $p_e = 0,69$ МПа. Увеличение λ составляет 0,39, или 20,4%. Происходит увеличение скорости нарастания давле-

ния газов в ЦД $(dp/d\phi)_{\max}$ от 0,71 МПа/град при $p_e = 0,38$ МПа до 1,06 МПа/град при $p_e = 0,69$ МПа. Рост $(dp/d\phi)_{\max}$ составляет 49,3%. Также, с увеличением нагрузки происходит снижение значения ϕ_i , который соответствует ПЗВ, от 35,0°п.к.в. при $p_e = 0,38$ МПа до 28,0°п.к.в. Разница значений составляет 7, 0°п.к.в., или 20,0%.

Сравнивая работу дизеля 4Ч 11,0/12,5 по ДП и на ЭТЭ на установочном у.о.в.т. (оптимальном) и номинальной частоте вращения ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$) при различных значениях p_e , необходимо охарактеризовать некоторые принципиальные особенности. Так, при работе по ДП при среднем эффективном давлении 0,38 МПа максимальная осредненная температура цикла составляет 1750 К, а применение ЭТЭ вызывает увеличение T_{\max} до 2233 К. А с возрастанием нагрузки до 0,69 МПа T_{\max} возрастает с 2380 до 2530 К при переходе с ДП на ЭТЭ. Увеличение составляет 150 К, или 5,9%. При работе на ЭТЭ максимальное давление сгорания $p_{z \max}$ при малых значениях нагрузки ($p_e = 0,38$ МПа) меньше ДП и составляет $p_{z \max} = 6,30$ МПа, а при работе по ДП $p_{z \max} = 7,1$ МПа. Снижение составляет 0,8 МПа, или 11,3%. При возрастании нагрузки до 0,69 МПа при переходе с дизельного на работу на ЭТЭ происходит увеличение $p_{z \max}$ с 8,9 до 9,1 МПа, что составляет 2,3%. При нагрузке $p_e = 0,38$ МПа при работе по ДП $\lambda = 1,68$ и возрастает до 1,91 при переходе на ЭТЭ, или на 13,7%. С повышением нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа применение ЭТЭ увеличивает значение λ от 1,96 при работе по ДП до 2,30, или на 17,4%. Сравнивая работу ДП и ЭТЭ, необходимо констатировать, что происходит рост скорости нарастания давления газов на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,38$ МПа применение ЭТЭ приводит к росту $(dp/d\phi)_{\max}$ от 0,52 МПа/град при работе по ДП до 0,71 МПа/град, или на 36,5%. Максимальная нагрузка приводит к увеличению разницы в значениях жесткости. Так, при $p_e = 0,69$ МПа применение ЭТЭ вызывает рост $(dp/d\phi)_{\max}$ от 0,60 МПа/град при ДП до 1,06 МПа/град при ЭТЭ, или на 76,7%. Также просматривается и увеличение ϕ_i . На режиме ($p_e = 0,38$ МПа) при работе по ДП $\phi_i = 24,5^\circ$ п.к.в., а при работе на ЭТЭ $\phi_i = 35,0^\circ$ п.к.в. С возрастанием нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа при работе по ДП $\phi_i = 21,5^\circ$ п.к.в., а при работе на ЭТЭ увеличивается до 28,0°п.к.в., или на 42,9%.

На рисунке 5.4, б представлены показатели процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при частоте вращения 1700 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ на различных нагрузочных режимах работы.

Анализ кривых, соответствующих работе ДП, на частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, позволяет сделать следующие выводы. Значение максимальной осредненной температуры T_{max} повышается с 1520 К при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ до 2260 К при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$. Рост значения температуры составляет 740 К, или 48,7%. При увеличении нагрузки повышается значение $p_{z \text{ max}}$ от 6,1 МПа ($p_e = 0,13 \text{ МПа}$) до 8,5 МПа ($p_e = 0,71 \text{ МПа}$), что соответствует увеличению на 2,4 МПа, или 39,3%. При увеличении нагрузки степень повышения давления λ также возрастает. Так, при работе дизеля по ДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ значение $\lambda = 1,40$, при увеличении нагрузки до максимальной $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ значение λ составляет 2,05. Повышение значения λ составляет 46,4%. Значение $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ повышается с 0,46 МПа/град при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ до 0,64 МПа/град при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$, или на 39,1%. Значение угла ϕ_i , соответствующего ПЗВ, с увеличением нагрузки несколько снижается. Так, при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ значение ϕ_i составляет $24,5^\circ \text{ п.к.в.}$, а при нагрузке $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ - $20,0^\circ \text{ п.к.в.}$, или снижается на $4,5^\circ$.

Рассматривая работу дизеля на ПГ, хорошо видно, что с увеличением нагрузки, так же как и при номинальной частоте вращения, происходит «классический» рост максимальной осредненной температуры газов в цилиндре, максимального давления, степени повышения давления, жесткости процесса сгорания и снижение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения. Так, в диапазоне изменения p_e от 0,13 до 0,71 МПа повышение значений T_{max} составляет от 1350 до 3300 К, или в 2,4 раза; $p_{z \text{ max}}$ с 5,2 до 11,8 МПа, или в 2,3 раза; λ с 1,2 до 2,7, или в 2,3 раза; $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ от 0,40 до 0,84 МПа/град, или в 2,1 раза, и снижение ϕ_i с $25,0^\circ \text{ п.к.в.}$ до $22,0^\circ \text{ п.к.в.}$, или на 3° п.к.в.

При работе дизеля на ПГ с РОГ характер протекания кривых полностью совпадает с газодизельным процессом, а значения графиков «лежат» ниже кривых чисто ГДП (кроме ϕ_i) во всем диапазоне изменения нагрузок и уменьшаются с

увеличением степени РОГ. Так, при работе по ГДП с 40%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 23$ градуса в диапазоне изменения нагрузок от 0,13 до 0,51 МПа происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на 50...800 К, максимального давления на 3,9...13,9% и жесткости процесса сгорания на 25,0...29,0%. При работе по ГДП с 10%-ной РОГ на максимальной нагрузке происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на 200°К, максимального давления на 5,1% и жесткости процесса сгорания на 4,8%; при работе с 20%-ной РОГ – максимальной осредненной температуры на 340°К, максимального давления на 7,4% и жесткости процесса сгорания на 20,5%. Угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при ГДП с РОГ выше, чем при газодизельном на всех нагрузочных режимах и увеличивается с увеличением степени РОГ.

Анализ кривых, соответствующих работе дизеля на МТЭ, на частоте вращения $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ показывает, что характер изменения кривых аналогичен работе ДП во всем диапазоне изменения нагрузки p_e (от 0,26 до 0,71 МПа). Отсутствие значений показателей процесса сгорания при $p_e < 0,26$ МПа связано с нестабильностью горения и пропусками воспламенения. С увеличением нагрузки значение T_{max} возрастает от 1690 К при $p_e = 0,26$ МПа до 2460 К при $p_e = 0,71$ МПа. Повышение значения T_{max} составляет 770 К, или 45,6%. При увеличении нагрузки повышается значение $p_{z \text{ max}}$ от 5,2 МПа ($p_e = 0,26$ МПа) до 9,0 МПа ($p_e = 0,71$ МПа), что соответствует увеличению $p_{z \text{ max}}$ на 3,8 МПа, или 73,1%. При увеличении нагрузки также возрастает степень повышения давления. Так, при $p_e = 0,26$ МПа значение λ составляет 1,61, а при увеличении нагрузки до максимальной, при $p_e = 0,71$ МПа, значение λ составляет 2,32, т.е. повышается на 44,1%. Значение жесткости $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ повышается с 0,97 МПа/град при $p_e = 0,26$ МПа до 1,42 МПа/град при $p_e = 0,71$ МПа, или на 46,4%. Значение угла ϕ_i с увеличением нагрузки снижается. При величине нагрузки, равной 0,26 МПа, ϕ_i составляет 34,0° п.к.в., а при нагрузке $p_e = 0,71$ ϕ_i - 25,0° п.к.в. Уменьшение соответствует 9,0°.

Сравнивая значения параметров процесса сгорания в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при работе на дизельном топливе и МТЭ, можно отметить следующее. Максимальная осредненная температура цикла при работе дизеля на МТЭ на нагрузках $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ незначительно меньше, по сравнению с T_{max} при работе по ДП, значения составляют 1690 и 1700 К соответственно. Снижение составляет 10 К, или 0,6%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ величина T_{max} при работе дизеля на МТЭ составляет 2460 К по сравнению с T_{max} при работе по ДП, которая равна 2260 К, что соответствует увеличению на 200 К, или 8,9%. При работе на МТЭ максимальное давление сгорания при изменении величин нагрузок от $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ до $p_e = 0,47 \text{ МПа}$ меньше, чем при работе по ДП. Так, при $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ значение $p_{z \text{ max}}$ снижается с 7,4 МПа при работе по ДП до $p_{z \text{ max}} = 5,2 \text{ МПа}$ при работе дизеля на МТЭ. Снижение составляет 2,2 МПа, или 29,7%. При p_e , равном 0,47 МПа, значения $p_{z \text{ max}}$ выравниваются при работе на обоих топливах (МТЭ и ДП). С увеличением нагрузки происходит повышение значения $p_{z \text{ max}}$. При работе по ДП на нагрузке, равной 0,71 МПа, $p_{z \text{ max}}$ соответствует 8,5 МПа, а при работе дизеля на МТЭ $p_{z \text{ max}} = 9,0 \text{ МПа}$, что соответствует повышению на 0,5 МПа, или 5,9%. Степень повышения давления при работе на МТЭ повторяет зависимость максимального давления сгорания, т.е. меньше ДП на малых нагрузках и растет по отношению к ДП на больших. Так, при $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ λ составляет 1,75 при работе по ДП, а при работе дизеля на МТЭ - 1,61, снижение составляет 8,0%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ при работе по ДП λ составляет 2,05, а при работе на МТЭ - 2,32. Т.е. увеличение значения λ в области высокой нагрузки уже более значительно и составляет 13,2%. Величина жесткости процесса сгорания на МТЭ всегда больше ДП. При $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ при работе по ДП $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ составляет 0,58 МПа/град, а при работе на МТЭ - 0,97 МПа/град. Повышение составляет 67,2%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ при работе по ДП составляет 0,64 МПа/град, а при работе дизеля на МТЭ - 1,42 МПа/град. Повышение составляет в 2,2 раза. При работе дизеля на МТЭ ПЗВ выше ДП на всех нагрузочных режимах. Так, при

$p_e = 0,26$ МПа при работе дизеля на МТЭ значение φ_i составляет $34,0^\circ$ п.к.в., а при работе по ДП - $22,0^\circ$ п.к.в. Повышение составляет $12,0^\circ$ п.к.в., или $54,6\%$. При дальнейшем увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа значение φ_i при работе на МТЭ составляет $25,0^\circ$ п.к.в., а при работе по ДП φ_i составляет $20,0^\circ$ п.к.в., т.е. повышается на $5,0^\circ$ п.к.в., или на $25,0\%$.

При анализе нагрузочных характеристик, соответствующих работе дизеля на ЭТЭ, на частоте вращения при максимальном крутящем моменте и $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ значения основных характеристик изменяются по схожим закономерностям, как при работе по ДП. Из графических зависимостей видно, что при повышении p_e от $0,13$ до $0,71$ МПа возрастает максимальная осредненная температура от 1384 до 2560 К соответственно. Увеличение составляет 1176 К, или $85,0\%$. Происходит увеличение максимального давления цикла $p_{z \text{ max}}$ от $4,5$ МПа при $p_e = 0,13$ МПа до $9,4$ МПа при $p_e = 0,71$ МПа, увеличение составляет $4,9$ МПа, или $2,1$ раза. Также при увеличении нагрузки происходит увеличение степени повышения давления λ от $1,2$ при $p_e = 0,13$ МПа до $2,4$ при $p_e = 0,71$ МПа. Увеличение λ составляет $1,2$ или ровно в $2,0$ раза. Также происходит увеличение скорости нарастания давления газов в ЦД $(dp/d\varphi)_{\text{max}}$ от $0,58$ МПа/град при $p_e = 0,13$ МПа до $1,18$ МПа/град при $p_e = 0,71$ МПа. С увеличением нагрузки происходит снижение значения φ_i , который соответствует ПЗВ, от $30,0^\circ$ п.к.в. при $p_e = 0,13$ МПа до $25,5^\circ$ п.к.в. Разница значений составляет $4,5^\circ$ п.к.в., или $15,0\%$.

Оценивая работу дизеля 4Ч 11,0/12,5 по ДП и на ЭТЭ при частоте вращения 1700 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, при изменении нагрузки необходимо охарактеризовать некоторые принципиальные особенности. При p_e , соответствующем $0,13$ МПа, происходит снижение максимальной осредненной температуры цикла от 1520 К при работе по ДП до 1384 К при работе на ЭТЭ. С увеличением нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа уже прослеживается увеличение T_{max} от 2260 К при работе по ДП до 2560 К при работе на ЭТЭ, что соответствует повышению на 300 К, или $13,3\%$. На ЭТЭ при величине нагрузки, равной $0,13$ МПа, $p_{z \text{ max}}$ меньше ДП и составляет $4,5$ МПа, а при работе по ДП $p_{z \text{ max}} = 6,1$ МПа. Снижение составляет $1,6$ МПа, или $26,2\%$. При увеличении нагрузки до $0,71$ МПа при переходе с ди-

зельного на работу на ЭТЭ происходит увеличение $p_{z \max}$ с 8,5 до 9,4 МПа, что составляет 10,6%. При нагрузке $p_e = 0,13$ МПа при работе по ДП $\lambda = 1,4$ и снижается до 1,2 при переходе на ЭТЭ, или на 14,3%. С повышением нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа применение ЭТЭ увеличивает значение λ от 2,05 при работе по ДП до 2,40, или на 17,1%. Сравнивая работу ДП и ЭТЭ, необходимо констатировать, что происходит рост скорости нарастания давления газов на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение ЭТЭ приводит к росту $(dp/d\phi)_{\max}$ от 0,46 МПа/град при работе по ДП до 0,58 МПа/град, или на 26,1%. При максимальной нагрузке разница в значениях жесткости возрастает. Так, при $p_e = 0,71$ МПа применение ЭТЭ приводит к росту $(dp/d\phi)_{\max}$ от 0,64 МПа/град при работе по ДП уже до 1,18 МПа/град, или на 84,4%. Также просматривается и увеличение ϕ_i . На режиме минимальных нагрузок при $p_e = 0,13$ МПа при работе по ДП $\phi_i = 24,5^\circ$ п.к.в., а при работе на ЭТЭ $\phi_i = 30,0^\circ$ п.к.в. С увеличением нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа при работе по ДП $\phi_i = 20,0^\circ$ п.к.в., а при работе на ЭТЭ увеличивается до $25,5^\circ$ п.к.в., или на 27,5%.

На рисунке 5.5, а представлены показатели процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при частоте вращения 2200 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ на различных нагрузочных режимах работы.

Анализ кривых, соответствующих работе ДП на номинальной частоте вращения и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, позволяет сделать следующие выводы. Значение максимальной осредненной температуры T_{\max} повышается с 1640 К при $p_e = 0,13$ МПа до 2500 К при $p_e = 0,71$ МПа. Рост значения температуры составляет 860 К, или 52,4%. При увеличении нагрузки повышается значение $p_{z \max}$ от 6,2 МПа ($p_e = 0,13$ МПа) до 8,9 МПа ($p_e = 0,71$ МПа), что соответствует увеличению на 2,7 МПа, или 43,6%. При увеличении нагрузки степень повышения давления λ возрастает. Так, при работе дизеля по ДП при $p_e = 0,13$ МПа значение $\lambda = 1,45$, при увеличении нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа значение λ составляет 2,10. Повышение значения λ составляет 44,8%. Значение $(dp/d\phi)_{\max}$ повышается с 0,36 МПа/град при $p_e = 0,13$ МПа до 0,68 МПа/град при $p_e = 0,71$ МПа, или на 88,9%.

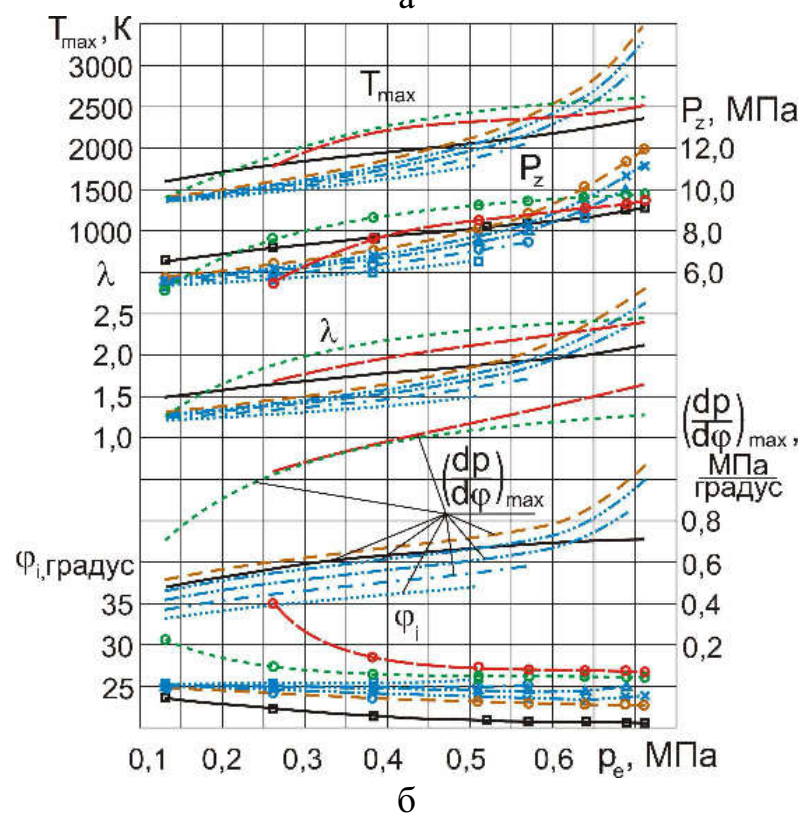
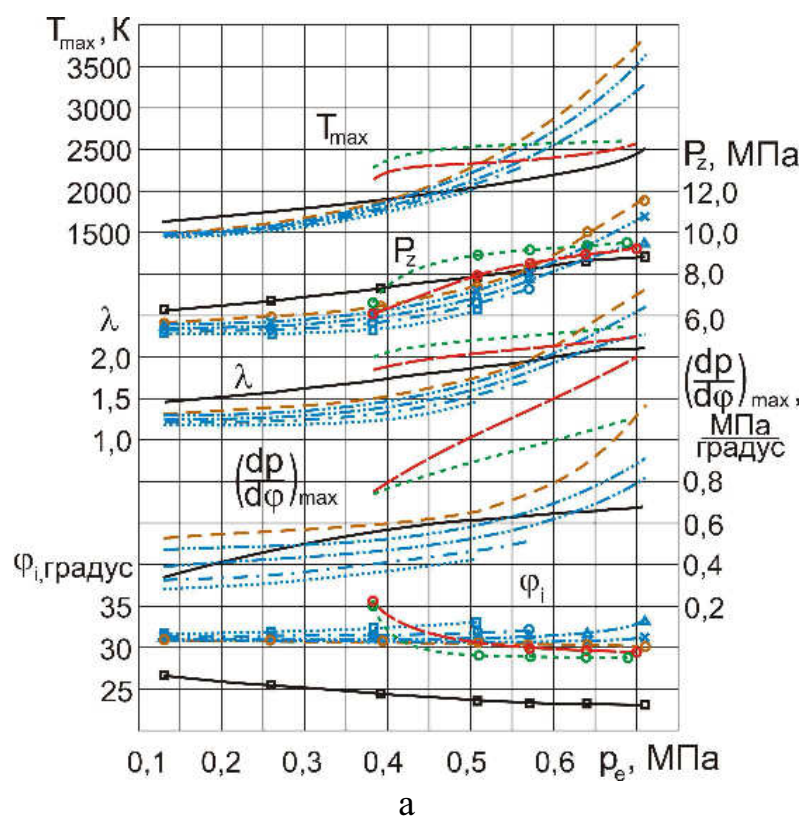


Рисунок 5.5 - Зависимости показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения нагрузки при $\Theta_{впр} = 26^\circ$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; ———— — ДП; - - - - - ГДП; — ГД с РОГ 10%; - · - · - · - ГД с РОГ 20%; - - - - - ГД с РОГ 30%; ······ — ГД с РОГ 40%; — ЭТЭ; - · - · - · - МТЭ

Значение угла φ_i , соответствующего ПЗВ, с увеличением нагрузки несколько снижается. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение φ_i составляет $26,5^\circ$ п.к.в., а при нагрузке $p_e = 0,71$ МПа - $23,5^\circ$ п.к.в. Снижение составляет $3,0^\circ$ п.к.в. Рассматривая работу дизеля на ПГ, хорошо видно, что с увеличением нагрузки происходит «классический» рост T_{\max} , p_z , λ , $(dp/d\varphi)_{\max}$ и снижение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения. В интервале изменения нагрузки от 0,13 до 0,71 МПа повышаются T_{\max} от 1500 до 3780 К, или в 2,5 раза; $p_{z\max}$ от 5,6 до 11,6 МПа, или в 2,1 раза; λ от 1,3 до 2,8, или в 2,2 раза; $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 0,54 до 1,18 МПа/град, или в 2,2 раза и снижается φ_i с $31,0$ до $30,0^\circ$ п.к.в., или на 1° п.к.в. При работе дизеля на ПГ с РОГ характер протекания кривых полностью совпадает с газодизельным процессом, а значения графиков «лежат» ниже кривых чисто ГДП (кроме φ_i) во всем диапазоне изменения нагрузок и уменьшаются с увеличением степени РОГ. Так, при работе по ГДП с 40%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ в диапазоне изменения нагрузок от 0,13 до 0,51 МПа происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на $80 \dots 260$ К, максимального давления на $7,1 \dots 17,3\%$ и жесткости процесса сгорания на $48,2 \dots 34,4\%$. При работе по ГДП с 10%-ной РОГ на номинальной нагрузке происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на 180°К , максимального давления на $6,0\%$ и жесткости процесса сгорания на $15,6\%$; при работе с 20%-ной РОГ – максимальной осредненной температуры на 440°К , максимального давления на $10,0\%$ и жесткости процесса сгорания на $27,8\%$. Угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при ГДП с РОГ выше, чем при газодизельном на всех нагрузочных режимах и увеличивается с увеличением степени РОГ.

Анализ кривых, соответствующих работе дизеля на МТЭ, на номинальной частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ показывает, что характер изменения кривых схож с параметрами при работе по ДП во всем диапазоне изменения нагрузки p_e (от 0,38 до 0,70 МПа). Отсутствие значений показателей процесса сгорания при $p_e < 0,38$ МПа также связано с нестабильностью горения и пропусками воспламенения. Значения T_{\max} увеличи-

ваются от 2150 К при $p_e = 0,38$ МПа до 2640 К при $p_e = 0,70$ МПа. Рост значения температуры составляет 490 К, или 22,8%. При увеличении нагрузки повышается значение $p_{z \max}$, от 6,0 МПа ($p_e = 0,38$ МПа) до 9,2 МПа ($p_e = 0,70$ МПа), что соответствует увеличению $p_{z \max}$ на 3,2 МПа, или 53,3%. При увеличении нагрузки возрастает значение λ . Так, при $p_e = 0,38$ МПа значение λ составляет 1,86, а при увеличении нагрузки до максимальной - $\lambda = 2,26$. Повышение составляет 21,5%. Значение $(dp/d\phi)_{\max}$ повышается от 0,76 МПа/град при $p_e = 0,38$ МПа до 1,40 МПа/град при $p_e = 0,70$ МПа, или на 84,2%. Значение угла ϕ_i с увеличением нагрузки уменьшается. Так, при $p_e = 0,38$ МПа - $\phi_i = 36,0^\circ$ п.к.в., а при нагрузке $p_e = 0,70$ МПа - $\phi_i = 29,5^\circ$ п.к.в. Снижение составляет 6,5° п.к.в.

Оценивая значения параметров процесса сгорания в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения $n = 2200$ мин⁻¹ и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при работе на дизельном топливе и МТЭ, можно отметить следующее. Максимальная осредненная температура цикла при работе дизеля на МТЭ при нагрузке $p_e = 0,38$ МПа повышается и составляет 2150 К по сравнению с T_{\max} при работе по ДП, которая составляет 1850 К, что соответствует увеличению на 300 К, или 16,2%. При работе дизеля на МТЭ при повышении p_e до 0,70 МПа T_{\max} увеличивается до 2640 К по сравнению с ДП, при котором $T_{\max} = 2490$ К. Увеличение составляет 150 К, или 6,0%. При работе дизеля на МТЭ максимальное давление сгорания при нагрузке до $p_e = 0,52$ МПа меньше, чем при работе по ДП. При величине нагрузки, равной 0,38 МПа, значение $p_{z \max}$ снижается от 7,4 МПа при работе по ДП до значения 6,0 МПа при работе на МТЭ, что соответствует уменьшению на 1,4 МПа, или 23,3%. При нагрузке, равной, примерно, 0,52 МПа, происходит выравнивание значений $p_{z \max}$. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит повышение $p_{z \max}$. Так, при $p_e = 0,70$ МПа значение $p_{z \max}$ составляет 8,9 МПа при работе по ДП, а при работе дизеля на МТЭ $p_{z \max} = 9,2$ МПа, что соответствует увеличению на 0,3 МПа, или 3,4%. Степень повышения давления λ при $p_e = 0,38$ МПа составляет 1,70 при работе по ДП, а при работе дизеля на МТЭ $\lambda = 1,86$, повышение составляет 9,4%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа значения λ при работе на МТЭ также превышают значения при работе дизеля по

ДП на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,70$ МПа при работе по ДП значение λ равняется 2,1, а при работе на МТЭ - 2,26. Т.е. в области высокой нагрузки повышение значения λ составляет 7,6%. Величина жесткости процесса сгорания при работе на МТЭ выше на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,38$ МПа и работе по ДП жесткость процесса сгорания $(dp/d\phi)_{\max}$ составляет 0,56 МПа/град, а при работе дизеля на МТЭ - 0,76 МПа/град. Повышение значения составляет 35,7%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа жесткость процесса сгорания при работе по ДП составляет 0,68 МПа/град, а при работе дизеля на МТЭ $(dp/d\phi)_{\max} = 1,40$ МПа/град повышение составляет в 2,1 раза. При работе дизеля на МТЭ ПЗВ увеличивается во всем интервале изменения нагрузки. Так, при $p_e = 0,38$ МПа при работе дизеля на МТЭ $\phi_i = 36,0^\circ$ п.к.в., а при работе по ДП $\phi_i = 24,5^\circ$ п.к.в. Повышение составляет $11,5^\circ$ п.к.в., или 46,9%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,70$ МПа значение ϕ_i при работе на МТЭ составляет $29,5^\circ$ п.к.в., а при работе по ДП $\phi_i = 23,5^\circ$ п.к.в. Повышение составляет $6,0^\circ$ п.к.в., или 25,5%.

Оценивая нагрузочные характеристики дизеля на ЭТЭ на номинальной частоте вращения $n = 2200$ мин⁻¹ и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, значения основных характеристик изменяются по схожим закономерностям, как при работе по ДП. Из графиков видно, что устойчивое горение без пропусков воспламенения горючей смеси при работе дизеля на ЭТЭ также начинается при нагрузке соответствующей $p_e = 0,38$ МПа. При возрастании нагрузки от 0,38 до 0,69 МПа повышается максимальная осредненная температура от 2300 до 2650 К соответственно. Увеличение составляет 350 К, или 15,2%. Также происходит увеличение максимального давления цикла $p_{z \max}$ от 7,2 МПа при $p_e = 0,38$ МПа до 8,6 МПа при $p_e = 0,69$ МПа, увеличение составляет 1,4 МПа, или 19,4%. Также при увеличении нагрузки происходит увеличение степени повышения давления λ от 2,0 при $p_e = 0,38$ МПа до 2,38 при $p_e = 0,69$ МПа. Увеличение λ составляет 0,38, или 19,0%. Происходит увеличение скорости нарастания давления газов в ЦД $(dp/d\phi)_{\max}$ от 0,75 МПа/град при $p_e = 0,38$ МПа до 1,10 МПа/град при $p_e = 0,69$ МПа. Рост $(dp/d\phi)_{\max}$ составляет 46,7%. Также с увеличением нагрузки происходит снижение значения ϕ_i , который

соответствует ПЗВ, от $35,0^\circ$ п.к.в. при $p_e = 0,38$ МПа до $29,0^\circ$ п.к.в. Разница значений составляет $6, 0^\circ$ п.к.в., или $17,1\%$.

Сравнивая работу дизеля 4Ч 11,0/12,5 на дизельном топливе и ЭТЭ на частоте вращения $n = 2200$ мин⁻¹ и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при изменении нагрузки необходимо охарактеризовать некоторые принципиальные особенности. Так, при среднем эффективном давлении $0,38$ МПа происходит возрастание максимальной осредненной температуры цикла от 1850 К при работе по ДП до 2300 К при работе на ЭТЭ. С возрастанием p_e до $0,69$ МПа повышается T_{max} от 2400 К при работе по ДП до 2650 К при работе на ЭТЭ. Увеличение составляет 250 К, или $10,4\%$. При работе на ЭТЭ ($p_e = 0,38$ МПа) $p_{z \text{ max}}$ ниже ДП и составляет $7,2$ МПа, а при работе по ДП $p_{z \text{ max}} = 7,4$ МПа. Снижение составляет $0,2$ МПа, или $2,7\%$. При повышении нагрузки до $0,69$ МПа при переходе с дизельного на работу на ЭТЭ происходит увеличение $p_{z \text{ max}}$ с $8,9$ до $9,2$ МПа, что составляет $3,4\%$. При нагрузке $p_e = 0,38$ МПа при работе по ДП $\lambda = 1,7$ и возрастает до $2,0$ при переходе на ЭТЭ, или на $17,7\%$. С повышением нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа применение ЭТЭ увеличивает значение λ от $2,1$ при работе по ДП до $2,38$, или на $13,3\%$. Сравнивая работу ДП и ЭТЭ, необходимо констатировать, что происходит рост скорости нарастания давления газов на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,38$ МПа применение ЭТЭ приводит к росту $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ от $0,56$ МПа/град при работе по ДП до $0,75$ МПа/град, или на $33,9\%$. При максимальной нагрузке разница в значениях жесткости возрастает. Так, при $p_e = 0,69$ МПа применение ЭТЭ приводит к росту $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ от $0,68$ МПа/град при работе по ДП уже до $1,10$ МПа/град, или на $61,8\%$. Также просматривается и увеличение ϕ_i . На режиме ($p_e = 0,38$ МПа) при работе по ДП $\phi_i = 24,5^\circ$ п.к.в., а при работе на ЭТЭ $\phi_i = 35,0^\circ$ п.к.в. С повышением нагрузки до $p_e = 0,69$ МПа при работе по ДП $\phi_i = 23,5^\circ$ п.к.в., а при работе на ЭТЭ увеличивается до $29,0^\circ$ п.к.в., или на $23,4\%$.

На рисунке 5.5, б представлены показатели процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ на различных нагрузочных режимах работы.

Анализ кривых, соответствующих работе ДП, на частоте вращения, которая соответствует максимальному крутящему моменту, позволяет сделать следующие выводы. Значение максимальной осредненной температуры T_{\max} повышается с 1600 К при $p_e = 0,13$ МПа до 2400 К при $p_e = 0,71$ МПа. Рост значения температуры составляет 800 К, или 50,0%. При увеличении нагрузки повышается значение $p_{z \max}$ от 6,4 МПа при $p_e = 0,13$ МПа до 9,1 МПа при $p_e = 0,71$ МПа, что соответствует увеличению на 2,7 МПа, или 42,2%. При увеличении нагрузки степень повышения давления λ также возрастает. Так, при работе дизеля по ДП при $p_e = 0,13$ МПа значение $\lambda = 1,5$, при увеличении нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа значение λ составляет 2,2. Повышение значения λ составляет 46,7%. Значение $(dp/d\varphi)_{\max}$ повышается с 0,48 МПа/град при $p_e = 0,13$ МПа до 0,72 МПа/град при $p_e = 0,71$ МПа, или на 50,0%. Значение угла φ_i , соответствующего ПЗВ, с увеличением нагрузки несколько снижается. Так, при $p_e = 0,13$ МПа значение φ_i составляет 24,0°п.к.в., а при нагрузке $p_e = 0,71$ МПа - 20,5°п.к.в. Уменьшение соответствует 3,5°.

Рассматривая работу дизеля на ПГ, хорошо видно, что с увеличением нагрузки, так же как и при номинальной частоте вращения, происходит «классический» рост максимальной осредненной температуры газов в цилиндре, максимального давления, степени повышения давления, жесткости процесса сгорания и снижение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения. Так, в интервале изменения нагрузки от 0,13 до 0,71 МПа повышаются T_{\max} от 1400 до 3500 К, или в 2,5 раза; $p_{z \max}$ от 5,7 до 12,0 МПа, или в 2,1 раза; λ от 1,3 до 2,8, или в 2,2 раза; $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 0,52 до 1,06 МПа/град, или в 2,0 раза, и снижается φ_i с 25,0° до 22,5°п.к.в., или на 2,5°п.к.в.

При работе дизеля на ПГ с РОГ характер протекания кривых полностью совпадает с газодизельным процессом, а значения графиков лежат ниже кривых чисто ГДП (кроме φ_i) во всем диапазоне изменения нагрузок и уменьшаются с увеличением степени РОГ. Так, при работе по ГДП с 40%-ной РОГ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ в диапазоне изменения нагрузок от 0,13 до 0,51 МПа происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры

на 50...350 К, максимального давления на 5,3...20,0% и жесткости процесса сгорания на 36,5...35,6%. При работе по ГДП с 10%-ной РОГ на максимальной нагрузке происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на 200°К, максимального давления на 6,7% и жесткости процесса сгорания на 5,7%; при работе с 20%-ной РОГ – максимальной осредненной температуры на 450°К, максимального давления на 12,3% и жесткости процесса сгорания на 17,0%. Угол, соответствующий периоду задержки воспламенения, при ГДП с РОГ выше, чем при газодизельном, на всех нагрузочных режимах и увеличивается с увеличением степени РОГ.

Анализ кривых, соответствующих работе дизеля на МТЭ, на частоте вращения $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ показывает, что характер изменения кривых аналогичен работе по ДП во всем диапазоне изменения нагрузки p_e (от 0,26 до 0,71 МПа). Отсутствие значений показателей процесса сгорания при $p_e < 0,26 \text{ МПа}$ также связано с нестабильностью горения и пропусками воспламенения. С увеличением нагрузки увеличивается значение T_{max} от 1800 К при величине нагрузки, равной 0,26 МПа, до 2500 К при величине нагрузки, равной 0,71 МПа, что соответствует увеличению значения T_{max} на 700 К, или 38,9%. При увеличении нагрузки повышается значение $p_{z \text{ max}}$ от 5,6 МПа ($p_e = 0,26 \text{ МПа}$) до 9,4 МПа ($p_e = 0,71 \text{ МПа}$), что соответствует увеличению $p_{z \text{ max}}$ на 3,8 МПа, или 67,9%. При увеличении нагрузки также возрастает степень повышения давления. Так, при $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ значение λ составляет 1,7, а при увеличении нагрузки до максимальной, при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$, значение λ составляет 2,4, т.е. повышается на 41,2%. Значение «жесткости» $(dp/d\phi)_{\text{max}}$ повышается с 1,04 МПа/град при $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ до 1,44 МПа/град при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$, или на 38,5%. Значение угла ϕ_i с увеличением нагрузки снижается. Так, при $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ ϕ_i составляет 35,0°п.к.в., а при нагрузке $p_e = 0,71$ ϕ_i - 27,0°п.к.в. Снижение составляет 8,0°п.к.в.

Оценивая параметры процесса сгорания в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения нагрузки при частоте вращения $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при работе на дизельном топливе и МТЭ можно отметить следующее. Максимальная осредненная температура цикла при работе дизеля на МТЭ на нагрузках $p_e = 0,26 \text{ МПа}$

незначительно меньше, по сравнению с T_{\max} при работе по ДП, значения составляют 1820 и 1800 К соответственно. Снижение составляет 20 К, или 1,1%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа величина T_{\max} при работе дизеля на МТЭ составляет 2500 К по сравнению с T_{\max} при работе по ДП, которая равна 2400 К. Повышение составляет 100 К, или 4,2%. При работе на МТЭ максимальное давление сгорания при нагрузках от 0,26 до 0,40 МПа меньше, чем при работе по ДП. Так, при $p_e = 0,26$ МПа значение $p_{z \max}$ снижается с 6,2 МПа при работе по ДП до $p_{z \max} = 5,6$ МПа при работе дизеля на МТЭ. Снижение составляет 0,6 МПа, или 9,7%. При нагрузке около $p_e = 0,40$ МПа значения $p_{z \max}$ при работе на двух видах топлива выравниваются. С увеличением нагрузки происходит повышение значения $p_{z \max}$. При работе по ДП при нагрузке, равной 0,71 МПа, $p_{z \max}$ равняется 9,1 МПа, а на МТЭ $p_{z \max} = 9,4$ МПа, что соответствует увеличению на 0,3 МПа, или 3,3%. Степень повышения давления при работе на МТЭ выше ДП во всем диапазоне изменения нагрузок. Так, при $p_e = 0,26$ МПа λ составляет 1,65 при работе по ДП, а при работе дизеля на МТЭ - 1,70, увеличение составляет 3,0%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа при работе по ДП λ составляет 2,2, а при работе на МТЭ - 2,4. Т.е. увеличение значения λ в области высокой нагрузки уже более значительно и составляет 9,1%. Величина «жесткости» процесса сгорания на МТЭ всегда больше ДП. При $p_e = 0,26$ МПа при работе по ДП $(dp/d\phi)_{\max}$ составляет 0,56 МПа/град, а при работе на МТЭ - 1,04 МПа/град. Повышение составляет 85,7%. При увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $(dp/d\phi)_{\max}$ при работе по ДП составляет 0,72 МПа/град, а при работе дизеля на МТЭ - 1,44 МПа/град. Повышение составляет ровно в 2,0 раза. При работе дизеля на МТЭ ПЗВ выше ДП на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,26$ МПа при работе дизеля на МТЭ значение ϕ_i составляет 35,0°п.к.в., а при работе по ДП - 22,5°п.к.в. Повышение составляет 12,5°п.к.в., или 55,6%. При дальнейшем увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа значение ϕ_i при работе на МТЭ составляет 27,0°п.к.в., а при работе по ДП ϕ_i составляет 20,5°п.к.в., т.е. повышается на 6,5°п.к.в., или на 31,7%.

При анализе нагрузочных характеристик, соответствующих работе дизеля на ЭТЭ, на частоте вращения при максимальном крутящем моменте и $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$

значения основных характеристик изменяются по схожим закономерностям, как при работе по ДП. Из графиков видно, что при увеличении нагрузки от $p_e = 0,13$ МПа до $p_e = 0,71$ МПа происходит возрастание максимальной осредненной температуры от 1450 до 2600 К соответственно. Увеличение составляет 1150 К, или 79,3%. Происходит увеличение максимального давления цикла $p_{z \max}$ от 5,2 МПа при $p_e = 0,13$ МПа до 9,8 МПа при $p_e = 0,71$ МПа, увеличение составляет 4,6 МПа, или на 88,5%. Так же при увеличении нагрузки происходит увеличение степени повышения давления λ от 1,25 при $p_e = 0,13$ МПа до 2,45 при $p_e = 0,71$ МПа. Увеличение λ составляет 1,2, или 96,0%. Также происходит увеличение скорости нарастания давления газов в ЦД $(dp/d\phi)_{\max}$ от 0,7 МПа/град при $p_e = 0,13$ МПа до 1,3 МПа/град при $p_e = 0,71$ МПа. С увеличением нагрузки происходит снижение значения ϕ_i , который соответствует ПЗВ, от 30,5°п.к.в. при $p_e = 0,13$ МПа до 26,0°п.к.в. Разница значений составляет 4,5°п.к.в., или 17,3%.

Сравнивая работу дизеля 4Ч 11,0/12,5 на дизельном топливе и ЭТЭ при частоте вращения 1700 мин⁻¹ и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при изменении нагрузки, необходимо охарактеризовать некоторые принципиальные особенности. Так, при среднем эффективном давлении 0,13 МПа происходит снижение максимальной осредненной температуры цикла от 1600 К при работе по ДП до 1450 К при работе на ЭТЭ. С увеличением нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа уже прослеживается увеличение T_{\max} от 2400 К при работе по ДП до 2600 К при работе на ЭТЭ, что соответствует повышению на 200 К, или 8,3%. На ЭТЭ $p_{z \max}$ при нагрузке, равной 0,13 МПа, ниже ДП и составляет $p_{z \max} = 5,6$ МПа, а при работе по ДП $p_{z \max} = 6,2$ МПа. Снижение составляет 0,6 МПа, или 9,7%. При увеличении нагрузки до 0,71 МПа при переходе с дизельного на работу на ЭТЭ происходит увеличение $p_{z \max}$ с 9,1 до 9,8 МПа, что составляет 7,7%. При нагрузке $p_e = 0,13$ МПа при работе по ДП $\lambda = 1,5$ и снижается до 1,3 при переходе на ЭТЭ, или на 13,3%. С повышением нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа применение ЭТЭ увеличивает значение λ от 2,20 при работе по ДП до 2,45, или на 11,4%. Сравнивая работу ДП и ЭТЭ, необходимо констатировать, что происходит рост скорости нарастания давления газов на всех нагрузочных режимах. Так, при $p_e = 0,13$ МПа применение ЭТЭ при-

водит к росту $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 0,48 МПа/град при работе по ДП до 0,70 МПа/град, или на 45,8%. При максимальной нагрузке разница в значениях жесткости возрастает. Так, при $p_e = 0,71$ МПа применение ЭТЭ приводит к росту $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 0,72 МПа/град при работе по ДП уже до 1,3 МПа/град, или на 80,6%. Также просматривается и увеличение φ_i . На режиме минимальных нагрузок при $p_e = 0,13$ МПа при работе по ДП $\varphi_i = 24,0^\circ$ п.к.в., а при работе на ЭТЭ $\varphi_i = 30,5^\circ$ п.к.в. С увеличением нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа при работе по ДП $\varphi_i = 20,5^\circ$ п.к.в., а при работе на ЭТЭ увеличивается до $26,0^\circ$ п.к.в., или на 26,8%.

5.3 Исследование показателей процесса сгорания при работе дизеля на ПГ и СТЭ на скоростных режимах

На рисунке 5.6, а представлены параметры процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 на у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ в зависимости от изменения частоты вращения.

Анализ кривых, соответствующих работе ДП, позволяет сделать следующие выводы. Максимальная осредненная температура газов в ЦД T_{\max} снижается от 2300 К при $n = 1200$ мин⁻¹ до 2200 К при $n = 2400$ мин⁻¹, что соответствует уменьшению температуры на 100 К, или 4,4%. При возрастании частоты вращения снижается величина максимального давления $p_{z \max}$ от 8,8 МПа при $n = 1200$ мин⁻¹ до 8,0 МПа при $n = 2400$ мин⁻¹, т.е. на 0,8 МПа, или 9,1%. При увеличении частоты вращения степень повышения давления λ тоже снижается. Так, при $n = 1200$ мин⁻¹ значение λ составляет 2,1, а при $n = 2400$ мин⁻¹ - 1,9. Снижение составляет 9,5%. Значение «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ снижается от 0,72 МПа/град при $n = 1200$ мин⁻¹ до 0,59 МПа/град при $n = 2400$ мин⁻¹, т.е. на 18,1%. Значение угла φ_i с увеличением частоты вращения повышается. Так, при $n = 1200$ мин⁻¹ φ_i составляет $18,0^\circ$ п.к.в., а при частоте $n = 2400$ мин⁻¹ - $23,0^\circ$ п.к.в. Повышение составляет $5,0^\circ$ п.к.в. Рассматривая работу дизеля на ПГ хорошо видно, что с увеличением частоты вращения происходит снижение T_{\max} , $p_{z \max}$, λ , $(dp/d\varphi)_{\max}$ и повышение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения.

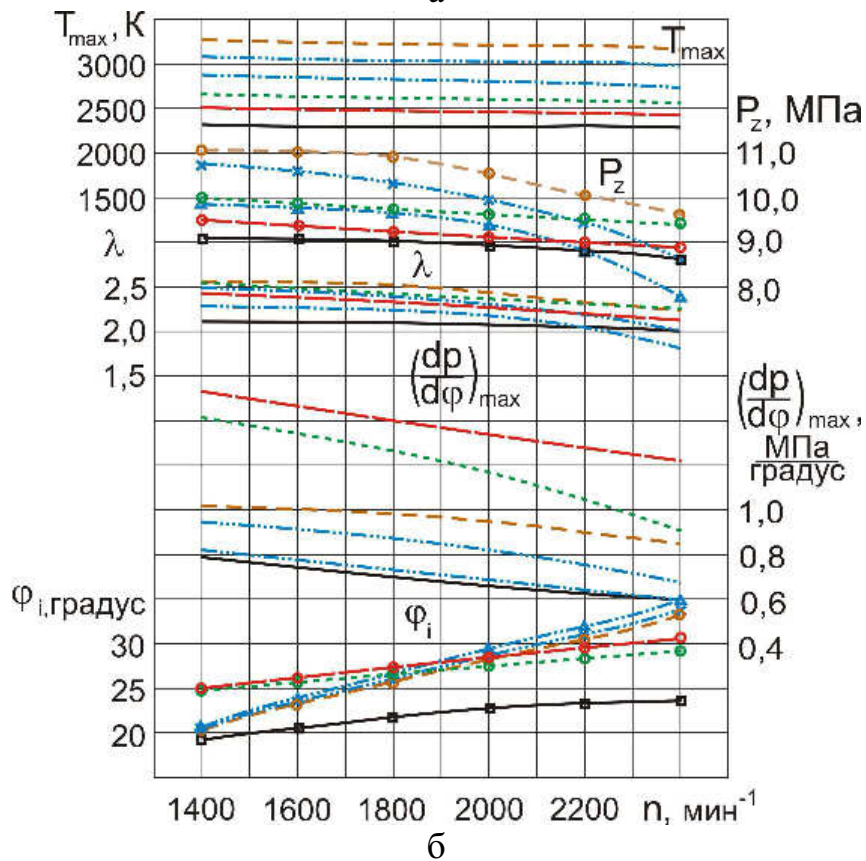
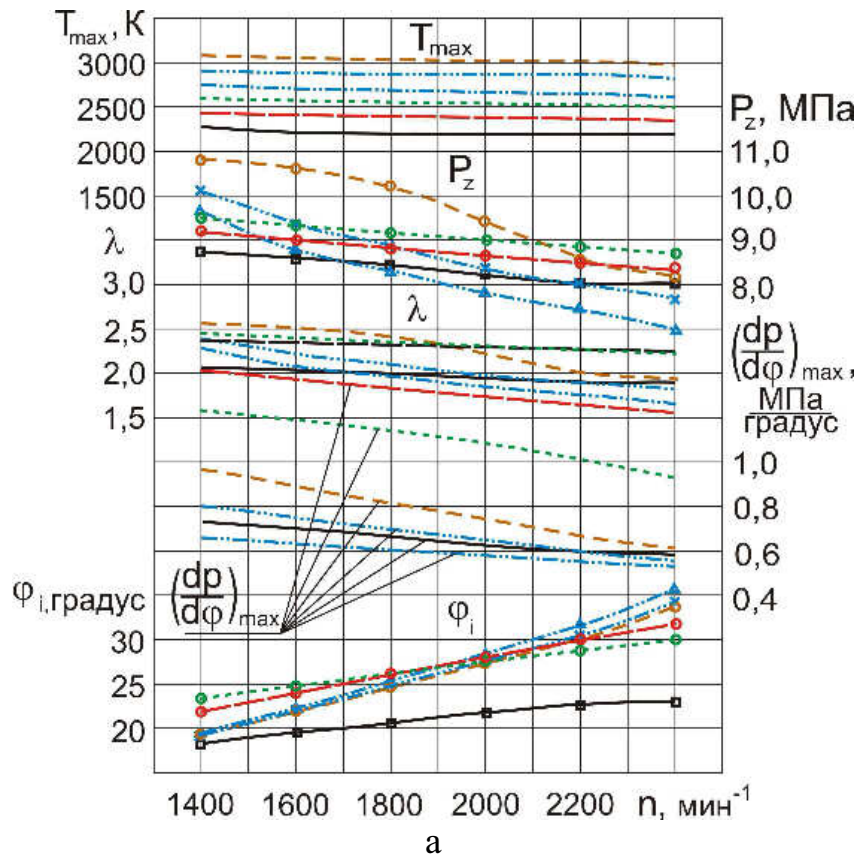


Рисунок 5.6 - Зависимости показателей процесса сгорания дизеля 4С 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ от изменения частоты вращения: а – $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б – $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$;

— ДП; - - - ГДП; ГД с РОГ 10%; - · - · ГД с РОГ 20%;
 ЭТЭ; - · - · МТЭ

Так, в скоростном диапазоне от 1200 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение T_{\max} с 3100 до 3000 К, или на 3,2%; $p_{z \max}$ с 10,9 до 8,1 МПа, или на 25,7%; λ с 2,56 до 1,94, или на 24,2%; $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 0,98 до 0,61 МПа/град, или на 37,8%, и повышение φ_i с 19,0° до 33,5° п.к.в., или на 14,5° п.к.в. При работе дизеля на ПГ с РОГ характер протекания кривых полностью совпадает с ГДП, а значения графиков «лежат» ниже кривых чисто ГДП (кроме φ_i) во всем скоростном диапазоне и уменьшаются с увеличением степени РОГ. Так, при работе по ГДП с 10%-ной РОГ в диапазоне от 1200 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на 200 К, максимального давления на 7,3-4,9%, степени повышения давления λ на 6,3-5,3%, жесткости процесса сгорания на 18,4-8,2% и увеличение угла φ_i от 0 до 0,5° п.к.в. соответственно. Применение же 20%-ной РОГ в диапазоне от 1200 до 2400 мин⁻¹ приводит к уменьшению по отношению к ГДП максимальной осредненной температуры на 350-400 К, максимального давления на 11,0-13,6%, степени повышения давления λ на 10,2-12,4%, жесткости процесса сгорания на 33,7-11,5% и увеличению угла φ_i от 0,5° до 2,5°.

Анализ кривых, соответствующих работе дизеля на МТЭ, позволяет сделать следующие выводы. В диапазоне изменения частот вращения от 1200 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение T_{\max} с 2450 до 2350 К, или на 4,1%; $p_{z \max}$ с 9,1 до 8,4 МПа, или на 7,7%; λ с 2,40 до 2,23, или на 7,1%; $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 1,42 до 1,22 МПа/град, или на 14,1%, и повышение φ_i с 22,0° до 32,0° п.к.в., или на 10,0° п.к.в.

При сравнении значений показателей процесса сгорания в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при работе на дизельном топливе и МТЭ можно отметить, что все значения показателей процесса сгорания при переходе дизеля на работу на МТЭ повышаются во всем скоростном диапазоне. Так, на малой частоте вращения $n = 1200$ мин⁻¹ происходит повышение максимальной осредненной температуры с 2300 К (ДП) до 2450 К (работа на МТЭ), или на 6,5%; максимального давления сгорания $p_{z \max}$ с 8,8 МПа (ДП) до 9,1 МПа (работа на МТЭ), или на 3,4%; степени повышения давления λ с 2,1 (ДП)

до 2,4 (работа на МТЭ), или на 14,3%; «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 0,72 МПа/град (ДП) до 1,42 МПа/град (работа на МТЭ), или на 97,2%; значений угла φ_i с 18,0°п.к.в. (ДП) до 22,0°п.к.в. (работа на МТЭ), или на 4,0°п.к.в. При максимальной частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ происходит повышение максимальной осредненной температуры с 2200 К (ДП) до 2350 К (работа на МТЭ), или на 6,8%; максимального давления сгорания $p_{z \max}$ с 8,0 МПа (ДП) до 8,4 МПа (работа на МТЭ), или на 5,0%; степени повышения давления λ с 1,90 (ДП) до 2,23 (работа на МТЭ), или на 17,4%; «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 0,59 МПа/град (ДП) до 1,22 МПа/град (работа на МТЭ), или в 2,1 раза; значений угла φ_i с 23,0°п.к.в. (ДП) до 32,0°п.к.в. (работа на МТЭ), или на 9,0°п.к.в.

Анализ кривых, соответствующих работе дизеля на ЭТЭ, позволяет сделать следующие выводы. В диапазоне изменения частот вращения от 1200 до 2400 мин^{-1} происходит снижение T_{\max} с 2578 до 2496 К, или на 3,2%; $p_{z \max}$ с 9,4 до 8,7 МПа, или на 7,5%; λ с 2,45 до 2,22, или на 9,4%; $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 1,23 до 0,94 МПа/град, или на 23,6%, и повышение φ_i с 23,5° до 30,0°п.к.в., или на 6,5°п.к.в.

При сравнении значений показателей процесса сгорания в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при работе на дизельном топливе и ЭТЭ можно отметить, что все значения показателей процесса сгорания при переходе дизеля для работы на ЭТЭ повышаются во всем скоростном диапазоне. Так, на малой частоте вращения $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ происходит повышение максимальной осредненной температуры с 2300 К (ДП) до 2578 К (работа на ЭТЭ), или на 12,1%; максимального давления сгорания $p_{z \max}$ с 8,8 МПа (ДП) до 9,4 МПа (работа на ЭТЭ), или на 6,8%; степени повышения давления λ с 2,1 (ДП) до 2,45 (работа на ЭТЭ), или на 16,7%; «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 0,72 МПа/град (ДП) до 1,23 МПа/град (работа на ЭТЭ), или на 70,8%; значений угла φ_i с 18,0°п.к.в. (ДП) до 23,5°п.к.в. (работа на ЭТЭ), или на 5,5°п.к.в. При максимальной частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ происходит повышение максимальной осредненной температуры с 2200 К (ДП) до 2496 К (работа на ЭТЭ), или на 13,5%; максимального давления сгорания $p_{z \max}$ с 8,0 МПа (ДП) до 8,7 МПа (рабо-

та на ЭТЭ), или на 8,8%; степени повышения давления λ с 1,90 (ДП) до 2,22 (работа на ЭТЭ), или на 16,8%; «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 0,59 МПа/град (ДП) до 0,94 МПа/град (работа на ЭТЭ), или на 59,3%; значений угла φ_i с 23,0°п.к.в. (ДП) до 30,0°п.к.в. (работа на ЭТЭ), или на 7,0°п.к.в.

На рисунке 5.6, б представлены параметры процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 на у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ в зависимости от изменения частоты вращения.

Анализ кривых, соответствующих работе ДП, позволяет сделать следующие выводы. Максимальная осредненная температура газов в ЦД T_{\max} снижается от 2350 К при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 2280 К при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, что соответствует снижению температуры на 70 К, или 3,0%. Величина максимального давления $p_{z \max}$ при повышении частоты вращения снижается от 9,1 МПа при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 8,7 МПа при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, т.е. на 0,4 МПа, или 4,4%. При увеличении частоты вращения степень повышения давления λ тоже снижается. Так, при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ значение λ составляет 2,15, а при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ - 2,0. Снижение составляет 7,0%. Значение «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ снижается от 0,79 МПа/град при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ до 0,60 МПа/град при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, т.е. на 24,1%. Значение угла φ_i с увеличением частоты вращения повышается. Так, при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ φ_i составляет 19,0°п.к.в., а при частоте $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ - 24,0°п.к.в. Повышение составляет 5,0°п.к.в.

Рассматривая работу дизеля на ПГ, хорошо видно, что с увеличением частоты вращения происходит снижение максимальной осредненной температуры газов в цилиндре, максимального давления, степени повышения давления, жесткости процесса сгорания и повышение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения. Так, в скоростном диапазоне от 1200 до 2400 мин^{-1} происходит снижение T_{\max} с 3300 до 3200 К, или на 3,0%; $p_{z \max}$ с 11,1 до 9,7 МПа, или на 12,6%; λ с 2,60 до 2,25, или на 13,5%; $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 1,01 до 0,84 МПа/град, или на 16,8%, и повышение φ_i с 20,0 до 33,0°п.к.в., или на 13,0°п.к.в. При работе дизеля на ПГ с РОГ характер протекания кривых полностью совпадает с газодизельным процессом, а значения графиков «лежат» ниже кривых чисто ГДП (кроме φ_i) во всем скоростном диапазоне и уменьшаются с увеличением степени РОГ. Так,

при работе по ГДП с 10%-ной РОГ в диапазоне от 1200 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение по сравнению с газодизельным процессом максимальной осредненной температуры на 200 К, максимального давления на 2,7...10,3%, степени повышения давления λ на 3,9...11,1%, жесткости процесса сгорания на 5,0...19,1% и увеличение угла φ_i от 0 до 1,0°п.к.в. соответственно. Применение же 20%-ной РОГ в диапазоне от 1200 до 2400 мин⁻¹ приводит к снижению по отношению к ГДП максимальной осредненной температуры на 450 К, максимального давления на 9,9...19,6%, степени повышения давления λ на 13,5...20,0%, жесткости процесса сгорания на 18,8...28,6% и увеличение угла φ_i от 0,5° до 2,0°п.к.в. соответственно.

Анализ кривых, соответствующих работе дизеля на МТЭ, позволяет сделать следующие выводы. В диапазоне изменения частот вращения от 1200 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение T_{\max} с 2500 до 2450 К, или на 2,0%; $p_{z \max}$ от 9,5 до 8,9 МПа, или на 6,3%; λ с 2,40 до 2,2, или на 8,3%; $(dp/d\varphi)_{\max}$ от 1,54 до 1,22 МПа/град, или на 20,8%, и повышение φ_i с 25,0° до 31,0°п.к.в., или на 6,0°п.к.в.

При сравнении значений показателей процесса сгорания в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ при работе на дизельном топливе и МТЭ можно отметить, что все значения показателей процесса сгорания при переходе дизеля на работу на МТЭ повышаются во всем скоростном диапазоне. Так, на малой частоте вращения $n = 1200$ мин⁻¹ происходит повышение максимальной осредненной температуры с 2350 К (ДП) до 2500 К (работа на МТЭ), или на 6,4%; максимального давления сгорания $p_{z \max}$ с 9,1 МПа (ДП) до 9,5 МПа (работа на МТЭ), или на 4,4%; степени повышения давления λ с 2,15 (ДП) до 2,40 (работа на МТЭ), или на 11,6%; «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 0,79 МПа/град (ДП) до 1,54 МПа/град (работа на МТЭ), или на 94,9%; значений угла φ_i с 19,0°п.к.в. (ДП) до 25,0°п.к.в. (работа на МТЭ), или на 6,0°п.к.в. При максимальной частоте вращения $n = 2400$ мин⁻¹ происходит повышение максимальной осредненной температуры с 2280 К (ДП) до 2450 К (работа на МТЭ), или на 7,5%; максимального давления сгорания $p_{z \max}$ с 8,7 МПа (ДП) до 8,9 МПа (работа на МТЭ), или на 2,3%; степени повышения давления λ с 2,0 (ДП) до 2,2

(работа на МТЭ), или на 10,0%; «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 0,60 МПа/град (ДП) до 1,22 МПа/град (работа на МТЭ), или в 2,0 раза; значений угла φ_i с 24,0°п.к.в. (ДП) до 31,0°п.к.в. (работа на МТЭ), или на 7,0°п.к.в.

Анализ кривых, соответствующих работе дизеля на ЭТЭ, позволяет сделать следующие выводы. В диапазоне изменения частот вращения от 1200 до 2400 мин⁻¹ происходит снижение T_{\max} с 2650 до 2600 К, или на 1,9%; $p_{z \max}$ с 10,0 до 9,4 МПа, или на 6,0%; λ с 2,60 до 2,25, или на 13,5%; $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 1,41 до 0,91 МПа/град, или на 35,5%, и повышение φ_i с 25,0° до 29,0°п.к.в., или на 4,0°п.к.в. При сравнении значений показателей процесса сгорания в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения частоты вращения при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ при работе на дизельном топливе и ЭТЭ можно отметить, что все значения показателей процесса сгорания при переходе дизеля для работы на ЭТЭ повышаются во всем скоростном диапазоне. Так, на малой частоте вращения $n = 1200$ мин⁻¹ происходит повышение максимальной осредненной температуры с 2350 К (ДП) до 2650 К (работа на ЭТЭ), или на 12,8%; максимального давления сгорания $p_{z \max}$ с 9,1 МПа (ДП) до 10,0 МПа (работа на ЭТЭ), или на 9,9%; степени повышения давления λ с 2,15 (ДП) до 2,60 (работа на ЭТЭ), или на 20,9%; «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 0,79 МПа/град (ДП) до 1,41 МПа/град (работа на ЭТЭ), или на 78,5%; значений угла φ_i с 19,0°п.к.в. (ДП) до 25,0°п.к.в. (работа на ЭТЭ), или на 6,0°п.к.в. При максимальной частоте вращения $n = 2400$ мин⁻¹ происходит повышение максимальной осредненной температуры с 2280 К (ДП) до 2600 К (работа на ЭТЭ), или на 14,0%; максимального давления сгорания $p_{z \max}$ с 8,7 МПа (ДП) до 9,4 МПа (работа на ЭТЭ), или на 8,1%; степени повышения давления λ с 2,0 (ДП) до 2,25 (работа на ЭТЭ), или на 12,5%; «жесткости» процесса сгорания $(dp/d\varphi)_{\max}$ с 0,60 МПа/град (ДП) до 0,91 МПа/град (работа на ЭТЭ), или на 51,7%; значений угла φ_i с 24,0°п.к.в. (ДП) до 29,0°п.к.в. (работа на ЭТЭ), или на 5,0°п.к.в.

5.4 Основные результаты и выводы по пятой главе

В результате экспериментальных исследований показателей процесса сгорания дизеля при работе на ПГ и СТЭ можно сделать следующие **выводы**:

1. Очевидно, что отличительной особенностью процессов смесеобразования и горения в дизеле, работающем как на ПГ с запальной порцией дизельного топлива, так и на СТЭ, будет являться по сравнению с ДП неоднородность горючей смеси по объему цилиндра, присутствовать совершенно другая испаряемость горючего и не совпадение по времени процессов образования ТВС и ее горение. Применение альтернативных топлив с другим химическим составом и локальными условиями может приводить к отличительным показателям процесса сгорания и даже к воспламенению во время развития факела распыла. Поэтому для научного представления действительной картины процесса сгорания в дизеле, работающего на ПГ и СТЭ, проведено индицирование его рабочего процесса и детальное описание процесса сгорания.

2. На основании проведенных исследований показателей процесса сгорания дизеля 4Ч 11,0/12,5 предложено значение оптимального установочного у.о.в.т. равное 23° . Это же значение рекомендовано и для дизельного процесса.

3. Установлены зависимости влияния режимов работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ, ПГ с различными степенями РОГ, МТЭ и ЭТЭ на показатели его процесса сгорания.

4. Определены оптимальные значения показателей процесса сгорания при работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ и СТЭ при у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$.

При у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$) получены следующие результаты: ДП - $T_{\text{max}}=2190 \text{ К}$; $p_z=8,1 \text{ МПа}$; $\lambda=1,90$; $(dp/d\phi)_{\text{max}}=0,59 \text{ МПа/град}$; $\phi_i=22,5^\circ$; ГДП - $T_{\text{max}}=3010 \text{ К}$ (увеличение на 37,4%); $p_z=8,5 \text{ МПа}$ (увеличение на 4,9%); $\lambda=2,0$ (увеличение на 5,3%); $(dp/d\phi)_{\text{max}}=0,69 \text{ МПа/град}$ (увеличение на 17,0%); $\phi_i=30,0^\circ$ (увеличение на 33,3%); ГДП с РОГ 10% - $T_{\text{max}}=2790 \text{ К}$ (увеличение на 27,4%); $p_z=8,1 \text{ МПа}$ (соответствует ДП); $\lambda=1,9$ (соответствует ДП); $(dp/d\phi)_{\text{max}}=0,60 \text{ МПа/град}$ (увеличение на 1,7%);

$\varphi_i=31,0^\circ$ (увеличение на 37,8%); ГДП с РОГ 20% - $T_{\max}=2680$ К (увеличение на 22,4%); $p_z=7,5$ МПа (снижение на 7,4%); $\lambda=1,8$ (снижение на 5,3%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,54$ МПа/град (снижение на 8,5%); $\varphi_i=32,0^\circ$ (увеличение на 6,7%); МТЭ - $T_{\max}=2430$ К (увеличение на 11,0%); $p_z=8,5$ МПа (увеличение на 4,9%); $\lambda=2,26$ (увеличение на 19,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=1,25$ МПа/град (увеличение в 2,1 раза); $\varphi_i=30,0^\circ$ (увеличение на 33,3%); ЭТЭ - $T_{\max}=2510$ К (увеличение на 14,6%); $p_z=8,9$ МПа (увеличение на 9,9%); $\lambda=2,27$ (увеличение на 19,5%); $(dp/d\varphi)_{\max}=1,01$ МПа/град (увеличение на 71,2%); $\varphi_i=28,0^\circ$ (увеличение на 24,4%).

При у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700$ мин⁻¹, $p_c = 0,69$ МПа): ДП - $T_{\max}=2210$ К; $p_z=8,6$ МПа; $\lambda=2,0$; $(dp/d\varphi)_{\max}=0,64$ МПа/град; $\varphi_i=20,0^\circ$; ГДП - $T_{\max}=3050$ К (увеличение на 38,0%); $p_z=11,0$ МПа (увеличение на 27,9%); $\lambda=2,6$ (увеличение на 30,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,83$ МПа/град (увеличение на 29,7%); $\varphi_i=22,0^\circ$ (увеличение на 10,0%); ГДП с РОГ 10% - $T_{\max}=2880$ К (увеличение на 30,3%); $p_z=10,2$ МПа (увеличение на 18,6%); $\lambda=2,40$ (увеличение на 20,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,76$ МПа/град (увеличение на 18,8%); $\varphi_i=24,0^\circ$ (увеличение на 20,0%); ГДП с РОГ 20% - $T_{\max}=2710$ К (увеличение на 22,6%); $p_z=9,2$ МПа (увеличение на 7,0%); $\lambda=2,32$ (увеличение на 16,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,66$ МПа/град (увеличение на 3,1%); $\varphi_i=23,0^\circ$ (увеличение на 15,0%); МТЭ - $T_{\max}=2460$ К (увеличение на 11,3%); $p_z=8,9$ МПа (увеличение на 3,5%); $\lambda=2,30$ (увеличение на 15,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=1,36$ МПа/град (увеличение в 2,1 раза); $\varphi_i=25,0^\circ$ (увеличение на 25,0%); ЭТЭ - $T_{\max}=2540$ К (увеличение на 14,9%); $p_z=9,2$ МПа (увеличение на 7,0%); $\lambda=2,36$ (увеличение на 18,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=1,19$ МПа/град (увеличение на 85,9%); $\varphi_i=25,5^\circ$ (увеличение на 27,5%).

5. Определены оптимальные значения показателей процесса сгорания при работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ и СТЭ при у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

При у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200$ мин⁻¹, $p_c = 0,64$ МПа) получены следующие результаты: ДП - $T_{\max}=2280$ К; $p_z=8,7$ МПа; $\lambda=2,06$; $(dp/d\varphi)_{\max}=0,63$ МПа/град; $\varphi_i=23,0^\circ$; ГДП - $T_{\max}=3190$ К (увеличение на 39,9%); $p_z=10,0$ МПа (увеличение на 14,9%); $\lambda=2,35$ (увеличение на 14,1%);

$(dp/d\varphi)_{\max}=0,90$ МПа/град (увеличение на 42,9%); $\varphi_i=30,5^\circ$ (увеличение на 32,6%);
 ГДП с РОГ 10% - $T_{\max}=3010$ К (увеличение на 32,0%); $p_z=9,4$ МПа (увеличение на
 8,1%); $\lambda=2,20$ (увеличение на 6,8%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,76$ МПа/град (увеличение на
 20,6%); $\varphi_i=31,0^\circ$ (увеличение на 34,8%); ГДП с РОГ 20% - $T_{\max}=2750$ К
 (увеличение на 20,6%); $p_z=8,7$ МПа (соответствует ДП); $\lambda=2,08$ (увеличение на
 1,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,65$ МПа/град (увеличение на 3,2%); $\varphi_i=32,0^\circ$ (увеличение на
 39,1%); МТЭ - $T_{\max}=2450$ К (увеличение на 7,5%); $p_z=9,0$ МПа (увеличение на
 3,5%); $\lambda=2,20$ (увеличение на 6,8%); $(dp/d\varphi)_{\max}=1,26$ МПа/град (увеличение в 2,0
 раза); $\varphi_i=29,0^\circ$ (увеличение на 26,1%); ЭТЭ - $T_{\max}=2580$ К (увеличение на 13,2%);
 $p_z=9,7$ МПа (увеличение на 11,5%); $\lambda=2,35$ (увеличение на 14,1%); $(dp/d\varphi)_{\max}=1,04$
 МПа/град (увеличение на 65,1%); $\varphi_i=28,0^\circ$ (увеличение на 21,7%).

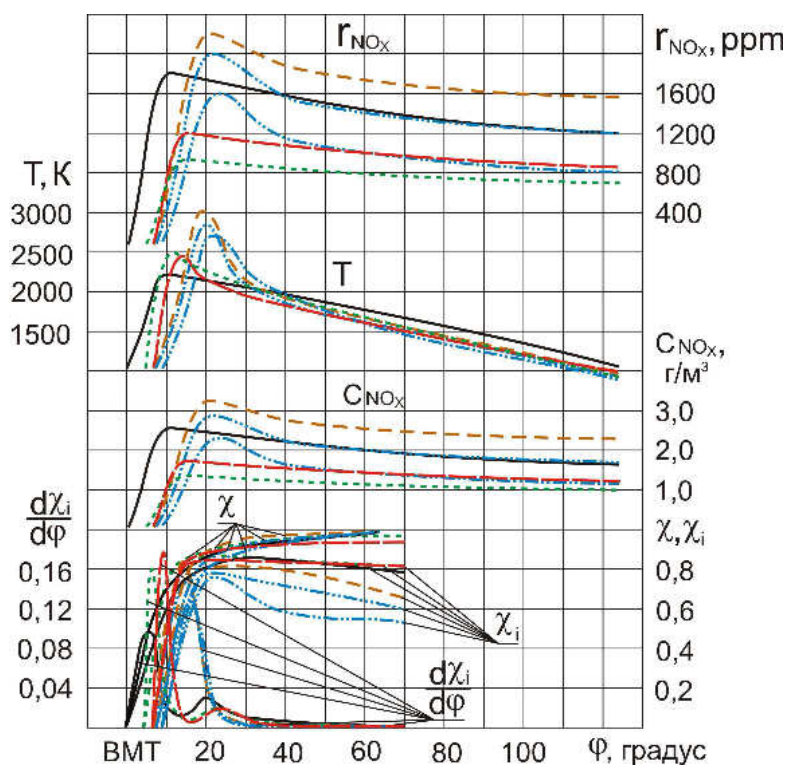
При у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному
 крутящему моменту ($n = 1700$ мин⁻¹, $p_e = 0,69$ МПа): ДП - $T_{\max}=2280$ К;
 $p_z=9,1$ МПа; $\lambda=2,18$; $(dp/d\varphi)_{\max}=0,71$ МПа/град; $\varphi_i=21,0^\circ$; ГДП - $T_{\max}=3210$ К
 (увеличение на 40,8%); $p_z=11,3$ МПа (увеличение на 24,2%); $\lambda=2,70$ (увеличение
 на 30,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,98$ МПа/град (увеличение на 38,0%); $\varphi_i=23,0^\circ$ (увеличение
 на 9,5%); ГДП с РОГ 10% - $T_{\max}=3030$ К (увеличение на 32,9%); $p_z=10,6$ МПа
 (увеличение на 16,5%); $\lambda=2,50$ (увеличение на 20,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,92$ МПа/град
 (увеличение на 29,6%); $\varphi_i=24,0^\circ$ (увеличение на 14,3%); ГДП с РОГ 20% -
 $T_{\max}=2780$ К (увеличение на 21,9%); $p_z=9,9$ МПа (увеличение на 8,8%); $\lambda=2,34$
 (увеличение на 16,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=0,83$ МПа/град (увеличение на 16,9%); $\varphi_i=25,0^\circ$
 (увеличение на 19,1%); МТЭ - $T_{\max}=2490$ К (увеличение на 9,2%); $p_z=9,3$ МПа
 (увеличение на 2,2%); $\lambda=2,34$ (увеличение на 15,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=1,44$ МПа/град
 (увеличение в 2,0 раза); $\varphi_i=27,0^\circ$ (увеличение на 28,6%); ЭТЭ - $T_{\max}=2600$ К
 (увеличение на 14,0%); $p_z=9,8$ МПа (увеличение на 7,7%); $\lambda=2,43$ (увеличение на
 18,0%); $(dp/d\varphi)_{\max}=1,31$ МПа/град (увеличение на 84,5%); $\varphi_i=26,5^\circ$ (увеличение на
 26,2%).

6 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЯ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

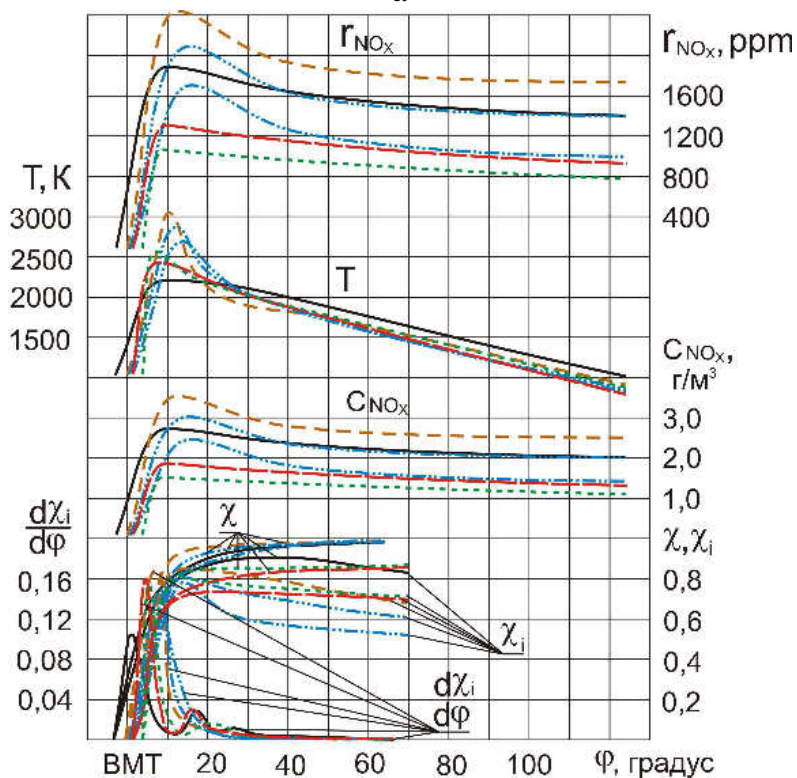
6.1 Исследование теплотыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ по установочному у.о.в.т

В результате проведенных в главе 5 исследований [458-463] ясно, что физико-химическая картина сгорания в дизелях, работающих на альтернативных топливах, отличается от дизелей при работе их на штатном дизельном топливе, и до настоящего времени в литературе встречаются самые противоречивые взгляды на основные элементы сгорания в дизелях альтернативных топлив, например, на механизм самовоспламенения, характер сгорания основной массы топлива и роль смесеобразования. В данной работе даже самое поверхностное изложение этих противоречивых взглядов по столь сложным вопросам нецелесообразно, поэтому необходимо после описания в главе 5 основных представлений о характере процесса сгорания дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, рассмотреть характеристики теплотыделения в этом дизеле и их влияние на выход оксидов азота. На рисунке 6.1, а представлена динамика теплотыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$. Лишь совместное рассмотрение этих кривых (кривые теплотыделения и кривые оксидов азота) может дать правильное представление о динамике теплотыделения и количественном выходе NO_x [464-487].

Анализ графических зависимостей показывает, что максимальные объемное содержание $\gamma_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре повторяют характер протекания осредненной температуры цикла, следуют сразу за ее максимальным значением T_{max} и значительно превышают значения в цилиндре в момент открытия выпускного клапана ($\phi_b = 124,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т.).



а



б

Рисунок 6.1 – Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения угла п.к.в. при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$;

б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; ———— – ДП; - - - - ГДП; ······ – ГД с РОГ 10%;
 ······ – ГД с РОГ 20%; ······ – ЭТЭ; - ······ – МТЭ

Исследования ДП показывают, что величина $r_{\text{NOx max}}$ в цилиндре составляет 1800 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NOx max}}$ равняется $2,59 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 12,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx, } \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b составляет 1200 ppm, что характеризуется снижением максимального значения на 33,3%. Скорее всего это свидетельствует о некотором разложении образовавшихся ранее NO_x . На ГДП величина $r_{\text{NOx max}}$ в цилиндре составляет 2300 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NOx max}}$ составляет $3,31 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 20,5^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx, } \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b равняется 1580 ppm, что соответствует снижению максимального значения на 31,3%. Использование на ГД РОГ приводит к еще большему смещению максимальных значений NO_x вправо от в.м.т. и снижает не только максимальные значения, но и значения на всех исследуемых углах п.к.в. Изучение работы дизеля на МТЭ показывает, что величина $r_{\text{NOx max}}$ в цилиндре составляет 1200 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NOx max}}$ составляет $1,73 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 16,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx, } \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b равняется 840 ppm, что соответствует снижению максимального значения на 30,0%. Величина $r_{\text{NOx max}}$ в ЦД, работающего на ЭТЭ, равняется 950 ppm, $c_{\text{NOx max}}$ составляет $1,37 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 14,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx, } \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b составляет 710 ppm, что ниже на 25,3% максимального значения.

Величина T_{max} на ДП составляет 2190 К при угле п.к.в. $\varphi = 10,5^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 1070 К, что ниже в 2,1 раза максимального значения. При работе по ГДП T_{max} составляет 3010 К при угле п.к.в. $\varphi = 19,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 1010 К, что ниже в 3,0 раза максимального значения. Применение РОГ на газодизеле приводит к смещению максимальных значений T_{max} вправо от в.м.т. и снижению их в ЦД с повышением количества рециркулируемых газов. Исследования дизеля на МТЭ показывают, что T_{max} состав-

ляет 2430 К при угле п.к.в. $\varphi = 14,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 1000 К, что ниже в 2,4 раза величины T_{\max} . Исследования дизеля на ЭТЭ характеризуются величиной T_{\max} , составляющей 2510 К при угле п.к.в. $\varphi = 12,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 900 К, что ниже в 2,8 раза максимального значения.

Рассматривая характеристики тепловыделения на ДП, следует выделить, что максимальная величина $d\chi_i/d\varphi$ составляет 0,095 при угле п.к.в. $\varphi = 5,5^\circ$ после в.м.т. При работе по ГДП максимальное значение скорости активного тепловыделения уже составляет 0,165 при угле п.к.в. $\varphi = 14,5^\circ$ после в.м.т, что соответствует повышению на 73,3% по отношению к ДП. Использование на ГД РОГ еще больше сдвигает максимум активного тепловыделения вправо от в.м.т., скорость активного выделения тепла при этом уменьшается. Увеличивая степень рециркуляции на ГДП происходит снижение доли сгорания топлива в начальном периоде, что уменьшает значения χ_i с ростом РОГ и тем самым ограничивает процессы образования NO_x в ЦД.

Применение МТЭ и ЭТЭ также приводит к увеличению скорости активного тепловыделения $d\chi_i/d\varphi$ и сдвигает максимум скорости вправо от в.м.т. Так, у дизеля, работающего на МТЭ, максимальная величина $d\chi_i/d\varphi$ составляет 0,180 при угле п.к.в. $\varphi = 9,0^\circ$ после в.м.т, что на 89,5% выше ДП. Максимальное значение скорости активного тепловыделения при работе дизеля на ЭТЭ составляет 0,160 при угле п.к.в. $\varphi = 6,5^\circ$ после в.м.т, что на 68,4% выше ДП. Также необходимо отметить, что наличие второго максимума на кривых скорости активного выделения тепла $d\chi_i/d\varphi$, как по ДП, так и на СТЭ, характеризуется величиной дополнительной турбулизации ТВС в ЦД, возникающей вследствие засасывания рабочего заряда из КС в надпоршневое пространство в процессе расширения.

Для сравнения расчетных ($r_{\text{NO}_x, \varphi_b}$), теоретических ($r_{\text{NO}_x \text{ теор}}$) и экспериментальных (NO_x) данных значения объемного содержания оксидов азота в ЦД

4Ч 11,0/12,5 и ОГ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Результаты исследований объемного содержания NO_x и температуры в цилиндре и ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_c = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	$r_{\text{NO}_x, \text{ фб}}, \text{ ppm}$	$r_{\text{NO}_x \text{ теор}}, \text{ ppm}$	$\text{NO}_x, \text{ ppm}$	$T_{\text{фб}}, \text{ К}$	$T_{\text{г}}, \text{ К}$
Дизельное	1200	1160	1100	1070	560
ПГ	1580 (увеличение на 31,7%)	1530 (увеличение на 31,9%)	1450 (увеличение на 31,8%)	1010 (снижение на 5,6%)	500 (снижение на 10,7%)
ПГ с РОГ 10%	1200 (соответствует ДП)	1160 (соответствует ДП)	1100 (соответствует ДП)	950 (снижение на 11,2%)	490 (снижение на 12,5%)
ПГ с РОГ 20%	810 (снижение на 32,5%)	790 (снижение на 31,9%)	750 (снижение на 31,8%)	850 (снижение на 20,6%)	480 (снижение на 14,3%)
МТЭ	840 (снижение на 30,0%)	815 (снижение на 29,7%)	775 (снижение на 29,6%)	1000 (снижение на 6,5%)	495 (снижение на 11,6%)
ЭТЭ	710 (снижение на 40,8%)	690 (снижение на 40,5%)	657 (снижение на 40,3%)	900 (снижение на 15,9%)	485 (снижение на 13,4%)

На рисунке 6.1, б представлена динамика тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$.

В результате исследований графических зависимостей следует отметить, что максимальные объемное содержание $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре повторяют характер протекания осредненной температуры цикла, следуют сразу за ее максимальным значением T_{max} и значительно превышают значения в цилиндре в момент открытия выпускного клапана

($\varphi_b = 124,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т.). Так, по ДП $r_{\text{NOx max}}$ в цилиндре составляет 1900 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NOx max}}$ составляет $2,74 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 9,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx}, \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b составляет 1400 ppm, что меньше максимального значения на 26,3%.

При исследованиях ГДП $r_{\text{NOx max}}$ в цилиндре составляет 2450 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NOx max}}$ составляет $3,53 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 12,5^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx}, \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b равняется 1730 ppm, что меньше максимального значения на 29,4%. Использование на ГДП РОГ приводит к еще большему смещению максимальных значений оксидов азота вправо от в.м.т. и снижает не только максимальные значения, но и значения NO_x на всех исследуемых углах п.к.в.

При исследованиях дизеля на МТЭ $r_{\text{NOx max}}$ в цилиндре составляет 1300 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NOx max}}$ составляет $1,87 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 10,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx}, \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b равняется 910 ppm, что соответствует снижению на 30,0% от максимального значения. Величина $r_{\text{NOx max}}$ в ЦД, работающего на ЭТЭ, равняется 1060 ppm, величина $c_{\text{NOx max}}$ составляет $1,53 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 9,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx}, \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b составляет 780 ppm, что ниже на 26,4% максимального значения.

Величина T_{max} по ДП составляет 2210 К при угле п.к.в. $\varphi = 7,5^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 1010 К, что ниже в 2,2 раза максимального значения. При работе по ГДП T_{max} составляет 3050 К при угле п.к.в. $\varphi = 10,5^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 900 К, что ниже в 3,4 раза максимального значения. Применение РОГ на газодизеле приводит к смещению максимальных значений T_{max} вправо от в.м.т. и снижению температуры газов в ЦД с повышением объема рециркулируемых газов. При исследованиях дизеля, работающего на МТЭ, величина T_{max} составляет 2460 К при угле п.к.в. $\varphi = 8,0^\circ$ после в.м.т. В момент

же открытия выпускного клапана T_{ϕ_b} составляет 790 К, что ниже в 3,1 раза величины T_{\max} . При исследованиях дизеля, работающего на ЭТЭ, величина T_{\max} составляет 2540 К при угле п.к.в. $\phi = 7,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{ϕ_b} составляет 880 К, что ниже в 2,9 раза максимального значения.

Таблица 6.2 - Результаты исследований объемного содержания NO_x и температуры в цилиндре и ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме при максимальном крутящем моменте ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_c = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	$\Gamma_{\text{NO}_x, \phi_b}$, ppm	$\Gamma_{\text{NO}_x \text{ теор}}$, ppm	NO_x , ppm	T_{ϕ_b} , К	T_r , К
Дизельное	1400	1370	1300	1010	500
ПГ	1730 (увеличение на 23,6%)	1690 (увеличение на 23,4%)	1600 (увеличение на 23,1%)	900 (снижение на 10,9%)	485 (снижение на 3,0%)
ПГ с РОГ 10%	1400 (соответствует ДП)	1370 (соответствует ДП)	1300 (соответствует ДП)	850 (снижение на 15,8%)	480 (снижение на 4,0%)
ПГ с РОГ 20%	990 (снижение на 29,3%)	965 (снижение на 29,6%)	915 (снижение на 29,6%)	810 (снижение на 19,8%)	475 (снижение на 5,0%)
МТЭ	910 (снижение на 35,0%)	885 (снижение на 35,4%)	839 (снижение на 35,5%)	790 (снижение на 21,8%)	470 (снижение на 6,0%)
ЭТЭ	780 (снижение на 44,3%)	770 (снижение на 43,8%)	730 (снижение на 43,9%)	880 (снижение на 12,9%)	483 (снижение на 3,4%)

Рассматривая характеристики тепловыделения по ДП, следует выделить, что максимальная величина $d\chi_i/d\phi$ составляет 0,10 при угле п.к.в. $\phi = 1,0^\circ$ после в.м.т. При работе по ГДП максимальное значение скорости активного тепловыделения уже составляет 0,17 при угле п.к.в. $\phi = 6,5^\circ$ после в.м.т., что превышает ДП на 70,0%. Применение МТЭ и ЭТЭ также приводит к увеличению скорости

активного тепловыделения $d\chi_i/d\varphi$ и сдвигает максимум скорости вправо от в.м.т. Так, на МТЭ максимальная величина скорости активного тепловыделения составляет 0,160 при угле п.к.в. $\varphi = 4,5^\circ$ после в.м.т, что соответствует увеличению на 60,0% по отношению к ДП. На ЭТЭ величина максимального значения $d\chi_i/d\varphi$ составляет 0,155 при угле п.к.в. $\varphi = 5,5^\circ$ после в.м.т, что на 55,0% выше ДП.

Для сравнения расчетных ($r_{\text{NO}_x, \varphi_b}$), теоретических ($r_{\text{NO}_x \text{ теор}}$) и экспериментальных (NO_x) данных значения объемного содержания оксидов азота в ЦД 4Ч 11,0/12,5 и ОГ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме при максимальном крутящем моменте представлены в таблице 6.2.

На рисунке 6.2, а представлена динамика тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$.

Исследуя кривые следует выделить, что максимальные объемное содержание $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре повторяют характер протекания осредненной температуры цикла, следуют сразу за ее максимальным значением T_{max} и значительно превышают значения в цилиндре в момент открытия выпускного клапана ($\varphi_b = 124,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т.). Так, на ДП величина $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре составляет 1980 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ составляет $2,85 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 10,5^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NO}_x, \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b составляет 1450 ppm, что соответствует снижению на 26,8% от максимального значения. На ГДП величина $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре составляет 2600 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ составляет $3,74 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 19,5^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NO}_x, \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b равняется 1820 ppm, что на 30,0% меньше максимального значения. Исследования дизеля на МТЭ показывают, что величина $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в ЦД составляет 1300 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ составляет $1,87 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 14,0^\circ$ после в.м.т.

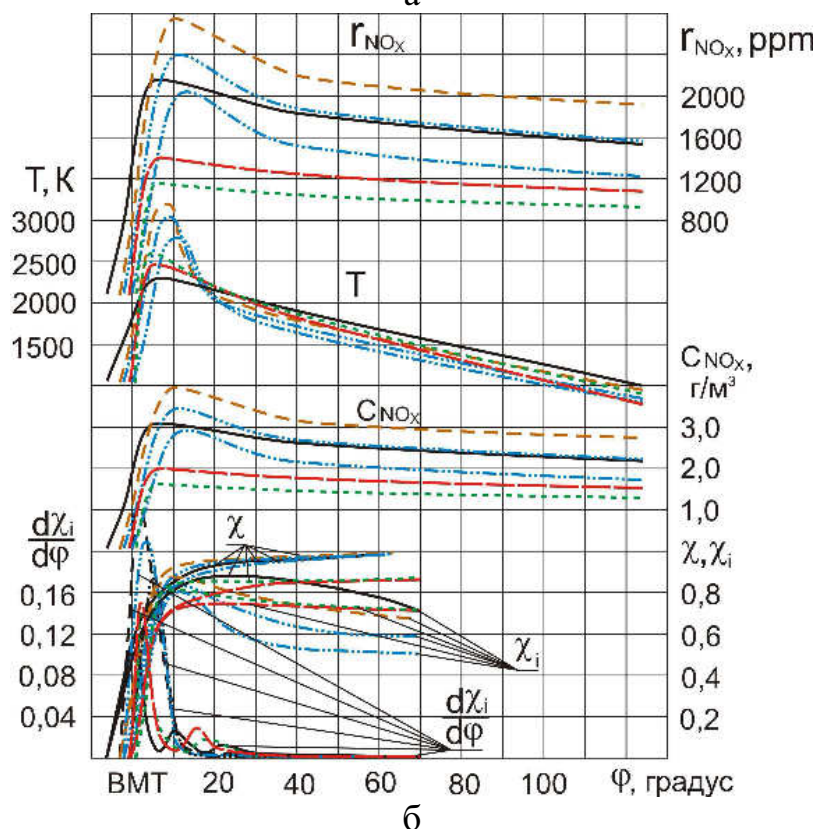
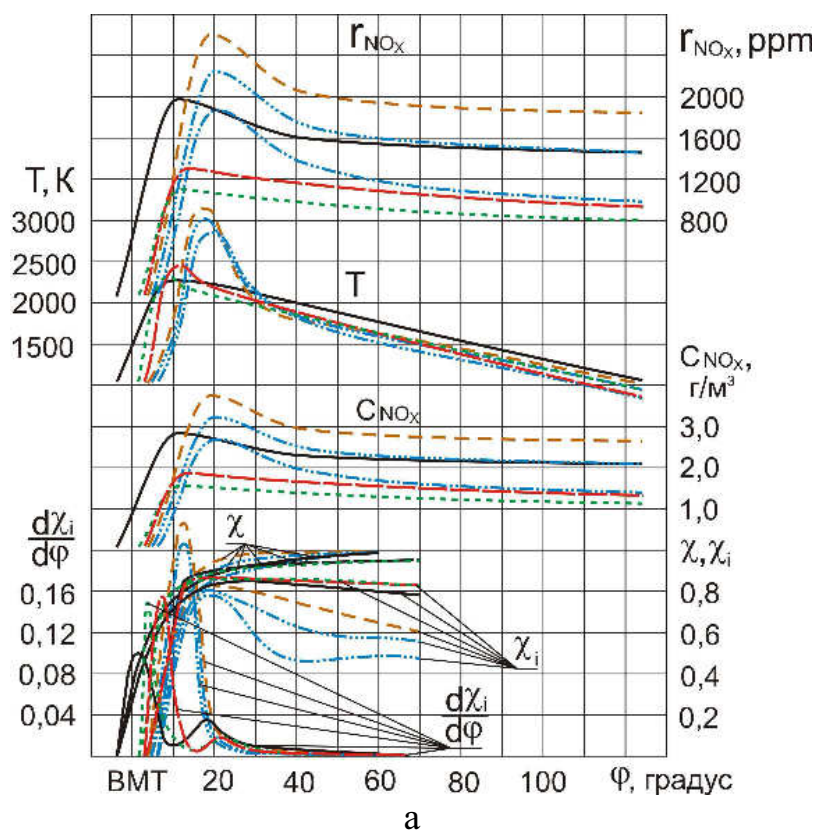


Рисунок 6.2 - Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения угла п.к.в. при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$;

б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; ———— – ДП; - - - - - ГДП; ······ - ГД с РОГ 10%;
 ······ - ГД с РОГ 20%; ······ - ЭТЭ; - - - - - МТЭ

Объемное содержание $r_{\text{NO}_x, \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b равняется 930 ppm, что на 28,5% меньше максимального значения. Максимальная величина $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в ЦД, работающего на ЭТЭ, равняется 1100 ppm, $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ составляет 1,58 г/м³ при угле п.к.в. $\varphi = 12,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NO}_x, \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b составляет 800 ppm, что ниже на 27,3% максимального значения.

Величина T_{max} по ДП составляет 2280 К при угле п.к.в. $\varphi = 9,5^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 1050 К, что ниже в 2,2 раза максимального значения. При работе по ГДП T_{max} составляет 3190 К при угле п.к.в. $\varphi = 17,5^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 1010 К, что ниже в 3,2 раза максимального значения. При исследовании дизеля на МТЭ величина T_{max} составляет 2450 К при угле п.к.в. $\varphi = 12,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 850 К, что ниже максимального значения в 2,9 раза. Исследования дизеля на ЭТЭ показывают, что величина T_{max} составляет 2580 К при угле п.к.в. $\varphi = 9,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 950 К, что ниже в 2,7 раза максимального значения. Рассматривая характеристики тепловыделения по ДП следует выделить, что максимальная величина $d\chi_i/d\varphi$ составляет 0,100 при угле п.к.в. $\varphi = 2,5^\circ$ после в.м.т. При работе по ГДП максимальное значение скорости активного тепловыделения уже составляет 0,225 при угле п.к.в. $\varphi = 12,5^\circ$ после в.м.т., что в 2,3 раза выше ДП. Применение МТЭ и ЭТЭ также приводит к увеличению скорости активного тепловыделения $d\chi_i/d\varphi$ и сдвигает максимум скорости вправо от в.м.т. Так, исследования дизеля на МТЭ характеризуются максимальной величиной $d\chi_i/d\varphi$, равной 0,120 при угле п.к.в. $\varphi = 7,5^\circ$ после в.м.т, что соответствует повышению на 20,0% по отношению к ДП. При исследованиях дизеля на ЭТЭ максимальная величина $d\chi_i/d\varphi$ составляет 0,140 при угле п.к.в. $\varphi = 4,0^\circ$ после в.м.т, что на 40,0% выше ДП.

Для сравнения расчетных ($r_{\text{NO}_x, \varphi_b}$), теоретических ($r_{\text{NO}_x \text{ теор}}$) и экспериментальных (NO_x) данных значения объемного содержания оксидов азота в ЦД

4Ч 11,0/12,5 и ОГ при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Результаты исследований объемного содержания NO_x и температуры в цилиндре и ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	$\Gamma_{\text{NO}_x, \phi_b}$, ppm	$\Gamma_{\text{NO}_x \text{ теор}}$, ppm	NO_x , %	T_{ϕ_b} , К	T_{Γ} , К
Дизельное	1450	1390	1320	1050	550
ПГ	1820 (увеличение на 25,5%)	1750 (увеличение на 25,9%)	1650 (увеличение на 25,0%)	1010 (снижение на 3,8%)	500 (снижение на 9,1%)
ПГ с РОГ 10%	1440 (снижение на 0,7%)	1390 (соответствует ДП)	1300 (снижение на 1,5%)	950 (снижение на 9,5%)	490 (снижение на 10,9%)
ПГ с РОГ 20%	990 (снижение на 31,7%)	950 (снижение на 31,7%)	900 (снижение на 31,8%)	835 (снижение на 20,5%)	478 (снижение на 13,1%)
МТЭ	930 (снижение на 35,9%)	900 (снижение на 35,3%)	853 (снижение на 35,4%)	850 (снижение на 19,1%)	480 (снижение на 12,7%)
ЭТЭ	800 (снижение на 44,8%)	770 (снижение на 44,6%)	730 (снижение на 44,7%)	950 (снижение на 9,5%)	490 (снижение на 10,9%)

На рисунке 6.2, б представлена динамика тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения угла п.к.в. при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$.

Анализ графических зависимостей показывает, что максимальные объемное содержание $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре повторяют характер протекания осредненной температуры цикла, следуют сразу за ее максимальным значением T_{max} и значительно превышают значения в цилиндре в момент открытия выпускного клапана ($\phi_b = 124,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т.). Так, на ДП величина $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре составляет 2160 ppm, максимальная массовая

концентрация $c_{\text{NOx max}}$ составляет $3,11 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 7,5^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx, } \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b составляет 1530 ppm, что соответствует снижению на 29,2% от максимального значения. На ГДП величина $r_{\text{NOx max}}$ в цилиндре составляет 2750 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NOx max}}$ составляет $3,96 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 10,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx, } \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b равняется 1920 ppm, что меньше максимального значения на 30,2%.

При исследованиях дизеля на МТЭ величина $r_{\text{NOx max}}$ в цилиндре составляет 1400 ppm, максимальная массовая концентрация $c_{\text{NOx max}}$ составляет $2,02 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 8,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx, } \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b равняется 1080 ppm, что на 22,9% меньше максимального значения. Величина $r_{\text{NOx max}}$ в ЦД, работающего на ЭТЭ, равняется 1150 ppm, величина $c_{\text{NOx max}}$ составляет $1,66 \text{ г/м}^3$ при угле п.к.в. $\varphi = 7,0^\circ$ после в.м.т. Объемное содержание $r_{\text{NOx, } \varphi_b}$ в цилиндре при φ_b составляет 910 ppm, что ниже на 20,9% максимального значения.

Величина T_{max} по ДП составляет 2280 К при угле п.к.в. $\varphi = 6,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 1000 К, что ниже в 2,3 раза максимального значения. При работе по ГДП T_{max} составляет 3210 К при угле п.к.в. $\varphi = 8,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 950 К, что ниже в 3,4 раза максимального значения. Применение РОГ на газодизеле приводит к смещению максимальных значений T_{max} вправо от в.м.т. и снижению температуры газов в ЦД с повышением объема рециркулируемых газов. При исследовании дизеля, работающего на МТЭ, величина T_{max} составляет 2490 К при угле п.к.в. $\varphi = 6,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 770 К, что ниже максимальной величины в 3,2 раза. На ЭТЭ величина T_{max} составляет 2600 К при угле п.к.в. $\varphi = 5,0^\circ$ после в.м.т. В момент же открытия выпускного клапана T_{φ_b} составляет 900 К, что ниже в 2,9 раза максимального значения. Рассматривая ха-

рактические характеристики тепловыделения по ДП следует выделить, что максимальная величина $d\chi_i/d\varphi$ составляет 0,11 при угле п.к.в. $\varphi = 0,5^\circ$ после в.м.т. При работе по ГДП максимальное значение скорости активного тепловыделения уже составляет 0,24 при угле п.к.в. $\varphi = 3,0^\circ$ после в.м.т, что в 2,2 раза выше ДП.

Применение МТЭ и ЭТЭ также приводит к увеличению скорости активного тепловыделения $d\chi_i/d\varphi$ и сдвигает максимум скорости вправо от в.м.т. Так, исследования дизеля, работающего на МТЭ, показывают, что максимальная величина скорости активного тепловыделения составляет 0,150 при угле п.к.в. $\varphi = 2,5^\circ$ после в.м.т, что на 36,4% выше ДП. Максимальное значение скорости активного тепловыделения при работе дизеля на ЭТЭ составляет 0,145 при угле п.к.в. $\varphi = 8,5^\circ$ после в.м.т, что на 31,8% выше ДП.

Таблица 6.4 - Результаты исследований объемного содержания NO_x и температуры в цилиндре и ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме при максимальном крутящем моменте ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели				
	$r_{\text{NO}_x, \varphi_b}$, ppm	$r_{\text{NO}_x \text{ теор}}$, ppm	NO_x , ppm	T_{φ_b} , К	T_r , К
Дизельное	1530	1480	1400	1000	495
ПГ	1920 (увеличение на 20,3%)	1850 (увеличение на 25,0%)	1750 (увеличение на 25,0%)	950 (снижение на 5,0%)	490 (снижение на 1,0%)
ПГ с РОГ 10%	1570 (увеличение на 2,6%)	1510 (увеличение на 2,0%)	1430 (увеличение на 2,1%)	850 (снижение на 15,0%)	480 (снижение на 3,0%)
ПГ с РОГ 20%	1210 (снижение на 20,9%)	1165 (снижение на 21,3%)	1100 (снижение на 21,4%)	790 (снижение на 21,0%)	470 (снижение на 5,1%)
МТЭ	1080 (снижение на 29,4%)	1045 (снижение на 29,4%)	985 (снижение на 29,6%)	770 (снижение на 23,0%)	460 (снижение на 7,1%)
ЭТЭ	910 (снижение на 40,5%)	880 (снижение на 40,6%)	830 (снижение на 40,7%)	900 (снижение на 10,0%)	485 (снижение на 2,0%)

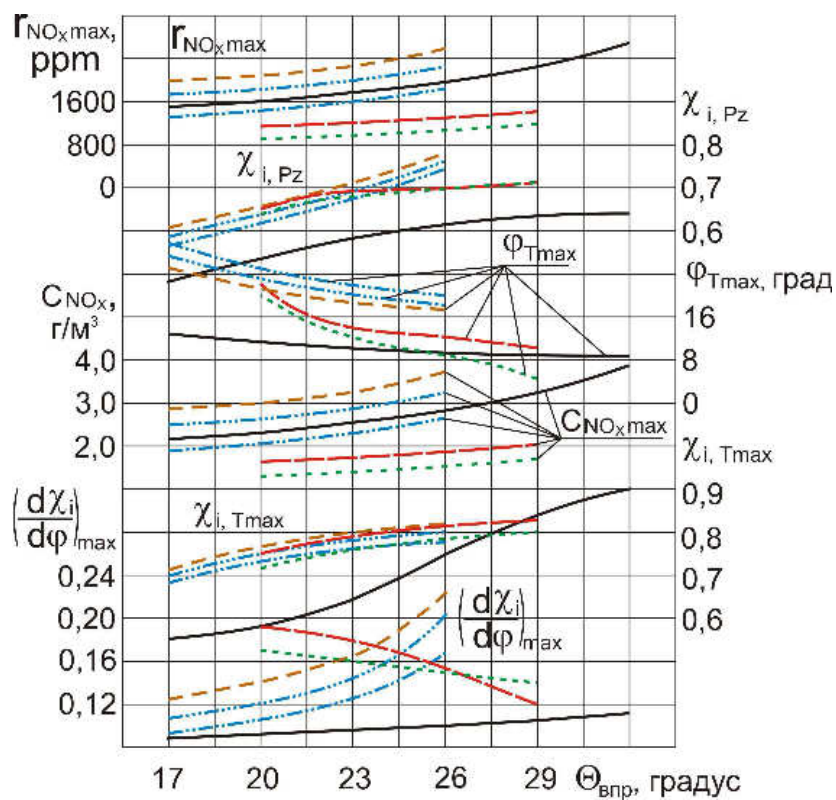
Для сравнения расчетных ($r_{\text{NO}_x, \text{фв}}$), теоретических ($r_{\text{NO}_x \text{ теор}}$) и экспериментальных (NO_x) данных значения объемного содержания оксидов азота в цилиндре и ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме при максимальном крутящем моменте представлены в таблице 6.4.

Анализируя результаты сравнения приведенных в таблицах 6.1-6.4 параметров, можно отметить, что разница между расчетными и экспериментальными данными объемного содержания NO_x в среднем менее 10%, между теоретическими и экспериментальными, а также расчетными и теоретическими данными около 5%. Разница в 10% между расчетными и экспериментальными данными свидетельствует о дальнейшем разложении NO_x после открытия выпускного клапана при движении по системе выпуска дизеля до экспериментальной точки замера токсичности газоанализатором.

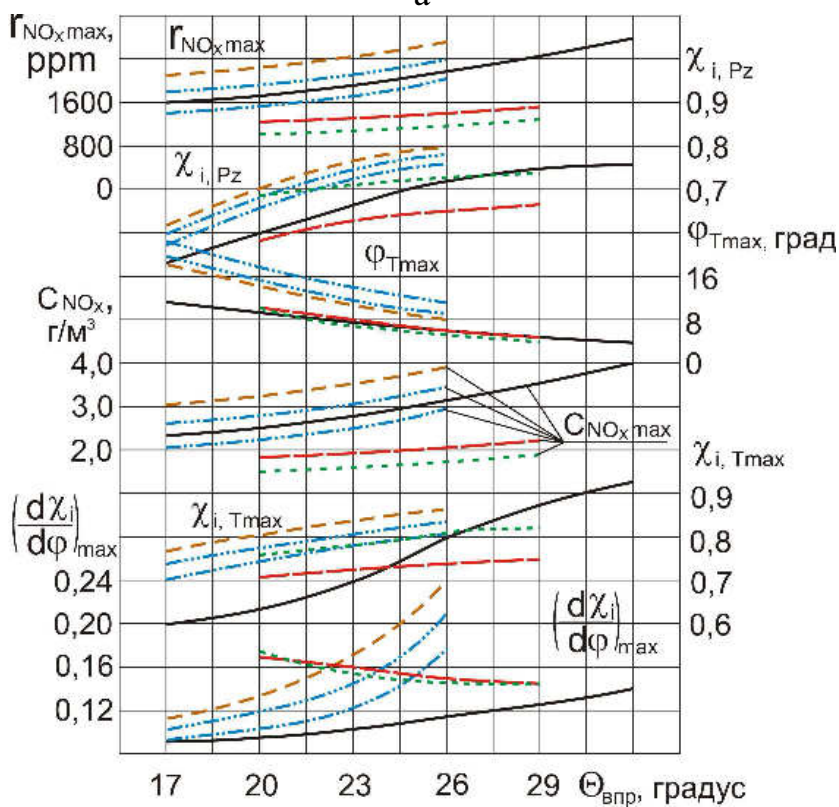
6.2 Исследование тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ по углу п.к.в.

Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ для номинальной частоты вращения 2200 мин^{-1} изображены на рисунке 6.3, а.

Анализируя характеристики следует выделить, что максимальные объемное содержание $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре возрастают с увеличением установочного у.о.в.т. Так, при работе по ДП $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ увеличивается от 1500 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 2700 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, что характеризуется 80,0%. На ГДП $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ растет от 2000 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 2600 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, или на 30,0%. Сравнивая значения с дизельным процессом, видно, что применение ПГ значительно увеличивает максимальные содержания $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в ЦД. Применение же РОГ позволяет устранить в некоторой степени этот недостаток и снизить содержание NO_x .



а



б

Рисунок 6.3 - Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$;
 — ДП; - - - ГДП; ГД с РОГ 10%; - · - · ГД с РОГ 20%;
 ЭТЭ; - · - · МТЭ

Так, применение 10%-ной РОГ в диапазоне изменения установочных у.о.в.т. от 17 до 26° приводит к снижению объемного содержания $r_{\text{NOx max}}$ от 11,5 до 14,2%, а применение 20%-ной РОГ в этом же диапазоне снижает $r_{\text{NOx max}}$ с 35,0 до 28,9%. При работе дизеля на МТЭ $r_{\text{NOx max}}$ растет от 1160 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 1420 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 27,5 до 42,0%. На ЭТЭ $r_{\text{NOx max}}$ увеличивается от 1050 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 1200 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 34,4% до 2,0 раз. С увеличением установочного у.о.в.т. также возрастают значения активного выделения теплоты, соответствующие максимальному давлению сгорания $\chi_{i, Pz}$, и активного выделения теплоты, соответствующие максимальной величине температуры цикла $\chi_{i, T_{\text{max}}}$. По ДП $\chi_{i, Pz}$ возрастает от 0,48 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 0,64 при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, или на 33,3%. Увеличение при этом $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ составляет от 0,56 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 0,90 при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, или на 60,7%. При работе по ГДП $\chi_{i, Pz}$ уменьшается от 0,78 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ до 0,61 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$, что, в свою очередь, выше ДП от 25,8 до 27,1%. Снижение при этом $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ составляет от 0,82 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ до 0,71 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$, что также выше ДП от 9,3 до 26,8%. Применение РОГ позволяет несколько снизить значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\text{max}}}$. На ГДП с 10%-ной РОГ в интервале исследований установочных у.о.в.т. от 17 до 26° наблюдается падение значений $\chi_{i, Pz}$ с 3,3 до 2,6%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $\chi_{i, Pz}$ с 6,6 до 5,2% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП. Снижение же $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ при работе с 10%-ной РОГ в диапазоне установочных у.о.в.т. от 17° до 26° составляет от 1,4 до 2,4%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ от 4,2 до 4,9% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП.

При работе дизеля на МТЭ $\chi_{i, Pz}$ возрастает от 0,65 при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 0,71 при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что выше ДП в этом же диапазоне с 22,6 до 12,7%. Значения $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ при работе дизеля на МТЭ возрастают от 0,75 при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 0,82 при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что выше ДП при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ на 29,3% и ниже на 2,4% при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$. Значения активного тепловыделения при максимальном давлении сгорания $\chi_{i, Pz}$ при работе дизеля на ЭТЭ повышается от 0,64 при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 0,71 при

$\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что выше ДП в этом же диапазоне с 20,8 до 12,7%. Значения $\chi_{i, \text{Tmax}}$ при работе дизеля на ЭТЭ возрастают от 0,72 при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 0,80 при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что выше ДП при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ на 24,1% и ниже на 4,8% при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$.

С увеличением установочного у.о.в.т. снижаются значения угла, характеризующие максимальной величиной температуры цикла φ_{Tmax} . По ДП φ_{Tmax} уменьшается с 13,0 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 9,0° при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, или на 30,8%. Значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$ с увеличением установочного у.о.в.т. при работе на дизельном топливе, КПП и КПП с РОГ растут, а применение МТЭ и ЭТЭ вызывает их снижение. Так, при работе по ДП увеличение значений $(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$ составляет 32,2%: от 0,087 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 0,115 при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$. Применение ПГ приводит к увеличению значений угла при максимальной температуре цикла φ_{Tmax} и скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$. Так, при работе по ГДП φ_{Tmax} растет от 17,5° при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ до 25,0° при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$, что, в свою очередь, выше ДП от 84,2 до 92,3%. А значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$ составляют 0,125 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ и 0,225 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, что также выше ДП от 43,7% до 2,3 раз соответственно. Использование РОГ вызывает еще большее увеличение значений φ_{Tmax} , но зато снижает скорость активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$. Так, применение 10%-ной РОГ на газодизеле в диапазоне снижения установочных у.о.в.т. с 26° до 17° приводит к увеличению значений φ_{Tmax} от 5,7 до 8,0%, а применение 20%-ной РОГ увеличивает уже φ_{Tmax} от 14,3 до 16,0% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП.

Оценивая же значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$ при работе по ГДП с РОГ в диапазоне установочных у.о.в.т. от 17° до 26° можно отметить, что применение 10%-ной РОГ приводит уже к снижению значений $(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$ с 14,4 до 8,9%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$ с 25,6 до 24,4% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП. При работе дизеля на МТЭ φ_{Tmax} растет 10,0° до 22,0° при снижении установочного у.о.в.т. с 29° до 20°, что выше ДП в этом же диапазоне от 11,1% до 2,0 раз соответственно. При работе на МТЭ происходит снижение значений скорости активного

выделения тепла $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$. Так, применение в дизеле МТЭ приводит к снижению значений $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ от 0,12 при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ до 0,19 при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$, что, в свою очередь, выше ДП в этом же диапазоне от 14,3% до 2,1 раз.

Таблица 6.5 - Результаты исследований характеристик тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n=2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели					
	$\Gamma_{\text{NOx max}}$, ppm	$C_{\text{NOx max}}$, г/м ³	χ_i, Pz	χ_i, T_{\max}	$(d\chi_i/d\phi)_{\max}$	$\Phi_{T_{\max}}$, градус
Дизельное	1800	2,59	0,58	0,64	0,095	10,5
ПГ	2300 (увеличение на 27,8%)	3,31 (увеличение на 27,8%)	0,71 (увеличение на 22,4%)	0,80 (увеличение на 25,0%)	0,165 (увеличение на 73,7%)	19,0 (увеличение на 81,0%)
ПГ с РОГ 10%	2000 (увеличение на 11,1%)	2,88 (увеличение на 11,2%)	0,69 (увеличение на 19,0%)	0,78 (увеличение на 21,9%)	0,145 (увеличение на 52,6%)	20,0 (увеличение на 90,5%)
ПГ с РОГ 20%	1600 (снижение на 11,1%)	2,30 (снижение на 11,2%)	0,67 (увеличение на 15,5%)	0,76 (увеличение на 18,8%)	0,135 (увеличение на 42,1%)	22,0 (увеличение в 2,1 раза)
МТЭ	1200 (снижение на 33,3%)	1,73 (снижение на 33,2%)	0,69 (увеличение на 19,0%)	0,79 (увеличение на 23,4%)	0,180 (увеличение на 89,5%)	14,0 (увеличение на 3,3%)
ЭТЭ	950 (снижение на 47,2%)	1,37 (снижение на 47,1%)	0,68 (увеличение на 17,2%)	0,76 (увеличение на 18,8%)	0,160 (увеличение на 68,4%)	12,0 (увеличение на 14,3%)

При исследовании дизеля, работающего на ЭТЭ, $\Phi_{T_{\max}}$ снижается с 20,0° при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до 5,0° при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что выше ДП на 81,8% при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ и меньше на 44,4% при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$. На ЭТЭ с увеличением установочного у.о.в.т. происходит снижение максимальных значений скорости активного выделения тепла $d\chi_i/d\phi$. Так, применение в дизеле ЭТЭ приводит к увеличению максимальных значений $d\chi_i/d\phi$ от 0,14 при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ до 0,17 при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$, что, в свою очередь, выше ДП в этом же диапазоне от 33,3 до 88,9%. Числовые значения характери-

стик тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при установочных у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и 26° и номинальном режиме представлены в таблицах 6.5, 6.6.

Таблица 6.6 - Результаты исследований характеристик тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n=2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели					
	$\Gamma_{\text{NO}_x \text{ max}}$, ppm	$C_{\text{NO}_x \text{ max}}$, г/м ³	$\chi_{i, Pz}$	$\chi_{i, T_{\text{max}}}$	$(d\chi_i/d\phi)_{\text{max}}$	$\Phi_{T_{\text{max}}}$, градус
Дизельное	1980	2,85	0,62	0,75	0,100	9,5
ПГ	2600 (увеличение на 31,3%)	3,74 (увеличение на 31,2%)	0,78 (увеличение на 25,8%)	0,82 (увеличение на 9,3%)	0,225 (увеличение в 2,3 раза)	17,5 (увеличение на 84,2%)
ПГ с РОГ 10%	2230 (увеличение на 12,6%)	3,21 (увеличение на 12,6%)	0,76 (увеличение на 22,6%)	0,80 (увеличение на 6,7%)	0,205 (увеличение в 2,1 раза)	18,5 (увеличение на 94,7%)
ПГ с РОГ 20%	1850 (снижение на 6,6%)	2,67 (снижение на 6,3%)	0,74 (увеличение на 19,4%)	0,78 (увеличение на 4,0%)	0,170 (увеличение на 70,0%)	20,0 (увеличение в 2,1 раза)
МТЭ	1300 (снижение на 34,3%)	1,87 (снижение на 34,4%)	0,70 (увеличение на 12,9%)	0,81 (увеличение на 8,0%)	0,155 (увеличение на 55,0%)	12,0 (увеличение на 26,3%)
ЭТЭ	1100 (снижение на 44,5%)	1,58 (снижение на 44,6%)	0,70 (увеличение на 12,9%)	0,79 (увеличение на 5,3%)	0,150 (увеличение на 50,0%)	9,0 (снижение на 5,3%)

На рисунке 6.3, б представлены характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения $\Theta_{\text{впр}}$ для частоты вращения при максимальном крутящем моменте 1700 мин^{-1} . Анализ графических зависимостей показывает, что максимальные объемное содержание $\Gamma_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовая концентрация $C_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре возрастают с увеличением установочного у.о.в.т. Так, при работе по ДП

$r_{\text{NOx max}}$ растет от 1600 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 2800 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, что соответствует 75,0%. На ГДП $r_{\text{NOx max}}$ увеличивается от 2100 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 2750 ppm при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, или на 31,0%. Сравнивая значения с дизельным процессом, видно, что применение ПГ значительно увеличивает максимальные содержания $r_{\text{NOx max}}$ и $c_{\text{NOx max}}$ в ЦД. Применение же РОГ позволяет устранить в некоторой степени этот недостаток и снизить содержание NO_x . Так, применение 10%-ной РОГ в диапазоне изменения установочных у.о.в.т. от 17 до 26° приводит к снижению объемного содержания $r_{\text{NOx max}}$ с 14,3 до 12,2%, а применение 20%-ной РОГ в этом же диапазоне снижает $r_{\text{NOx max}}$ с 33,3 до 25,8%. При исследовании дизеля на МТЭ $r_{\text{NOx max}}$ растет от 1200 ppm ($\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$) до 1500 ppm ($\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$), что ниже ДП, соответственно, на 31,4 и 40,0%. На ЭТЭ $r_{\text{NOx max}}$ возрастает от 1010 ppm ($\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$) до 1300 ppm ($\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$), что ниже ДП в этом же диапазоне от 42,3 до 48,0%. С увеличением установочного у.о.в.т. также возрастают значения активного выделения теплоты, соответствующие максимальному давлению сгорания $\chi_{i, Pz}$, и активного выделения теплоты, соответствующие максимальной температуре цикла $\chi_{i, T_{\text{max}}}$. Так, при работе по ДП $\chi_{i, Pz}$ возрастает от 0,53 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 0,76 при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, или на 43,4%. Увеличение при этом $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ составляет от 0,60 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 0,93 при $\Theta_{\text{впр}} = 32^\circ$, или на 55,0%. При работе по ГДП $\chi_{i, Pz}$ возрастает от 0,62 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 0,80 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, что выше ДП с 17,0 до 12,7%. Увеличение при этом $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ составляет от 0,77 при $\Theta_{\text{впр}} = 17^\circ$ до 0,86 при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$, что также выше ДП от 28,3 до 7,5% соответственно. Применение РОГ позволяет несколько снизить значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\text{max}}}$. Так, исследование ГДП с 10%-ной РОГ в интервале установочных у.о.в.т. от 17 до 26° вызывает падение значений $\chi_{i, Pz}$ с 3,2 до 2,6%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $\chi_{i, Pz}$ с 8,1 до 5,0%, соответственно, в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП. Снижение же $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ при работе с 10%-ной РОГ в диапазоне установочных у.о.в.т. от 17° до 26° составляет от 3,9 до 3,5%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ от 9,1 до 5,8%, соответственно, в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП.

При работе дизеля на МТЭ $\chi_{i, Pz}$ возрастает от 0,58 при $\Theta_{впр} = 20^\circ$ до 0,67 при $\Theta_{впр} = 29^\circ$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 3,3 до 10,7%. Значения $\chi_{i, T_{max}}$ при работе дизеля на МТЭ возрастают от 0,71 при $\Theta_{впр} = 20^\circ$ до 0,75 при $\Theta_{впр} = 29^\circ$, что выше ДП при $\Theta_{впр} = 20^\circ$ на 12,7% и меньше на 13,8% при $\Theta_{впр} = 29^\circ$. При исследовании на ЭТЭ $\chi_{i, Pz}$ повышается с 0,69 при $\Theta_{впр} = 20^\circ$ до 0,74 при $\Theta_{впр} = 29^\circ$, что выше ДП при $\Theta_{впр} = 20^\circ$ на 15,0% и ниже на 1,3% при $\Theta_{впр} = 29^\circ$. Значения $\chi_{i, T_{max}}$ при работе дизеля на ЭТЭ возрастают от 0,75 при $\Theta_{впр} = 20^\circ$ до 0,82 при $\Theta_{впр} = 29^\circ$, что выше ДП при $\Theta_{впр} = 20^\circ$ на 19,1% и ниже на 5,8% при $\Theta_{впр} = 29^\circ$. С увеличением установочного у.о.в.т. снижаются значения угла, характеризующегося максимальной величиной температуры цикла $\varphi_{T_{max}}$. По ДП $\varphi_{T_{max}}$ уменьшается с $11,0^\circ$ при $\Theta_{впр} = 17^\circ$ до $4,0^\circ$ при $\Theta_{впр} = 32^\circ$, или в 2,8 раза. Значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{max}$ с увеличением установочного у.о.в.т. при работе на дизельном топливе, КПП и КПП с РОГ растут, а применение МТЭ и ЭТЭ вызывает их снижение. Так, при работе по ДП увеличение значений $(d\chi_i/d\varphi)_{max}$ составляет 55,6%: от 0,090 при $\Theta_{впр} = 17^\circ$ до 0,140 при $\Theta_{впр} = 32^\circ$. Применение ПГ приводит к увеличению значений угла при максимальной температуре цикла $\varphi_{T_{max}}$ и скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{max}$. Так, при работе по ГДП $\varphi_{T_{max}}$ растет от $8,0^\circ$ при $\Theta_{впр} = 26^\circ$ до $18,0^\circ$ при $\Theta_{впр} = 17^\circ$, что, в свою очередь, выше ДП от 33,3 до 63,6%. Максимальное значение скорости активного тепловыделения $d\chi_i/d\varphi$ при $\Theta_{впр} = 17^\circ$ составляет 0,110, а при $\Theta_{впр} = 26^\circ$ - 0,24, что также, соответственно, выше ДП от 22,2% до 2,2 раз. Применение РОГ приводит к еще большему увеличению значений $\varphi_{T_{max}}$, но зато снижает максимальные значения скорости активного тепловыделения $d\chi_i/d\varphi$. Так, применение 10%-ной РОГ на газодизеле в диапазоне изменения установочных у.о.в.т. с 17° до 26° приводит к увеличению значений $\varphi_{T_{max}}$ с 8,3 до 11,1%, а применение 20%-ной РОГ увеличивает уже $\varphi_{T_{max}}$ с 13,9 до 37,5% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП. Оценивая же максимальные значения скорости активного тепловыделения $d\chi_i/d\varphi$ при работе по ГДП с РОГ в диапазоне установочных у.о.в.т. от 17° до 26° , можно отметить, что применение 10%-ной РОГ приводит уже к снижению значений $(d\chi_i/d\varphi)_{max}$ от

9,1 до 12,5%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже максимальные значения $d\chi_i/d\varphi$ от 18,2 до 27,1% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП.

Таблица 6.7 - Результаты исследований характеристик тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме при максимальном крутящем моменте ($n=1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели					
	$\Gamma_{\text{NOx max}}$, ppm	$C_{\text{NOx max}}$, г/м ³	χ_i, P_z	χ_i, T_{max}	$(d\chi_i/d\varphi)_{\text{max}}$	$\Phi_{T_{\text{max}}}$, градус
Дизельное	1900	2,74	0,66	0,70	0,100	7,5
ПГ	2450 (увеличение на 29,0%)	3,53 (увеличение на 28,8%)	0,77 (увеличение на 16,7%)	0,84 (увеличение на 20,0%)	0,170 (увеличение на 70,0%)	10,5 (увеличение на 40,0%)
ПГ с РОГ 10%	2100 (увеличение на 10,5%)	3,0 (увеличение на 9,5%)	0,75 (увеличение на 13,6%)	0,81 (увеличение на 15,7%)	0,120 (увеличение на 20,0%)	11,5 (увеличение на 53,3%)
ПГ с РОГ 20%	1700 (снижение на 10,5%)	2,45 (снижение на 10,6%)	0,72 (увеличение на 9,1%)	0,78 (увеличение на 11,4%)	0,145 (увеличение на 45,0%)	14,0 (увеличение на 86,7%)
МТЭ	1300 (снижение на 31,6%)	1,87 (снижение на 31,8%)	0,63 (снижение на 4,6%)	0,72 (увеличение на 2,9%)	0,160 (увеличение на 60,0%)	8,0 (увеличение на 6,7%)
ЭТЭ	1060 (снижение на 44,2%)	1,53 (снижение на 44,2%)	0,71 (увеличение на 77,6%)	0,78 (увеличение на 11,4%)	0,155 (увеличение на 55,0%)	7,0 (снижение на 6,7%)

При исследовании дизеля на МТЭ $\varphi_{T_{\text{max}}}$ снижается с $10,0^\circ$ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до $4,5^\circ$ при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что выше ДП на 11,1% при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ и соответствует ДП при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$. При работе на МТЭ с увеличением установочного у.о.в.т. происходит и снижение максимальных значений скорости активного выделения тепла $d\chi_i/d\varphi$. Так, применение в дизеле МТЭ приводит к увеличению максимальных значений $d\chi_i/d\varphi$ от 0,145 при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ до 0,165 при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$, что, в свою очередь, выше ДП в этом же диапазоне от 16,0 до 73,7%. Значение угла при T_{max} при работе дизеля на ЭТЭ снижается с $10,0^\circ$ при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ до $3,5^\circ$ при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$, что выше ДП на 11,1% при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$ и ниже дизельного при

$\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ на 22,2%. При исследовании на ЭТЭ с увеличением установочного у.о.в.т. происходит и снижение максимальных значений скорости активного выделения тепла $d\chi_i/d\phi$. Так, применение в дизеле ЭТЭ приводит к увеличению максимальных значений $d\chi_i/d\phi$ от 0,145 при $\Theta_{\text{впр}} = 29^\circ$ до 0,175 при $\Theta_{\text{впр}} = 20^\circ$, что, в свою очередь, выше ДП в этом же диапазоне от 16,0 до 84,2%.

Таблица 6.8 - Результаты исследований характеристик тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме при максимальном крутящем моменте ($n=1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$)

Топливо	Показатели					
	$\Gamma_{\text{NO}_x \text{ max}}$, ppm	$C_{\text{NO}_x \text{ max}}$, г/м ³	χ_i, Pz	χ_i, T_{max}	$(d\chi_i/d\phi)_{\text{max}}$	$\Phi_{T_{\text{max}}}$, градус
Дизельное	2160	3,11	0,71	0,80	0,110	6,0
ПГ	2750 (увеличение на 27,3%)	3,96 (увеличение на 27,3%)	0,80 (увеличение на 12,7%)	0,86 (увеличение на 7,5%)	0,240 (увеличение в 2,2 раза)	8,0 (увеличение на 33,3%)
ПГ с РОГ 10%	2400 (увеличение на 11,1%)	3,46 (увеличение на 11,3%)	0,78 (увеличение на 9,9%)	0,83 (увеличение на 3,8%)	0,210 (увеличение на 90,9%)	9,0 (увеличение на 50,0%)
ПГ с РОГ 20%	2040 (снижение на 5,6%)	2,94 (снижение на 5,5%)	0,76 (увеличение на 7,0%)	0,81 (увеличение на 1,3%)	0,175 (увеличение на 59,1%)	11,0 (увеличение на 83,3%)
МТЭ	1400 (снижение на 35,2%)	2,02 (снижение на 35,1%)	0,65 (снижение на 85,5%)	0,73 (снижение на 8,8%)	0,150 (увеличение на 36,4%)	6,0 (соответствует ДП)
ЭТЭ	1150 (снижение на 46,8%)	1,66 (снижение на 46,6%)	0,72 (увеличение на 1,4%)	0,81 (увеличение на 1,3%)	0,145 (увеличение на 31,8%)	5,0 (снижение на 16,7%)

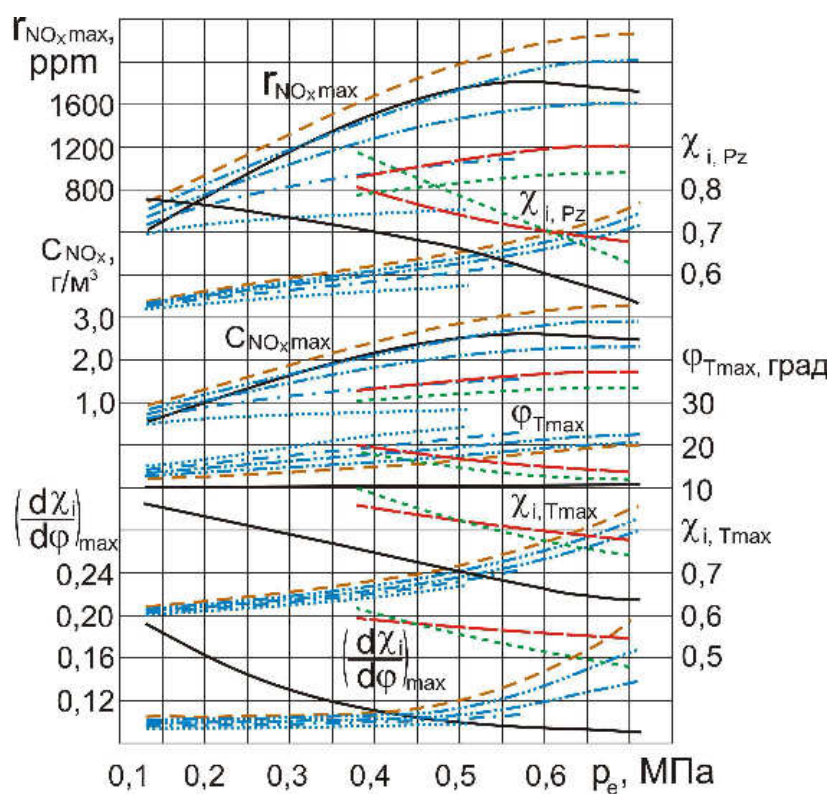
Числовые значения характеристик тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при установочных у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и 26° и режиме при максимальном крутящем моменте представлены в таблицах 6.7, 6.8.

В результате исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5 с различными значениями установочных у.о.в.т., влияния их на характеристики мощностных и эконо-

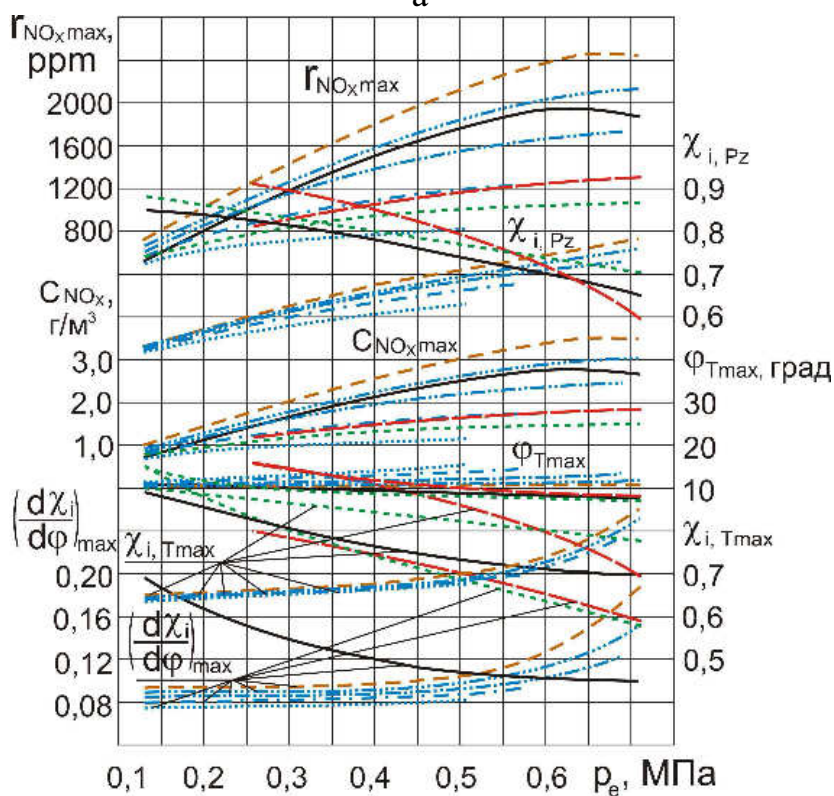
мических показателей, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД и ОГ, концентрации вредных веществ в ОГ, параметров процессов сгорания и тепловыделения при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ для ГДП, ГДП с РОГ, МТЭ и ЭТЭ оптимальным установочным у.о.в.т. был принят угол, равный 23° до в.м.т. Этот же угол рекомендован для ДП, вследствие отсутствия у дизеля устройства, самостоятельно изменяющего установочный у.о.в.т.

6.3 Исследование тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ на нагрузочных режимах

На рисунке 6.4, а представлены характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при частоте вращения 2200 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ на различных нагрузочных режимах работы. Анализируя кривые объемного содержания $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовой концентрации $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре, можно отметить, что при увеличении нагрузки происходит их рост. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ составляет 420 ppm, $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 0,60 \text{ г/м}^3$, максимальные же значения наблюдаются при $p_e = 0,58 \text{ МПа}$ и составляют $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 1840 \text{ ppm}$ и $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 2,65 \text{ г/м}^3$, а при достижении максимальной нагрузки при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ происходит некоторое снижение до значений $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 1710 \text{ ppm}$ и $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 2,46 \text{ г/м}^3$. Применение ПГ в значительной мере увеличивает значения объемного содержания $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовой концентрации $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре. Так, при работе по ГДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 680 \text{ ppm}$, $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 0,98 \text{ г/м}^3$, что выше ДП на 61,9%. При максимальной нагрузке $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 2320 \text{ ppm}$, $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 3,34 \text{ г/м}^3$, что выше ДП на 35,7%. Применение же РОГ на газодизеле позволяет снизить значения объемного содержания $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовой концентрации $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре.



а



б

Рисунок 6.4 - Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; ———— — ДП; - - - - ГДП; ······ - ГД с РОГ 10%; - - - - - ГД с РОГ 20%; ······ - ГД с РОГ 30%; ······ - ГД с РОГ 40%; ······ - ЭТЭ; - - - - - МТЭ

Так, при $p_e = 0,13$ МПа и 40%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx max}} = 390$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 0,56$ г/м³, что ниже на 42,7% газодизельного и на 7,1% дизельного процессов. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа и 20%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx max}} = 1610$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 2,32$ г/м³, что ниже на 30,6% газодизельного и на 5,9% дизельного процессов. Применение МТЭ и ЭТЭ позволяет также значительно снизить $r_{\text{NOx max}}$ и $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при работе на МТЭ при $p_e = 0,38$ МПа $r_{\text{NOx max}} = 910$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 1,31$ г/м³, что на 36,8% ниже ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа применение МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx max}}$ к 1210 ppm и $c_{\text{NOx max}}$ к 1,74 г/м³, что также на 29,2% ниже ДП. При работе на ЭТЭ при $p_e = 0,38$ МПа $r_{\text{NOx max}} = 760$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 1,09$ г/м³, что на 47,2% ниже ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа применение ЭТЭ приводит значения $r_{\text{NOx max}}$ к 960 ppm и $c_{\text{NOx max}}$ к 1,38 г/м³, что также на 43,9% ниже ДП. При работе по ДП угол, соответствующий максимальной температуре цикла $\varphi_{\text{T max}}$ при $p_e = 0,13$ МПа, равен 10,0°п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ повышается до 10,5°п.к.в. после в.м.т., или на 5,0%. Применение ПГ, РОГ, МТЭ и ЭТЭ вызывает увеличение значений $\varphi_{\text{T max}}$. Так, при работе на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ равен 12,0°п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ повышается до 20,0°п.к.в. после в.м.т., что выше ДП от 20,0 до 90,5%, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки. Применение РОГ еще более увеличивает значения $\varphi_{\text{T max}}$. Так, при работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ равен 12,0°п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,51$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ повышается до 25,0°п.к.в. после в.м.т., что выше ДП от 25,0% до 2,4 раз, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки. Применение МТЭ и ЭТЭ также вызывает рост угла, соответствующего максимальной температуре цикла $\varphi_{\text{T max}}$, но на малых нагрузках этот рост является более значительным. Применение МТЭ при максимальном значении $p_e = 0,70$ МПа приводит к значению $\varphi_{\text{T max}}$ 12,5°п.к.в. после в.м.т., а при снижении нагрузки до $p_e = 0,38$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ повышается уже до 20,0°п.к.в. после в.м.т., что, в свою очередь, выше ДП от 19,1% до 2,0 раз, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки.

Применение ЭТЭ при максимальном значении $p_e = 0,70$ МПа приводит к значению $\varphi_{T \max}$ 11,0°п.к.в. после в.м.т., а при снижении нагрузки до $p_e = 0,38$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается до 18,0°п.к.в. после в.м.т., что, в свою очередь, выше ДП от 4,8 до 80,0%, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки.

При работе по ДП при увеличении нагрузки снижается максимум скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ от величины 0,194 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,092 при $p_e = 0,71$ МПа. Снижение составляет 47,4%. Применение ПГ вызывает увеличение $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ с ростом нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ равняется 0,108, а при максимальной нагрузке $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ повышается до 0,196, или на 81,5%. Применение РОГ не изменяет характер протекания кривых, и с увеличением нагрузки также происходит рост максимума скорости активного тепловыделения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа при работе с 40%-ной РОГ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,092, что на 14,8 ниже ГДП и в 2,1 раза ниже дизельного. При $p_e = 0,71$ МПа и РОГ 10% $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет уже 0,168, что на 14,3 ниже ГДП, но на 82,6% выше дизельного. В результате применения МТЭ и ЭТЭ с увеличением нагрузки происходит снижение максимума скорости активного тепловыделения. При работе на МТЭ при нагрузке, соответствующей 0,38 МПа, $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,198, что на 76,8% выше ДП. При нагрузке, равной 0,70 МПа, при работе на МТЭ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,178, что на 93,5% выше ДП. При $p_e = 0,38$ МПа при работе на ЭТЭ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,208, что на 85,7% выше ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,70$ МПа при работе на ЭТЭ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,152, что на 65,2% выше ДП.

С увеличением нагрузки при работе на дизельном топливе МТЭ и ЭТЭ снижаются значения активного выделения теплоты, соответствующие максимальному давлению сгорания $\chi_{i, Pz}$, и активного выделения теплоты, соответствующие максимальной температуре цикла $\chi_{i, T\max}$, а при работе на ПГ и ПГ с РОГ - повышаются. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T\max}$ составляют 0,78 и 0,86, а увеличение нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа приводит к значениям $\chi_{i, Pz} = 0,53$ и $\chi_{i, T\max} = 0,63$. Снижение составляет 32,1 и 26,7%, соответственно, для $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T\max}$. При работе на ПГ при

$p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{max}}$ составляют 0,54 и 0,63, увеличение нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа приводит к росту значений $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{max}}$ до 0,77 и 0,86, что в свою очередь при $p_e = 0,13$ МПа ниже ДП на 30,8 и 26,7%, а при $p_e = 0,71$ МПа выше дизельного на 45,3 и 36,5 для $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{max}}$ соответственно. Применение на газодизеле РОГ приводит к некоторому снижению значений $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{max}}$. Так, при работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ составляют 0,52, а при увеличении нагрузки до 0,51 МПа увеличиваются до 0,58, что ниже ГДП на 3,7 и 12,1%, соответственно. При работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, T_{max}}$ составляют 0,60, а при увеличении нагрузки до 0,51 МПа увеличиваются до 0,67, что ниже ГДП на 4,8 и 6,9% соответственно. При работе дизеля на МТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается от 0,81 при $p_e = 0,38$ МПа до 0,68 при $p_e = 0,70$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне от 14,1 до 28,3%. Значения $\chi_{i, T_{max}}$ при работе дизеля на МТЭ снижаются от 0,85 при $p_e = 0,38$ МПа до 0,78 при $p_e = 0,70$ МПа, что выше ДП в этом же интервале с 11,8 до 23,8%. При работе дизеля на ЭТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается от 0,89 при $p_e = 0,38$ МПа до 0,63 при $p_e = 0,70$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне на 25,4 и 18,9% соответственно. Значения $\chi_{i, T_{max}}$ на ЭТЭ снижаются от 0,90 при $p_e = 0,38$ МПа до 0,74 при $p_e = 0,70$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне на 18,4 и 17,5% соответственно.

На рисунке 6.4, б представлены характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при частоте вращения 1700 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 23^\circ$ на различных нагрузочных режимах работы. Анализируя кривые $r_{NOx \max}$ и $c_{NOx \max}$ в цилиндре можно отметить, что при увеличении нагрузки происходит их рост. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа $r_{NOx \max}$ составляет 490 ppm, $c_{NOx \max} = 0,71 \text{ г/м}^3$, максимальные же значения наблюдаются при $p_e = 0,64$ МПа и составляют $r_{NOx \max} = 1960 \text{ ppm}$ и $c_{NOx \max} = 2,82 \text{ г/м}^3$, а при достижении максимальной нагрузки при $p_e = 0,71$ МПа происходит некоторое снижение до значений $r_{NOx \max} = 1870 \text{ ppm}$ и $c_{NOx \max} = 2,69 \text{ г/м}^3$. Применение ПГ в значительной мере увеличивает значения $r_{NOx \max}$ и $c_{NOx \max}$ в цилиндре. Так, при работе по ГДП при $p_e = 0,13$ МПа

$r_{\text{NOx max}}=710$ ppm, $c_{\text{NOx max}}=1,02$ г/м³, что выше ДП на 44,9%. При максимальной нагрузке $r_{\text{NOx max}} = 2430$ ppm, $c_{\text{NOx max}}=3,50$ г/м³, что выше ДП на 30,0%. Применение же РОГ на ГД позволяет снизить значения объемного содержания $r_{\text{NOx max}}$ и массовой концентрации $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при $p_e = 0,13$ МПа и 40%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx max}} = 480$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 0,69$ г/м³, что ниже на 32,4% газодизельного и на 2,0% дизельного процессов. При 20%-ной степени РОГ и максимальной нагрузке $p_e = 0,69$ МПа и $r_{\text{NOx max}}=1700$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 2,45$ г/м³, что ниже на 30,6% ГДП и на 10,5% ДП. Применение МТЭ и ЭТЭ позволяет также значительно снизить объемное содержание $r_{\text{NOx max}}$ и массовую концентрацию $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при работе на МТЭ при $p_e = 0,26$ МПа $r_{\text{NOx max}} = 840$ ppm, $c_{\text{NOx max}}=1,21$ г/м³, что на 18,5% ниже ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа применение МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx max}}$ к 1310 ppm и $c_{\text{NOx max}}$ к 1,89 г/м³, что также на 30,0% ниже ДП. При работе на ЭТЭ при $p_e = 0,13$ МПа $r_{\text{NOx max}} = 530$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 0,76$ г/м³, что на 8,2% выше ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа применение МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx max}}$ к 1070 ppm и $c_{\text{NOx max}}$ к 1,54 г/м³, что также на 42,8% ниже ДП.

При работе по ДП угол, соответствующий максимальной температуре цикла $\varphi_{\text{T max}}$ при $p_e = 0,13$ МПа, равен 10,5°п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ снижается до 7,5°п.к.в. после в.м.т., или на 25,0%. Применение ПГ, РОГ, МТЭ и ЭТЭ вызывает увеличение значений $\varphi_{\text{T max}}$ (кроме работы на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа, там наблюдается незначительное снижение). Так, при работе на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ равен 10,0°п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ повышается до 10,5°п.к.в. после в.м.т., что меньше ДП при нагрузке, равной 0,13 МПа, на 4,8% и больше на 40,0% при $p_e = 0,71$ МПа. Применение РОГ еще более увеличивает значения $\varphi_{\text{T max}}$. Так, при работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ равен 12,0°п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,51$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ повышается до 16,0°п.к.в. после в.м.т., что выше ДП от 14,3 до 88,2%, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки. Применение МТЭ и ЭТЭ также вызывает рост угла, соответствующего максимальной температуре цикла

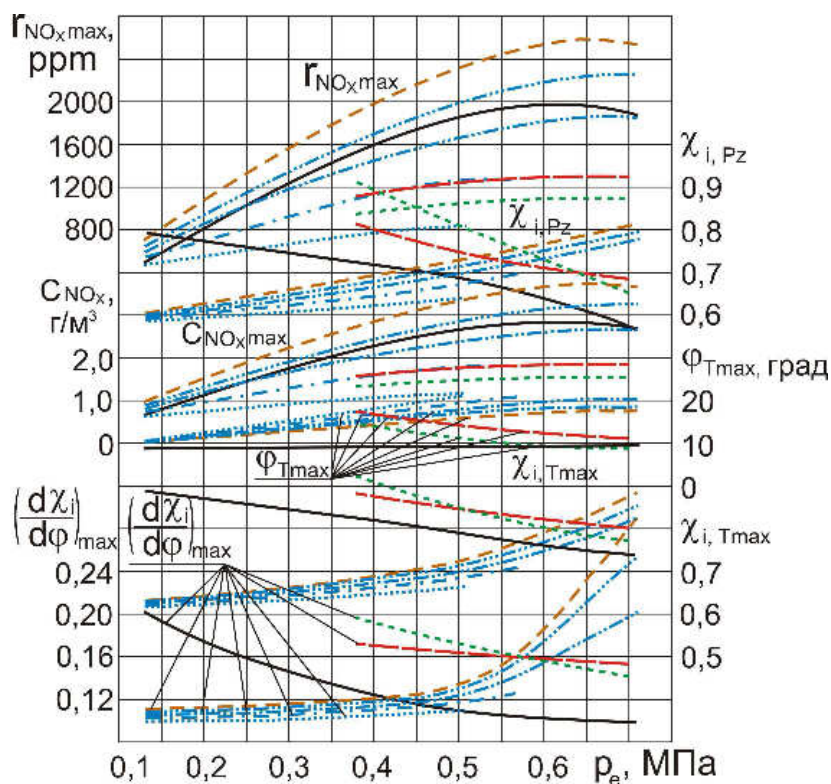
$\varphi_{T \max}$, но на малых нагрузках этот рост является более значительным. Применение МТЭ при максимальном значении $p_e = 0,71$ МПа приводит к значению $\varphi_{T \max}$ 8,0°п.к.в. после в.м.т., а при снижении нагрузки до $p_e = 0,26$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается уже до 16,0°п.к.в. после в.м.т., что, в свою очередь, выше ДП от 6,7 до 60%, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки. Применение ЭТЭ при максимальном значении $p_e = 0,71$ МПа приводит к значению $\varphi_{T \max}$ 7,0°п.к.в. после в.м.т., а при снижении нагрузки до $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается до 15,0°п.к.в. после в.м.т., что меньше ДП на 6,7% при нагрузке, равной 0,71 МПа и на 42,9% больше при $p_e = 0,13$ МПа.

При работе по ДП при увеличении нагрузки снижается максимум скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ от величины 0,197 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,098 при $p_e = 0,71$ МПа. Снижение составляет 50,3%. Применение ПГ вызывает увеличение $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ с ростом нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ равняется 0,094, а при максимальной нагрузке $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ повышается до 0,190, или в 2,0 раза. Применение РОГ не изменяет характер протекания кривых, и с увеличением нагрузки также происходит рост максимума скорости активного тепловыделения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа при работе с 40%-ной РОГ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,074, что на 21,3 ниже ГДП и в 2,7 раза ниже дизельного. При $p_e = 0,71$ МПа и РОГ 10% $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет уже 0,156, что на 17,9 ниже ГДП, но на 59,2% выше дизельного. В результате применения МТЭ и ЭТЭ с увеличением нагрузки происходит снижение максимума скорости активного тепловыделения. При работе на МТЭ при нагрузке, соответствующей 0,26 МПа, $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,240, что на 69,0% выше ДП. При нагрузке, равной 0,71 МПа, при работе на МТЭ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,158, что на 61,2% выше ДП. При $p_e = 0,13$ МПа при работе на ЭТЭ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,300, что на 52,3% выше ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа при работе на ЭТЭ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,156, что на 59,2% выше ДП.

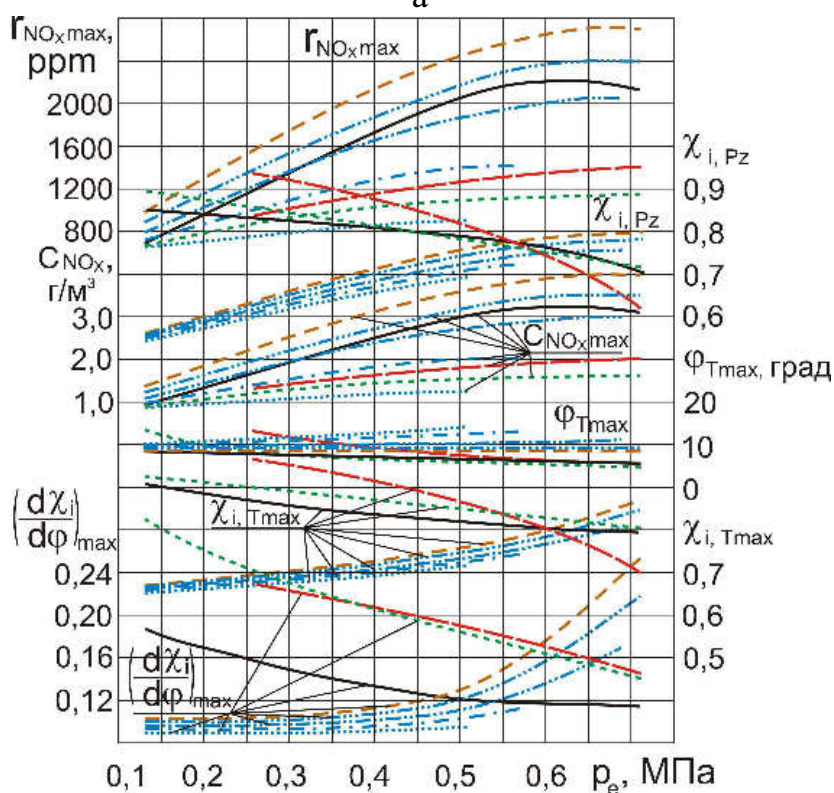
С увеличением нагрузки при работе на дизельном топливе, МТЭ и ЭТЭ снижаются значения активного выделения теплоты, соответствующие максимальному давлению сгорания $\chi_{i, Pz}$, и активного выделения теплоты,

соответствующие максимальной температуре цикла $\chi_{i, T_{\max}}$, а при работе на ПГ и ПГ с РОГ - повышаются. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,85 и 0,89, а увеличение нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа приводит к значениям $\chi_{i, Pz} = 0,65$ и $\chi_{i, T_{\max}} = 0,70$. Снижение составляет 23,5 и 27,1% соответственно для $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$. При работе на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,53 и 0,66, увеличение нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа приводит к росту значений $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ до 0,78 и 0,85, что при $p_e = 0,13$ МПа ниже ДП на 37,6 и 27,0%, а при $p_e = 0,71$ МПа выше дизельного на 20,0 и 21,4 для $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ соответственно. Применение на газодизеле РОГ приводит к некоторому снижению значений $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$. Так, при работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ составляют 0,51, а при увеличении нагрузки до 0,51 МПа увеличиваются до 0,63, что ниже ГДП на 3,8 и 11,3% соответственно. При работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,63, а при увеличении нагрузки до 0,51 МПа увеличиваются до 0,68, что ниже ГДП на 3,1 и 2,9% соответственно. При работе дизеля на МТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается от 0,91 при величине нагрузки, равной 0,26 МПа, до 0,59 при величине нагрузки, равной 0,71 МПа, что на 9,6% больше ДП при $p_e = 0,26$ МПа и на 9,2% меньше при $p_e = 0,71$ МПа. Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на МТЭ снижаются от 0,96 при $p_e = 0,26$ МПа до 0,69 при $p_e = 0,71$ МПа, что выше ДП на 15,7% при $p_e = 0,26$ МПа и ниже на 1,4% при $p_e = 0,71$ МПа. При работе дизеля на ЭТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается от 0,88 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,70 при $p_e = 0,71$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне на 3,5 и 7,7% соответственно. Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на ЭТЭ снижаются от 0,90 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,78 при $p_e = 0,71$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне на 1,1 и 11,4% соответственно.

На рисунке 6.5, а представлены характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при частоте вращения 2200 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ на различных нагрузочных режимах работы.



а



б

Рисунок 6.5 - Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения нагрузки при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$: а – $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$; ———— — ДП; - - - - - ГДП; - · - · - ГД с РОГ 10%; · · · · · - ГД с РОГ 20%; - · - · - ГД с РОГ 30%; · · · · · - ГД с РОГ 40%; · · · · · - ЭТЭ; - - - - - МТЭ

Анализируя кривые объемного содержания $r_{\text{NOx max}}$ и массовой концентрации $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре, можно отметить, что при увеличении нагрузки происходит их рост. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа $r_{\text{NOx max}}$ составляет 470 ppm, $c_{\text{NOx max}} = 0,68$ г/м³, максимальные же значения наблюдаются при $p_e = 0,64$ МПа и составляют $r_{\text{NOx max}} = 1980$ ppm и $c_{\text{NOx max}} = 2,85$ г/м³, а при достижении максимальной нагрузки при $p_e = 0,71$ МПа происходит некоторое снижение до значений $r_{\text{NOx max}} = 1910$ ppm и $c_{\text{NOx max}} = 2,75$ г/м³. Применение ПГ в значительной мере увеличивает значения $r_{\text{NOx max}}$ и $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при работе по ГДП при $p_e = 0,13$ МПа $r_{\text{NOx max}} = 700$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 1,01$ г/м³, что выше ДП на 48,9%. При максимальной нагрузке $r_{\text{NOx max}} = 2540$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 3,66$ г/м³, что выше ДП на 33,0%. Применение же РОГ на ГД позволяет снизить значения $r_{\text{NOx max}}$ и $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при $p_e = 0,13$ МПа и 40%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx max}} = 460$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 0,66$ г/м³, что ниже на 34,3% ГДП и на 2,1% ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа и 20%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx max}} = 1850$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 2,66$ г/м³, что ниже на 27,2% ГДП и на 3,1% ДП.

Применение МТЭ и ЭТЭ позволяет также значительно снизить объемное содержание $r_{\text{NOx max}}$ и массовую концентрацию $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при работе на МТЭ при $p_e = 0,38$ МПа $r_{\text{NOx max}} = 1010$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 1,45$ г/м³, что на 34,0% ниже ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа применение МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx max}}$ к 1320 ppm и $c_{\text{NOx max}}$ к 1,90 г/м³, что на 30,9% ниже ДП. На ЭТЭ при нагрузке, равной 0,38 МПа, $r_{\text{NOx max}} = 930$ ppm, $c_{\text{NOx max}} = 1,34$ г/м³, что на 39,2% ниже ДП. При работе по ДП угол, соответствующий максимальной температуре цикла $\varphi_{\text{T max}}$ при $p_e = 0,13$ МПа, равен 9,0°п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ повышается до 9,5°п.к.в. после в.м.т., или на 5,6%. Применение ПГ, РОГ, МТЭ и ЭТЭ вызывает увеличение значений $\varphi_{\text{T max}}$. Так, при работе на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ равен 10,0°п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $\varphi_{\text{T max}}$ повышается до 18,0°п.к.в. после в.м.т., что выше ДП от 11,1 до 89,5% соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки. Применение РОГ еще более увеличивает значения $\varphi_{\text{T max}}$. Так, при работе с 40%-ной РОГ

при $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{T \max}$ равен $10,5^\circ$ п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,51$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается до $21,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., что выше ДП от 16,7% до 2,2 раз, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки. Применение МТЭ и ЭТЭ также вызывает рост угла, соответствующего максимальной температуре цикла $\varphi_{T \max}$, но на малых нагрузках этот рост является более значительным. Применение МТЭ при максимальном значении $p_e = 0,70$ МПа приводит к значению $\varphi_{T \max}$ $11,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., а при снижении нагрузки до $p_e = 0,38$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается уже до $17,5^\circ$ п.к.в. после в.м.т., что, в свою очередь, выше ДП от 15,8 до 88,2%, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки. Применение ЭТЭ при максимальном значении приводит к значению $\varphi_{T \max}$ $9,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., а при снижении нагрузки до $p_e = 0,38$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается до $14,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., что на 5,3% меньше ДП при нагрузке, равной 0,70 МПа, и на 50,5% выше при $p_e = 0,38$ МПа.

При работе по ДП при увеличении нагрузки снижается максимум скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ от величины 0,202 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,098 при $p_e = 0,71$ МПа. Снижение составляет 2,1 раза. Применение ПГ вызывает увеличение $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ с ростом нагрузки. Так, при $p_e = 0,13$ МПа $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ равняется 0,110, а при максимальной нагрузке $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ повышается до 0,290, или в 2,6 раза. Применение РОГ не изменяет характер протекания кривых, и с увеличением нагрузки также происходит рост максимума скорости активного тепловыделения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа при работе с 40%-ной РОГ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,100, что на 9,1 ниже ГДП и в 2,0 раза ниже дизельного. При $p_e = 0,71$ МПа и РОГ 10% $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет уже 0,200, что на 69,0% ниже ГДП, но в 2,0 раза выше дизельного. В результате применения МТЭ и ЭТЭ с увеличением нагрузки происходит снижение максимума скорости активного тепловыделения. При работе на МТЭ при нагрузке, равной 0,38 МПа, $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,170, что на 32,8% выше ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,70$ МПа при работе на МТЭ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,154, что на 57,1% выше ДП. При $p_e = 0,38$ МПа при работе на ЭТЭ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,196, что на 53,1% выше ДП. При нагрузке, равной 0,70 МПа, при работе на ЭТЭ

$(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ составляет 0,146, что на 49,0% больше ДП.

С увеличением нагрузки при работе на дизельном топливе, МТЭ и ЭТЭ снижаются значения активного выделения теплоты, соответствующие максимальному давлению сгорания $\chi_{i, Pz}$, и активного выделения теплоты, соответствующие максимальной температуре цикла $\chi_{i, T_{\max}}$, а при работе на ПГ и ПГ с РОГ - повышаются. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,79 и 0,89, а увеличение нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа приводит к значениям $\chi_{i, Pz} = 0,57$ и $\chi_{i, T_{\max}} = 0,73$. Снижение составляет 27,9 и 18,0%, соответственно, для $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$. При работе на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,61 и 0,64, увеличение нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа приводит к росту значений $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ до 0,81 и 0,89, что при $p_e = 0,13$ МПа ниже ДП на 22,8 и 28,1%, а при $p_e = 0,71$ МПа выше дизельного на 42,1 и 21,9 для $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ соответственно. Применение на газодизеле РОГ приводит к некоторому снижению значений $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$. Так, при работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ составляют 0,58, а при увеличении нагрузки до 0,51 МПа увеличиваются до 0,63, что ниже ГДП на 4,9 и 13,7% соответственно. При работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,61, а при увеличении нагрузки до 0,51 МПа увеличиваются до 0,66, что ниже ГДП на 4,7 и 9,6% соответственно. При работе дизеля на МТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается от 0,82 при $p_e = 0,38$ МПа до 0,69 при $p_e = 0,70$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне от 13,9 до 21,1%. Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на МТЭ снижаются от 0,88 при $p_e = 0,38$ МПа до 0,80 при $p_e = 0,70$ МПа, что больше ДП в этом же интервале с 7,3 до 9,6%. При работе дизеля на ЭТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается от 0,91 при $p_e = 0,38$ МПа до 0,65 при $p_e = 0,70$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне на 26,4 и 14,0% соответственно. Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на ЭТЭ снижаются от 0,92 при $p_e = 0,38$ МПа до 0,77 при $p_e = 0,70$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне на 12,2 и 5,5% соответственно.

На рисунке 6.5, б представлены характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при частоте

вращения 1700 мин^{-1} и установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ на различных нагрузочных режимах работы.

Анализируя кривые объемного содержания $r_{\text{NOx max}}$ и массовой концентрации $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре можно отметить, что при увеличении нагрузки происходит их рост. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx max}}$ составляет 680 ppm, $c_{\text{NOx max}} = 0,98 \text{ г/м}^3$, максимальные же значения наблюдаются при $p_e = 0,64 \text{ МПа}$ и составляют $r_{\text{NOx max}} = 2220 \text{ ppm}$ и $c_{\text{NOx max}} = 3,20 \text{ г/м}^3$, а при достижении максимальной нагрузки при $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ происходит некоторое снижение до значений $r_{\text{NOx max}} = 2120 \text{ ppm}$ и $c_{\text{NOx max}} = 3,05 \text{ г/м}^3$. Применение ПГ в значительной мере увеличивает значения объемного содержания $r_{\text{NOx max}}$ и массовой концентрации $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при работе по ГДП при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx max}} = 960 \text{ ppm}$, $c_{\text{NOx max}} = 1,38 \text{ г/м}^3$, что выше ДП на 41,2%. При максимальной нагрузке $r_{\text{NOx max}} = 2740 \text{ ppm}$, $c_{\text{NOx max}} = 3,95 \text{ г/м}^3$, что выше ДП на 76,4%. Применение же РОГ на газодизеле позволяет снизить значения объемного содержания $r_{\text{NOx max}}$ и массовой концентрации $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ и 40%-ной степени РОГ $r_{\text{NOx max}} = 630 \text{ ppm}$, $c_{\text{NOx max}} = 0,91 \text{ г/м}^3$, что ниже на 34,4% газодизельного и на 7,4% дизельного процессов. При 20%-ной степени РОГ и максимальной нагрузке $p_e = 0,69 \text{ МПа}$ и $r_{\text{NOx max}} = 2040 \text{ ppm}$, $c_{\text{NOx max}} = 2,94 \text{ г/м}^3$, что ниже на 25,8% газодизельного и на 5,6% дизельного процессов. Применение МТЭ и ЭТЭ позволяет также значительно снизить объемное содержание $r_{\text{NOx max}}$ и массовую концентрацию $c_{\text{NOx max}}$ в цилиндре. Так, при работе на МТЭ при $p_e = 0,26 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx max}} = 940 \text{ ppm}$, $c_{\text{NOx max}} = 1,35 \text{ г/м}^3$, что на 20,3% ниже ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ применение МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx max}}$ к 1420 ppm и $c_{\text{NOx max}}$ к $2,05 \text{ г/м}^3$, что на 33,0% ниже ДП. При работе на ЭТЭ при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$ $r_{\text{NOx max}} = 660 \text{ ppm}$, $c_{\text{NOx max}} = 0,95 \text{ г/м}^3$, что на 2,9% выше ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71 \text{ МПа}$ применение МТЭ приводит значения $r_{\text{NOx max}}$ к 1170 ppm и $c_{\text{NOx max}}$ к $1,69 \text{ г/м}^3$, что также на 44,8% ниже ДП.

При работе по ДП угол, соответствующий максимальной температуре цикла $\varphi_{\text{T max}}$ при $p_e = 0,13 \text{ МПа}$, равен $8,5^\circ \text{ п.к.в.}$ после в.м.т., а при увеличении

нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $\varphi_{T \max}$ снижается до $6,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., или на 29,4%. Применение ПГ, РОГ, МТЭ и ЭТЭ вызывает увеличение значений $\varphi_{T \max}$ (кроме работы на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа, там значение $\varphi_{T \max}$ соответствует ДП). Так, при работе на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{T \max}$ равен $8,05^\circ$ п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,71$ МПа $\varphi_{T \max}$ незначительно снижается до $8,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., что соответствует ДП при $p_e = 0,13$ МПа и выше на 33,3% при $p_e = 0,71$ МПа. Применение РОГ еще более увеличивает значения $\varphi_{T \max}$. Так, при работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{T \max}$ равен $10,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., а при увеличении нагрузки до $p_e = 0,51$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается до $14,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., что выше ДП от 17,7% до 2,0 раз, соответственно, в этом же диапазоне изменения нагрузки. Применение МТЭ и ЭТЭ также вызывает рост угла, соответствующего максимальной температуре цикла $\varphi_{T \max}$, но на малых нагрузках этот рост является более значительным. Применение МТЭ при максимальном значении $p_e = 0,71$ МПа приводит к значению $\varphi_{T \max}$ $6,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., что соответствует значениям ДП, а при снижении нагрузки до $p_e = 0,26$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается уже до $13,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., что на 62,5% выше ДП. Применение ЭТЭ при максимальном значении $p_e = 0,71$ МПа приводит к значению $\varphi_{T \max}$ $5,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., а при снижении нагрузки до $p_e = 0,13$ МПа $\varphi_{T \max}$ повышается до $13,0^\circ$ п.к.в. после в.м.т., что меньше ДП на 16,7% при нагрузке, равной 0,71 МПа, и на 52,9% выше при $p_e = 0,13$ МПа.

При работе по ДП при увеличении нагрузки снижается максимум скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ от величины 0,188 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,108 при $p_e = 0,71$ МПа. Снижение составляет 42,6%. Применение ПГ вызывает увеличение $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ с ростом нагрузки. При нагрузке, равной 0,13 МПа, $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ соответствует 0,105, при максимальном p_e $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ повышается до 0,250, или в 2,4 раза. Применение РОГ не изменяет характер протекания кривых, и с увеличением нагрузки также происходит рост максимума скорости активного тепловыделения. Так, при $p_e = 0,13$ МПа при работе с 40%-ной РОГ $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 0,084, что на 20,0% ниже ГДП и в 2,2 раза ниже дизельного. При $p_e = 0,71$ МПа и РОГ 10% $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет уже 0,220, что на 12,0

ниже ГДП, но в 2,0 раза выше дизельного. В результате применения МТЭ и ЭТЭ с увеличением нагрузки происходит снижение максимума скорости активного тепловыделения. При работе на МТЭ при нагрузке, равной 0,26 МПа, $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ соответствует 0,230, что на 47,4% больше ДП. При нагрузке, равной 0,71 МПа, при работе на МТЭ $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ составляет 0,145, что на 34,3% выше ДП. При $p_e = 0,13$ МПа при работе на ЭТЭ $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ составляет 0,288, что на 53,2% выше ДП. При максимальной нагрузке $p_e = 0,71$ МПа при работе на ЭТЭ $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ составляет 0,140, что на 29,6% выше ДП.

С увеличением нагрузки при работе на дизельном топливе, МТЭ и ЭТЭ снижаются значения активного выделения теплоты, соответствующие максимальному давлению сгорания $\chi_{i, Pz}$, и активного выделения теплоты, соответствующие максимальной температуре цикла $\chi_{i, T_{\max}}$, а при работе на ПГ и ПГ с РОГ - повышаются. Так, при работе по ДП при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,86 и 0,91, а увеличение нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа приводит к значениям $\chi_{i, Pz} = 0,70$ и $\chi_{i, T_{\max}} = 0,79$. Снижение составляет 18,6 и 13,2%, соответственно, для $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$. При работе на ПГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,57 и 0,67, увеличение нагрузки до максимальной $p_e = 0,71$ МПа приводит к росту значений $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ до 0,80 и 0,86, что при $p_e = 0,13$ МПа ниже ДП на 33,7 и 26,4%, а при $p_e = 0,71$ МПа выше дизельного на 14,3 и 8,9 для $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$ соответственно. Применение на газодизеле РОГ приводит к некоторому снижению значений $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$. Так, при работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, Pz}$ составляют 0,54, а при увеличении нагрузки до 0,51 МПа увеличиваются до 0,69, что ниже ГДП на 5,3 и 9,2% соответственно. При работе с 40%-ной РОГ при $p_e = 0,13$ МПа значения $\chi_{i, T_{\max}}$ составляют 0,65, а при увеличении нагрузки до 0,51 МПа увеличиваются до 0,71, что ниже ГДП на 3,0 и 6,6% соответственно. При работе дизеля на МТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается от 0,93 при величине нагрузки, равной 0,26 МПа до 0,62 при величине нагрузки, равной 0,71 МПа, что больше ДП 12,1% ($p_e = 0,26$ МПа) и меньше на 11,4% ($p_e = 0,71$ МПа). Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на МТЭ снижаются от 0,97 при $p_e = 0,26$ МПа до 0,70 при $p_e = 0,71$ МПа, что выше ДП

на 11,5% при $p_e = 0,26$ МПа и ниже на 11,4% при $p_e = 0,71$ МПа. При работе дизеля на ЭТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается от 0,89 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,71 при $p_e = 0,71$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне на 3,5 и 1,4% соответственно. Значения $\chi_{i, T_{max}}$ на ЭТЭ снижаются от 0,92 при $p_e = 0,13$ МПа до 0,80 при $p_e = 0,71$ МПа, что выше ДП в этом же диапазоне на 1,1 и 1,3% соответственно.

6.4 Исследование тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ на скоростных режимах

На рисунке 6.6, а представлены характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при установившемся у.о.в.т. $\Theta_{впр} = 23^\circ$ в зависимости от изменения частоты вращения.

Из графиков видно, что максимальные объемное содержание $\Gamma_{NOx\ max}$ и массовая концентрация $c_{NOx\ max}$ в цилиндре уменьшаются с увеличением частоты вращения коленчатого вала. Так, при работе по ДП $\Gamma_{NOx\ max}$ уменьшается с 2020 ppm при $n=1400$ мин⁻¹ до 1680 ppm при $n=2400$ мин⁻¹, или на 16,8%. При работе по ГДП $\Gamma_{NOx\ max}$ снижается с 2610 ppm при $n=1400$ мин⁻¹ до 2180 ppm при $n=2400$ мин⁻¹, или на 16,5%. Сравнивая значения с ДП видно, что применение ПГ значительно увеличивает максимальные содержания $\Gamma_{NOx\ max}$ и $c_{NOx\ max}$ в ЦД. Применение же РОГ позволяет устранить в некоторой степени этот недостаток и снизить содержание NO_x . Так, применение 10%-ной РОГ в скоростном диапазоне от 1400 до 2400 мин⁻¹ приводит к снижению $\Gamma_{NOx\ max}$ от 10,7 до 12,8%, а применение 20%-ной РОГ в этом же диапазоне снижает $\Gamma_{NOx\ max}$ от 29,5 до 31,2%. При работе дизеля на МТЭ $\Gamma_{NOx\ max}$ снижается с 1390 ppm при $n=1400$ мин⁻¹ до 1100 ppm при $n=2400$ мин⁻¹, что ниже ДП в этом же диапазоне от 31,2 до 34,5%. При работе дизеля на ЭТЭ $\Gamma_{NOx\ max}$ снижается от 1220 ppm при $n=1400$ мин⁻¹ до 880 ppm при $n=2400$ мин⁻¹, что ниже ДП в этом же диапазоне от 39,6 до 47,6%. С увеличением частоты вращения также снижаются (кроме процесса при работе на МТЭ) значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{max}}$.

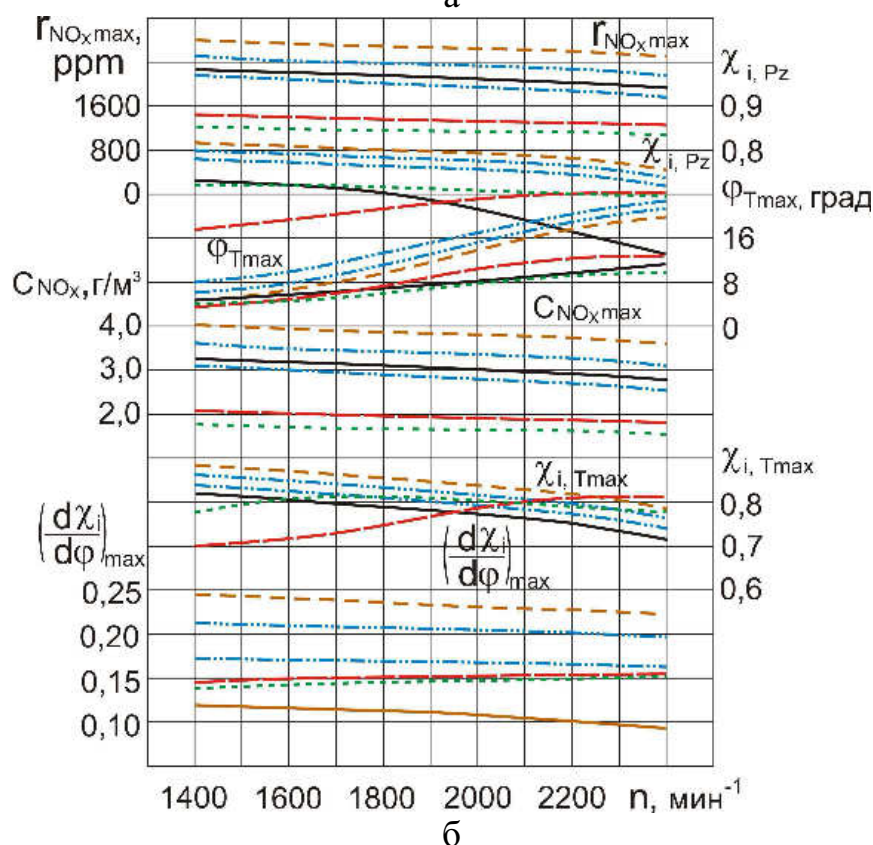
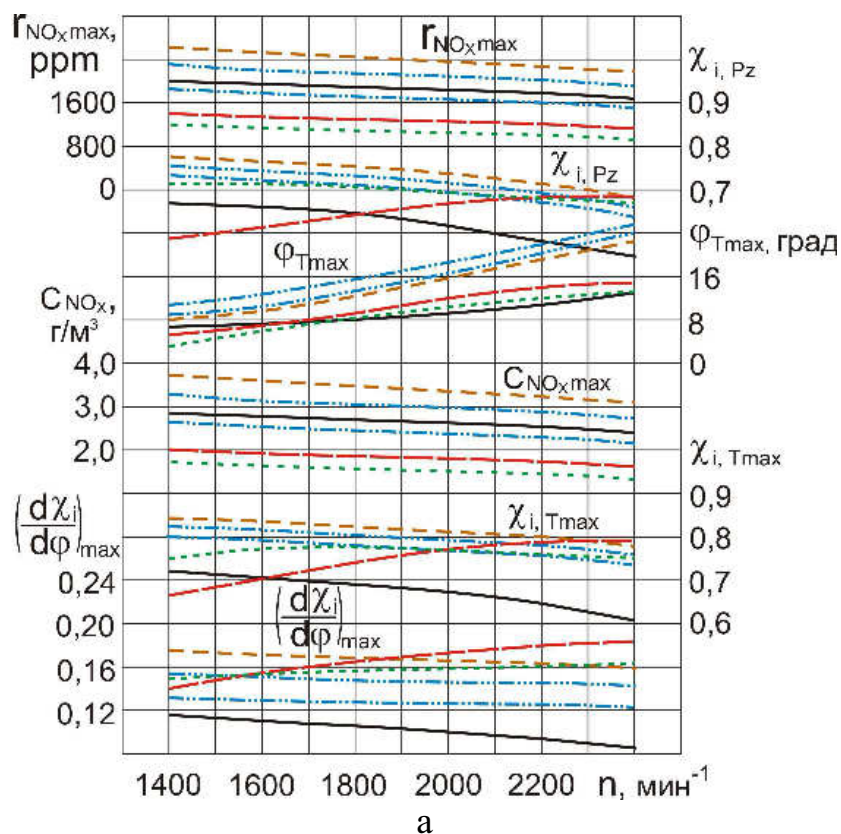


Рисунок 6.6 - Характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в зависимости от изменения частоты вращения: а – $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$; б – $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$; — ДП; - - - ГДП; ... ГД с РОГ 10%; - · - ГД с РОГ 20%; ... ЭТЭ; - · - МТЭ

Так, при работе по ДП $\chi_{i, Pz}$ снижается с 0,67 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,54 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 19,4%. Уменьшение при этом $\chi_{i, T_{\max}}$ составляет с 0,7 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,61 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 12,9%. При работе по ГДП $\chi_{i, Pz}$ уменьшается с 0,78 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,68 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что, в свою очередь, выше ДП от 16,4 до 25,9%. Снижение при этом $\chi_{i, T_{\max}}$ составляет от 0,84 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,78 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что также выше ДП от 16,7 до 27,9%. Применение РОГ позволяет несколько снизить значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$. Так, при работе по ГДП с 10%-ной РОГ в скоростном диапазоне от 1400 до 2400 мин^{-1} происходит снижение значений $\chi_{i, Pz}$ от 2,6 до 2,9%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $\chi_{i, Pz}$ от 6,4 до 7,4% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП. Снижение же $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе с 10%-ной РОГ в скоростном диапазоне от 1400 до 2400 мин^{-1} составляет от 2,4 до 2,6%, а применение 20%-ной РОГ снижает $\chi_{i, T_{\max}}$ от 4,8 до 6,4% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП. При работе дизеля на МТЭ $\chi_{i, Pz}$ возрастает от 0,59 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,69 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что на 11,9% ниже ДП при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и на 27,8% выше при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$.

Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на МТЭ возрастают от 0,66 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,79 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что на 8,3% ниже ДП при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и на 29,5% выше при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. При работе дизеля на ЭТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается с 0,71 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,67 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что выше ДП в этом же диапазоне от 6,0 до 24,1%. Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на ЭТЭ возрастают от 0,74 (значение на 2,8% выше ДП) при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,78 при $n=1700 \text{ мин}^{-1}$ и далее происходит снижение и при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ $\chi_{i, T_{\max}}=0,75$ (значение на 23,0% выше ДП). С увеличением частоты вращения коленчатого вала растут значения угла при максимальной температуре цикла $\varphi_{T_{\max}}$. Так, при работе по ДП $\varphi_{T_{\max}}$ увеличивается от $6,5^\circ$ при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до $13,0^\circ$ при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или ровно в 2,0 раза. С ростом частоты вращения при работе на дизельном топливе, ПГ и ПГ с РОГ снижаются значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$, а применение МТЭ и ЭТЭ вызывает их увеличение. Так, при работе по ДП уменьшение значений $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 26,1%: с

0,115 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,085 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. Применение ПГ приводит к увеличению значений угла при максимальной температуре цикла $\varphi_{T \max}$ и скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$. Так, при работе по ГДП $\varphi_{T \max}$ растет от $8,0^\circ$ при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до $22,0^\circ$ при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что, в свою очередь, выше ДП от 23,1 до 69,2%. А значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляют 0,175 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и 0,160 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что также выше ДП от 52,2 до 88,2% соответственно. Применение РОГ приводит к еще большему увеличению значений $\varphi_{T \max}$, но зато снижает скорость активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$. Так, применение 10%-ной РОГ на газодизеле в скоростном диапазоне от 1400 до 2400 мин^{-1} приводит к увеличению значений $\varphi_{T \max}$ на 12,5 и 9,1%, а применение 20%-ной РОГ увеличивает уже $\varphi_{T \max}$ на 37,5 и 15,9%, соответственно, в этом же диапазоне частот вращения по отношению к чисто ГДП. Оценивая же значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ при работе по ГДП с РОГ в этом же диапазоне изменения частот вращения с 1400 до 2400 мин^{-1} , можно отметить, что применение 10%-ной РОГ приводит уже к снижению значений $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ на 12,0 и 9,4%, а применение 20%-ной РОГ снижает $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ на 25,7 и 21,9%, соответственно, в этом же диапазоне частот вращения по отношению к чисто ГДП.

При повышении частоты вращения с 1400 до 2400 мин^{-1} (рассматриваем работу на МТЭ) $\varphi_{T \max}$ растет с $5,0$ до $15,0^\circ$, что на 23,1% ниже ДП при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и выше на 1,4% при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. С увеличением частоты вращения при работе на МТЭ происходит и рост значений скорости активного выделения тепла $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$. Так, применение в дизеле МТЭ приводит к росту значений $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ от 0,140 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,185 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что, в свою очередь, выше ДП в этом же интервале от 21,7% до 2,2 раз. При работе дизеля на ЭТЭ $\varphi_{T \max}$ увеличивается с $3,0^\circ$ при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до $13,0^\circ$ при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что ниже ДП в 2,2 раза при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и соответствует ДП при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. С увеличением частоты вращения при работе на ЭТЭ происходит также рост значений скорости активного выделения тепла $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$. Так, применение в дизеле ЭТЭ приводит к увеличению значений $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ от 0,150 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$

до 0,165 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что, в свою очередь, выше ДП в этом же диапазоне от 30,4 до 94,1%.

На рисунке 6.6, б представлены характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации NO_x в ЦД 4Ч 11,0/12,5 при установочном у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ в зависимости от изменения частоты вращения.

Из графиков видно, что максимальные объемное содержание $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и массовая концентрация $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в цилиндре уменьшаются с увеличением частоты вращения коленчатого вала. Так, при работе по ДП $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ уменьшается с 2260 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 1910 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 15,5%. При работе по ГДП $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ снижается с 2820 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 2510 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 11,0%. Сравнивая значения с дизельным процессом видно, что применение ПГ значительно увеличивает максимальные содержания $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ и $c_{\text{NO}_x \text{ max}}$ в ЦД. Применение же РОГ позволяет устранить в некоторой степени этот недостаток и снизить содержание NO_x . Так, применение 10%-ной РОГ в скоростном диапазоне от 1400 до 2400 мин^{-1} приводит к снижению объемного содержания $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ от 10,6 до 14,7%, а применение 20%-ной РОГ в этом же диапазоне снижает $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ от 23,8 до 31,1%.

При работе дизеля на МТЭ $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ снижается с 1460 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 1260 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что ниже ДП в этом же диапазоне на 35,4 и 34,0% соответственно. При работе дизеля на ЭТЭ $r_{\text{NO}_x \text{ max}}$ снижается от 1260 ppm при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 1060 ppm при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что ниже ДП в этом же диапазоне от 44,3 до 44,5%. С увеличением частоты вращения также снижаются (кроме процесса при работе на МТЭ) значения активного выделения теплоты, соответствующие максимальному давлению сгорания $\chi_{i, Pz}$, и активного выделения теплоты, соответствующие максимальной температуре цикла $\chi_{i, T_{\text{max}}}$. Так, при работе по ДП $\chi_{i, Pz}$ снижается с 0,73 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,56 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 23,3%. Уменьшение при этом $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ составляет с 0,82 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,72 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или на 12,2%. При работе по ГДП $\chi_{i, Pz}$ уменьшается с 0,81 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,76 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что, в свою очередь, выше ДП от 11,0 до 35,7%. Снижение при этом $\chi_{i, T_{\text{max}}}$ составляет

от 0,88 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,79 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что также выше ДП от 7,3 до 9,7%. Применение РОГ позволяет несколько снизить значения $\chi_{i, Pz}$ и $\chi_{i, T_{\max}}$. Так, при работе по ГДП с 10%-ной РОГ в диапазоне изменения частоты вращения от 1400 до 2400 мин^{-1} происходит снижение значений $\chi_{i, Pz}$ от 1,2 до 2,6%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $\chi_{i, Pz}$ от 3,7 до 5,3% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП. Снижение же $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе с 10%-ной РОГ в скоростном диапазоне от 1400 до 2400 мин^{-1} составляет от 2,3 до 3,8%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $\chi_{i, T_{\max}}$ от 4,6 до 6,3% в этом же диапазоне по отношению к чисто ГДП. При работе дизеля на МТЭ $\chi_{i, Pz}$ возрастает от 0,62 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,70 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что на 15,1% ниже ДП при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и на 25,0% выше при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на МТЭ возрастают от 0,70 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,82 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что на 14,6% ниже ДП при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и на 13,9% выше при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. При работе дизеля на ЭТЭ $\chi_{i, Pz}$ снижается с 0,72 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,69 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что на 1,4% ниже дизельного процесса при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и на 23,2% выше при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. Значения $\chi_{i, T_{\max}}$ при работе дизеля на ЭТЭ возрастают от 0,78 (значение на 4,9% ниже ДП) при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,81 при $n=1700 \text{ мин}^{-1}$ и далее происходит снижение и при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ $\chi_{i, T_{\max}} = 0,78$ (значение на 8,3% выше ДП).

С увеличением частоты вращения коленчатого вала растут значения угла при максимальной температуре цикла $\varphi_{T_{\max}}$. Так, при работе по ДП $\varphi_{T_{\max}}$ увеличивается от $5,0^\circ$ при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до $11,0^\circ$ при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, или в 2,2 раза. С ростом частоты вращения при работе на дизельном топливе, КПП и КПП с РОГ снижаются значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$, а применение МТЭ и ЭТЭ вызывает их увеличение. Так, при работе по ДП уменьшение значений $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$ составляет 21,7%: с 0,120 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,094 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. Применение ПГ приводит к увеличению значений угла при максимальной температуре цикла $\varphi_{T_{\max}}$ и скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\varphi)_{\max}$. Так, при работе по ГДП $\varphi_{T_{\max}}$ растет от $5,0^\circ$ при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до $19,0^\circ$ при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что соответствует значениям ДП при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и на

72,7% выше при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. А значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ составляют 0,244 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и 0,222 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что также выше ДП от 2,0 до 2,4 раз соответственно. Применение РОГ приводит к еще большему увеличению значений $\phi_{T \max}$, но зато снижает скорость активного тепловыделения $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$. Так, применение 10%-ной РОГ на газодизеле в скоростном диапазоне от 1400 до 2400 мин^{-1} приводит к увеличению значений $\phi_{T \max}$ на 30,0 и 10,5%, а применение 20%-ной РОГ увеличивает уже $\phi_{T \max}$ на 60,0 и 21,1%, соответственно, в этом же диапазоне частот вращения по отношению к чисто ГДП. Оценивая значения скорости активного тепловыделения $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ при работе по ГДП с РОГ в этом же диапазоне изменения частот вращения с 1400 до 2400 мин^{-1} можно отметить, что применение 10%-ной РОГ приводит к снижению значений $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ на 10,7 и 11,7%, а применение 20%-ной РОГ снижает уже $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ на 30,3 и 27,0%, соответственно, в этом же диапазоне частот вращения по отношению к чисто ГДП.

При повышении частоты вращения с 1400 до 2400 мин^{-1} (рассматриваем работу на МТЭ) $\phi_{T \max}$ растет с 3,5 до 12,5°, что на 30,0% ниже ДП при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и выше на 13,6% при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$. С увеличением частоты вращения при работе на МТЭ происходит и рост значений скорости активного выделения тепла $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$. Так, применение в дизеле МТЭ приводит к росту значений $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ от 0,145 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,156 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что, в свою очередь, выше ДП в этом же интервале от 20,8 до 66,0%. На ЭТЭ $\phi_{T \max}$ увеличивается с 4,0° при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 9,5° при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что ниже ДП на 20,0 и 13,6% в этом же скоростном диапазоне соответственно. С увеличением частоты вращения при работе на ЭТЭ происходит также рост значений скорости активного выделения тепла $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$. Так, применение в дизеле ЭТЭ приводит к увеличению значений $(d\chi_i/d\phi)_{\max}$ от 0,134 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ до 0,152 при $n=2400 \text{ мин}^{-1}$, что, в свою очередь, выше ДП в этом же диапазоне от 11,7 до 61,7%.

6.5 Основные результаты и выводы по шестой главе

В результате исследований тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ можно сделать следующие **выводы**:

1. Рассмотрены характеристики тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля на ПГ и СТЭ. Совместное рассмотрение этих кривых (кривые тепловыделения и кривые оксидов азота) дает более детальное представление о концентрации оксидов азота в ЦД и подтверждает суждения о влиянии динамики тепловыделения на выход NO_x .

2. На основании проведенных исследований тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота при работе дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ и СТЭ предложено значение оптимального установочного у.о.в.т. равное 23° . Это же значение рекомендовано и для дизельного процесса.

3. Установлены зависимости влияния режимов работы на показатели тепловыделения, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в ЦД 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ, ПГ с различными степенями РОГ, МТЭ и ЭТЭ.

4. На основании экспериментальных исследований проведены расчеты объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в ЦД при $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$.

При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$) получены следующие результаты: ДП - $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 1800 \text{ ppm}$; $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 2,59 \text{ г/м}^3$; ГДП - $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 2300 \text{ ppm}$ (увеличение на 27,8%); $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 3,31 \text{ г/м}^3$ (увеличение на 27,8%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 2000 \text{ ppm}$ (увеличение на 11,1%); $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 2,88 \text{ г/м}^3$ (увеличение на 11,2%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 1600 \text{ ppm}$ (снижение на 11,1%); $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 2,30 \text{ г/м}^3$ (снижение на 11,2%); МТЭ - $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 1200 \text{ ppm}$ (снижение на 33,3%); $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 1,73 \text{ г/м}^3$ (снижение на 33,2%); ЭТЭ - $r_{\text{NO}_x \text{ max}} = 950 \text{ ppm}$ (снижение на 47,2%); $c_{\text{NO}_x \text{ max}} = 1,37 \text{ г/м}^3$ (снижение на

47,1%).

При у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$): ДП - $r_{\text{NOx max}} = 1900 \text{ ppm}$; $c_{\text{NOx max}} = 2,74 \text{ г/м}^3$; ГДП - $r_{\text{NOx max}} = 2450 \text{ ppm}$ (увеличение на 29,0%); $c_{\text{NOx max}} = 3,53 \text{ г/м}^3$ (увеличение на 28,8%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx max}} = 2100 \text{ ppm}$ (увеличение на 10,5%); $c_{\text{NOx max}} = 3,0 \text{ г/м}^3$ (увеличение на 9,5%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx max}} = 1700 \text{ ppm}$ (снижение на 10,5%); $c_{\text{NOx max}} = 2,45 \text{ г/м}^3$ (снижение на 10,6%); МТЭ - $r_{\text{NOx max}} = 1300 \text{ ppm}$ (снижение на 31,6%); $c_{\text{NOx max}} = 1,87 \text{ г/м}^3$ (снижение на 31,8%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx max}} = 1060 \text{ ppm}$ (снижение на 44,2%); $c_{\text{NOx max}} = 1,53 \text{ г/м}^3$ (снижение на 44,2%).

5. На основании экспериментальных исследований проведены расчеты объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в ЦД при $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$.

При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$) получены следующие результаты: ДП - $r_{\text{NOx max}} = 1980 \text{ ppm}$; $c_{\text{NOx max}} = 2,85 \text{ г/м}^3$; ГДП - $r_{\text{NOx max}} = 2600 \text{ ppm}$ (увеличение на 31,3%); $c_{\text{NOx max}} = 3,74 \text{ г/м}^3$ (увеличение на 31,2%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx max}} = 2230 \text{ ppm}$ (увеличение на 12,6%); $c_{\text{NOx max}} = 3,21 \text{ г/м}^3$ (увеличение на 12,6%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx max}} = 1850 \text{ ppm}$ (снижение на 6,6%); $c_{\text{NOx max}} = 2,67 \text{ г/м}^3$ (снижение на 6,3%); МТЭ - $r_{\text{NOx max}} = 1300 \text{ ppm}$ (снижение на 34,3%); $c_{\text{NOx max}} = 1,87 \text{ г/м}^3$ (снижение на 34,4%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx max}} = 1100 \text{ ppm}$ (снижение на 44,5%); $c_{\text{NOx max}} = 1,58 \text{ г/м}^3$ (снижение на 44,6%).

При у.о.в.т. $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$): ДП - $r_{\text{NOx max}} = 2160 \text{ ppm}$; $c_{\text{NOx max}} = 3,11 \text{ г/м}^3$; ГДП - $r_{\text{NOx max}} = 2750 \text{ ppm}$ (увеличение на 27,3%); $c_{\text{NOx max}} = 3,96 \text{ г/м}^3$ (увеличение на 27,3%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx max}} = 2400 \text{ ppm}$ (увеличение на 11,1%); $c_{\text{NOx max}} = 3,46 \text{ г/м}^3$ (увеличение на 11,3%); ГДП с

РОГ 20% - $r_{\text{NOx max}} = 2040$ ppm (снижение на 5,6%); $c_{\text{NOx max}} = 2,94$ г/м³ (снижение на 5,5%); МТЭ - $r_{\text{NOx max}} = 1400$ ppm (снижение на 35,2%); $c_{\text{NOx max}} = 2,02$ г/м³ (снижение на 35,1%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx max}} = 1150$ ppm (снижение на 46,8%); $c_{\text{NOx max}} = 1,66$ г/м³ (снижение на 46,6%).

6. На основании экспериментальных исследований проведены расчеты объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота в ЦД при угле п.к.в., соответствующем открытию выпускного клапана.

При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200$ мин⁻¹, $p_e = 0,64$ МПа) получены следующие результаты (для сравнения с опытными и теоретическими данными представлено только объемное содержание): ДП - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1200$ ppm; ГДП - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1580$ ppm (увеличение на 31,7%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1200$ ppm (соответствует ДП); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 810$ ppm (снижение на 32,5%); МТЭ - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 840$ ppm (снижение на 30,0%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 710$ ppm (снижение на 40,8%).

При $\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700$ мин⁻¹, $p_e = 0,69$ МПа): ДП - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1400$ ppm; ГДП - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1730$ ppm (увеличение на 23,6%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1400$ ppm (соответствует ДП); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 990$ ppm (снижение на 29,3%); МТЭ - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 910$ ppm (снижение на 35,0%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 780$ ppm (снижение на 44,3%).

При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и номинальном режиме ($n = 2200$ мин⁻¹, $p_e = 0,64$ МПа) получены следующие результаты (для сравнения с опытными и теоретическими данными представлено только объемное содержание): ДП - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1450$ ppm; ГДП - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1820$ ppm (увеличение на 25,5%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 1440$ ppm (снижение на 0,7%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 990$ ppm (снижение на 31,7%); МТЭ - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 930$ ppm (снижение на 35,9%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx, } \phi_b} = 800$ ppm (снижение на 44,8%).

При $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$ и режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$): ДП - $r_{\text{NOx}, \phi_b} = 1530 \text{ ppm}$; ГДП - $r_{\text{NOx}, \phi_b} = 1920 \text{ ppm}$ (увеличение на 20,3%); ГДП с РОГ 10% - $r_{\text{NOx}, \phi_b} = 1570 \text{ ppm}$ (увеличение на 2,6%); ГДП с РОГ 20% - $r_{\text{NOx}, \phi_b} = 1210 \text{ ppm}$ (снижение на 20,9%); МТЭ - $r_{\text{NOx}, \phi_b} = 1080 \text{ ppm}$ (снижение на 29,4%); ЭТЭ - $r_{\text{NOx}, \phi_b} = 910 \text{ ppm}$ (снижение на 40,5%).

Анализируя приведенные в пунктах 5 и 6 данных выводов результаты, необходимо отметить, что разница между расчетными и экспериментальными данными объемного содержания оксидов азота составляет в среднем менее 10%. Эта разница может свидетельствовать о дальнейшем разложении оксидов азота после открытия выпускного клапана при движении ОГ по системе выпуска дизеля до экспериментальной точки замера токсичности газоанализатором.

7 ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТОКСИЧНОСТИ И ДЫМНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И СПИРТО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ, В УСЛОВИЯХ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

7.1 Нормирование выбросов токсичности и дымности ОГ дизелей

Одним из основных направлений технического уровня ДВС в последние десятилетия является снижение выбросов вредных веществ с ОГ. Снижение выбросов вредных веществ с ОГ осуществляется введением законодательных ограничений и внедрением мероприятий, обеспечивающих эти ограничения. Нормирование токсичных выбросов ДВС производится как с позиций эффективности защиты окружающей среды, так и с учетом состояния экономики страны, уровня ее промышленного развития, условий организации эксплуатации и технического обслуживания. Законодательные ограничения на регламентируемые вредные вещества устанавливаются нормативной документацией (национальными и международными стандартами), в которых также приводятся требования и положения, относящиеся к условиям проведения испытаний, области применения и сроку действия стандарта, средствам измерений, правилам обработки результатов испытаний и характеристике применяемого топлива. Учитывая область применения исследуемого дизеля 4Ч 11,0/12,5 рассмотрим особенности нормативной документации, предназначенной для дизелей тракторов и сельскохозяйственных машин ограничиваясь стандартами, действующими в РФ, и разработанными Правилами ЕЭК ООН [114, 118, 119].

К нормируемым токсичным компонентам дизелей тракторов и сельскохозяйственных машин в соответствии с действующей в РФ документацией, относятся NO_x , CH_x и СО. Кроме этих компонентов Правила ЕЭК ООН регламентируют выбросы твердых частиц (ТЧ). Нормы токсичных компонентов устанавливаются в удельных значениях массового выброса каждого вредного вещества за

цикл испытаний, отнесенного к приведенной мощности в единицу времени. Измерение концентрации газообразных вредных веществ в ОГ, согласно нормативной документации [119], проводят с помощью быстродействующих газоанализаторов непрерывного действия (оксидов азота – газоанализатором хемиллюминесцентного типа, суммарных углеводородов – пламенно-ионизационного типа, оксида углерода – недисперсного типа с поглощением в инфракрасной части спектра). Масса ТЧ определяется на каждом режиме или за цикл испытаний в полнопоточных или неполнопоточных туннелях с последующим взвешиванием специальных фильтров.

В соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 [119] значения удельных выбросов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин не должны быть более норм, приведенных в таблицах 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1 - Нормы удельных выбросов вновь изготовленных и капитально отремонтированных на ремонтных заводах дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 [119]

Наименование вредных веществ	Удельные выбросы, г/(кВт·ч), при воздухообмене	
	неограниченном	ограниченном
NO _x	18,0	9,0
CH _x	3,0	1,5
CO	10,0	4,0

Таблица 7.2 - Нормы удельных выбросов находящихся в эксплуатации тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 [119]

Наименование вредных веществ	Удельные выбросы, г/(кВт·ч), при воздухообмене	
	неограниченном	ограниченном
NO _x	18,0	9,0
CH _x	4,5	2,2
CO	14,0	5,6

В РФ для дизелей сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов, техники, предназначенной и пригодной для передвижения или перемещения по

грунту, будь то по дороге или бездорожью, с установленной полезной мощностью более 18 кВт, но не более 560 кВт, эксплуатируемой в разных скоростных режимах, строительной техники, самоходных сельскохозяйственных машин и дорожно ремонтной техники действуют Правила ЕЭК ООН №96 [118], представленные в таблицах 7.3 и 7.4.

Таблица 7.3 - Нормы удельных выбросов вредных веществ с ОГ серийно выпускаемых дизелей, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторах и другой внедорожной технике, поставленных на производство до введения в действие в РФ Правил ЕЭК ООН №96, 1 марта 2013 г. [118]

Диапазон мощности	Полезная мощность, кВт	CO	CH _x	NO _x	ТЧ
		г/(кВт·ч)			
Е	$130 \leq N_e < 560$	3,5	1,0	6,0	0,2
Ф	$75 \leq N_e < 130$	5,0			1,3
Г	$37 \leq N_e < 75$		5,5	1,5	
Д	$18 \leq N_e < 37$				

Таблица 7.4 - Нормы удельных выбросов вредных веществ с ОГ для всех проектируемых и модернизируемых дизелей, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторах и другой внедорожной технике, начиная с даты введения в действие в РФ Правил ЕЭК ООН №96 [118]

Диапазон мощности	Полезная мощность, кВт	CO	CH _x + NO _x	ТЧ
		г/(кВт·ч)		
Н	$130 \leq N_e < 560$	3,5	4,0	0,2
И	$75 \leq N_e < 130$	5,0		4,7
Ж	$37 \leq N_e < 75$		5,5	
К	$19 \leq N_e < 37$			

Действующие в настоящее время на территории РФ нормы для дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин [119], для дизелей сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и внедорожной техники [118],

регулирующие ограничения удельных выбросов исследуемого нами дизеля 4Ч 11,0/12,5, для сравнения представлены на рисунке 7.1 в виде гистограммы.

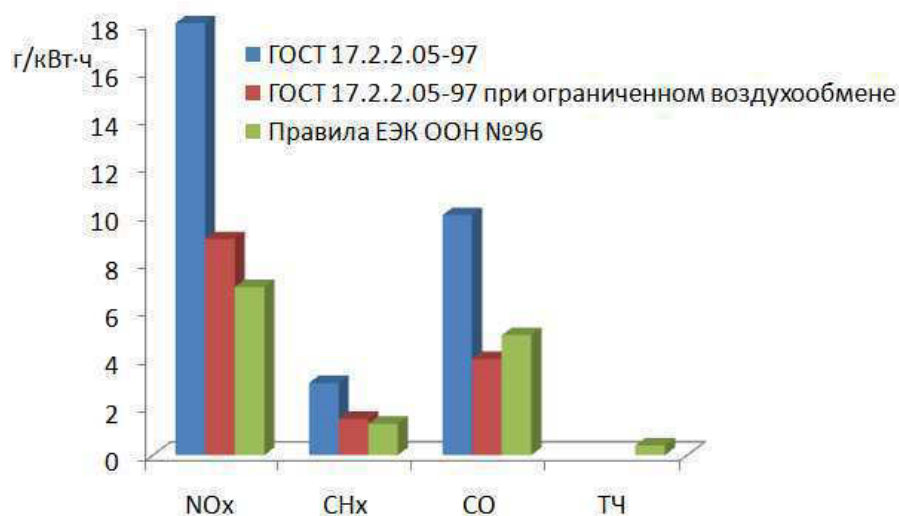


Рисунок 7.1 – Гистограмма сравнения действующих в РФ норм удельных выбросов вредных веществ для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин, сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и внедорожной техники

Таблица 7.5 – Значения норм дымности ОГ дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин на установившихся режимах в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98 [120]

Условный расход воздуха, дм ³ /с	Дымность, м ⁻¹ (%), не более, при воздухообмене	
	неограниченном	ограниченном
42 и менее	2,260(62,2)	1,760(53,1)
50	2,080 (59,1)	1,580 (49,3)
60	1,900 (55,8)	1,400 (45,2)
70	1,775 (53,4)	1,275 (42,2)
80	1,665 (51,1)	1,165 (39,4)
90	1,575 (49,2)	1,075 (37,0)
100	1,495 (47,4)	0,995(34,8)
125	1,345 (43,9)	0,845 (30,5)
150	1,225 (40,9)	0,725(26,8)
175	1,140 (38,7)	0,640 (24,1)
200 и более	1,065(36,7)	0,565(21,6)

Анализируя представленные данные на рисунке 7.1. хорошо видно, что более «мягкие» требования к удельным выбросам дизелей, указанного назначения,

предъявляются требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97, причем согласно этому ГОСТ не нормируется выбросы ТЧ. При ограниченном же воздухообмене нормативные требования по выбросу вредных веществ по указанному ГОСТ уже более приближены к нормам Правил ЕЭК ООН №96, если не брать в расчет выбросы ТЧ, которые при ограниченном воздухообмене также не нормируются.

Не следует забывать, что кроме таких вредных выбросов как NO_x , CH_x , CO и ТЧ у дизеля регламентируется и дымность ОГ. Нормы дымности ОГ дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин устанавливаются в зависимости от условного расхода воздуха G_v , $\text{дм}^3/\text{с}$, и приведены в ГОСТ 17.2.2.02-98 [120]. В соответствии с требованием стандарта значения дымности на установившихся режимах вновь изготовленных и капитально отремонтированных на ремонтных заводах дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин не должны быть более норм, приведенных в таблице 7.5.

7.2 Расчет интегральной токсичности ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, на режимах испытательных циклов

В настоящее время большинство способов оценки содержания вредных веществ в ОГ дизелей различаются программами исследований, моделирующих наиболее весомые режимы работы дизеля трактора или автотранспортного средства в обычных условиях его эксплуатации. А для оценки их токсичности используют такие различающиеся между собой методы как исследование при установившихся режимах работы, обеспечивающих постоянство показателей работы дизеля, и исследование его при изменяющихся параметрах на переходных режимах.

Дизели тракторов, самоходных сельскохозяйственных машин и другой внедорожной техники при оценке выбросов вредных веществ испытываются на стенде, оборудованном нагружающим устройством и средствами измерений для контроля испытаний и сбора данных, необходимых для обработки результатов

испытаний. Выбросы определяют при последовательной работе дизеля на установившихся режимах. Каждому режиму соответствует свой коэффициент весоности, который характеризует вклад данного режима в загрязнение окружающей среды при эксплуатации дизеля.

На рисунке 7.2 показаны режимы испытаний дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 [119].

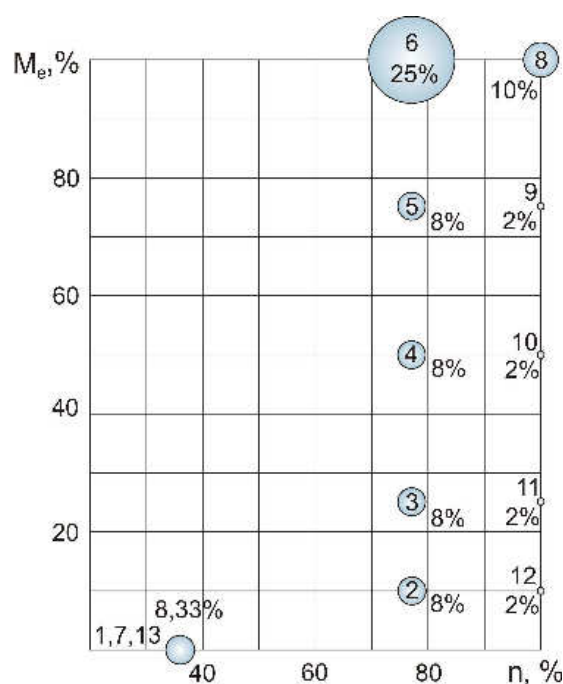


Рисунок 7.2 - Режимы испытаний дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ и соответствующие им коэффициенты весоности в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 [119]: 1-13 – режимы испытаний

Испытательный цикл в большей степени учитывает реальные условия эксплуатации дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. Цикл включает десять режимов работы дизеля с нагрузкой и три режима холостого хода при минимально-устойчивой частоте вращения коленчатого вала. С нагрузкой дизель испытывается при пяти уровнях крутящего момента и при двух уровнях частоты вращения коленчатого вала.

Испытания дизеля проводились с соблюдением последовательности всех 13 режимов в соответствии с их номерами, указанными в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Исследуемые режимы испытаний дизеля 4Ч 11,0/12,5
в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 [119]

Номер режима	n , мин ⁻¹	Крутящий момент, %	Коэффициент весомости	Продолжительность режима, мин
1	800	0	0,0833	4
2	1700	10	0,0800	
3	1700	25	0,0800	
4	1700	50	0,0800	
5	1700	75	0,0800	
6	1700	100	0,2501	
7	800	0	0,0833	
8	2200	100	0,1000	
9	2200	75	0,0200	
10	2200	50	0,0200	
11	2200	25	0,0200	
12	2200	10	0,0200	
13	800	0	0,0833	

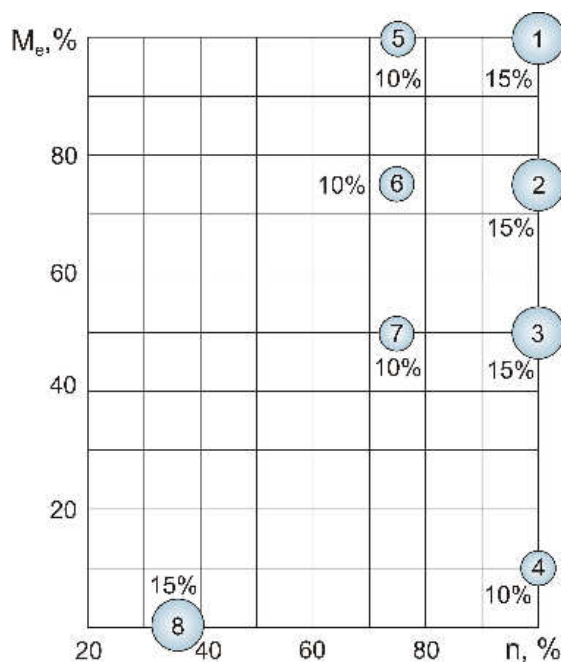


Рисунок 7.3 - Режимы испытаний дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ и соответствующие им коэффициенты весомости в соответствии со стандартом ISO-8174-4: 1-8 – режимы испытаний

В свою очередь для дизелей внедорожного транспорта, сельскохозяйственных и лесных тракторов, самоходных сельскохозяйственных машин, дорожно-строительных машин и др. промышленной техники Правилами ЕЭК ООН № 96

предусмотрены испытания по восьмьрежимному циклу, в котором режимы испытаний и коэффициенты весомости каждого режима устанавливаются в соответствии со стандартом ISO-8174-4 [114].

На рисунке 7.3 показаны режимы тракторного дизеля и соответствующие им коэффициенты весомости (в процентах) в соответствии со стандартом ISO-8174-4 [114].

Испытания дизеля проводились с соблюдением последовательности режимов в соответствии с их номерами, указанными в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Исследуемые режимы испытаний дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии со стандартом ISO-8174-4

Номер режима	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота вращения, мин ⁻¹	2200				1650			800
Крутящий момент, %	100	75	50	10	100	75	50	0
Весовой коэффициент	0,15	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,15

Для воспроизведения всех режимов испытуемый дизель 4Ч 11,0/12,5 устанавливался на электротормозной стенд SAK – N670 с балансирной маятниковой машиной (рисунок 3.3). Испытания дизеля проводились с соблюдением последовательности режимов в соответствии с их номерами, указанными в таблицах 7.6 и 7.7. В каждом режиме двигатель работал предписанное время, завершая изменение частоты вращения и нагрузки в течение первых 20 с. Показания газового анализа и дымности ОГ регистрировались в каждом испытательном цикле с помощью автоматической системы газового анализа АСГА-Т (рисунок 3.9) и дымомера BOSCH – EFAW – 68А (рисунок 3.10, б). В процессе выполнения каждого режима записывалась частота вращения двигателя и нагрузка, температура воздуха и разрежение на впуске, температура ОГ, расход топлива и расход воздуха, температура воздушного заряда, температура топлива и влажность.

Массовые расходы выбросов вредных веществ NO_x, CH_x и СО для каждого режима рассчитывали по формулам, г/ч:

$$G_{NO_x} = 0,001587 NO_x \cdot F_{NO_x} (G_T + G_B), \quad (7.1)$$

$$G_{\text{CH}_x} = 0,000479 \text{CH}_x (G_T + G_B), \quad (7.2)$$

$$G_{\text{CO}} = 0,000966 \text{CO} \cdot F_{\text{CO}} (G_T + G_B), \quad (7.3)$$

где NO_x , CH_x и CO – измеренные концентрации веществ, ppm; F_{NO_x} , F_{CO} – поправочные коэффициенты, характеризующие корректировку NO_x и CO с учетом температуры и влажности окружающего воздуха, так как выбросы NO_x и CO зависят от наружных атмосферных условий, вычисляемые по формулам:

$$F_{\text{NO}_x} = \left[1 + \left(\frac{0,044G_T}{G_B} - 0,0038 \right) (7H_a - 75) + \left(0,0053 - \frac{0,116G_T}{G_B} \right) 1,8(T_{\text{окр}} - 302) \right]^{-1}, \quad (7.4)$$

$$F_{\text{CO}} = 1 - 1,83 \frac{G_T}{G_B}, \quad (7.5)$$

где H_a – абсолютная влажность воздуха на впуске, определяемая по выражению

$$H_a = \frac{6,22 \cdot R_a \cdot p_a}{p_b - p_a \cdot R_a \cdot 10^{-2}}, \quad (7.6)$$

где R_a – относительная влажность воздуха на впуске, %; p_a – давление насыщенных паров воздуха на впуске, кПа; p_b – общее барометрическое давление, кПа.

Поскольку газовый анализ ОГ дизеля определяли с помощью автоматической системы АСГА-Т, которая измеряет также и концентрацию CO_2 , то для расчета массового расхода твердых частиц для каждого режима использовали метод углеродного баланса [115], г/ч:

$$c_{\text{ТЧ}} = \frac{M_f \cdot G_{\text{edfw}}}{M_s \cdot 1000}, \quad (7.7)$$

где M_f – уловленная масса пробы твердых частиц, г; M_s – масса пробы разбавленных ОГ, прошедших через фильтр для отбора вредных частиц, г; G_{edfw} – эквивалентный массовый расход разбавленных ОГ во влажном состоянии, определяемый по выражению, кг/ч

$$G_{\text{edfw}} = G_{\text{exhw}} \cdot q, \quad (7.8)$$

где G_{exhw} – массовый расход ОГ во влажном состоянии, кг/ч; q – коэффициент разбавления, определяемый из выражения

$$q = \frac{206,5G_T}{G_{edfw}(CO_{2D} - CO_{2A})}, \quad (7.9)$$

где CO_{2D} , CO_{2A} – концентрация CO_2 в разбавленных ОГ и воздухе, %.

Удельные выбросы NO_x , CH_x , CO и ТЧ с учетом значений весомых коэффициентов определялись по следующим формулам:

$$g_{NO_x} = \frac{\sum_{i=1}^k c_{NO_x i} \cdot WF_i}{\sum_{i=1}^k N_{ei} \cdot WF_i}, \quad g_{CH_x} = \frac{\sum_{i=1}^k c_{CH_x i} \cdot WF_i}{\sum_{i=1}^k N_{ei} \cdot WF_i}, \quad (7.10)$$

$$g_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^k c_{COi} \cdot WF_i}{\sum_{i=1}^k N_{ei} \cdot WF_i}, \quad g_{ТЧ} = \frac{\sum_{i=1}^k c_{ТЧi} \cdot WF_i}{\sum_{i=1}^k N_{ei} \cdot WF_i},$$

где WF_i , N_{ei} – весомые коэффициенты и эффективная мощность соответствующего режима.

Результаты исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 [119] сведены в таблицу 7.8.

Таблица 7.8 – Результаты исследований токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97

Топливо	Удельные выбросы, г/кВт·ч		
	g_{NO_x}	g_{CH_x}	g_{CO}
Дизельное	11,10	0,91	5,68
ПГ	12,44	1,58	2,35
ПГ с РОГ 10%	9,78	1,56	2,70
ПГ с РОГ 20%	6,77	1,60	3,13
МТЭ	6,58	1,01	3,54
ЭТЭ	5,65	1,36	3,82

Результаты исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, в соответствии со стандартом ISO-8174-4 сведены в таблицу 7.9.

Графическое изображение результатов исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 представлено в виде диаграммы на рисунке 7.4.

Таблица 7.9 – Результаты исследований токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии со стандартом ISO-8174-4

Топливо	Удельные выбросы, г/кВт·ч			
	g_{NO_x}	g_{CH_x}	g_{CO}	$g_{TЧ}$
Дизельное	11,68	0,86	5,94	0,620
ПГ	12,89	1,49	2,53	0,078
ПГ с РОГ 10%	10,02	1,47	2,92	0,089
ПГ с РОГ 20%	6,87	1,50	3,39	0,100
МТЭ	6,79	0,95	3,65	0,077
ЭТЭ	5,88	1,29	3,97	0,112

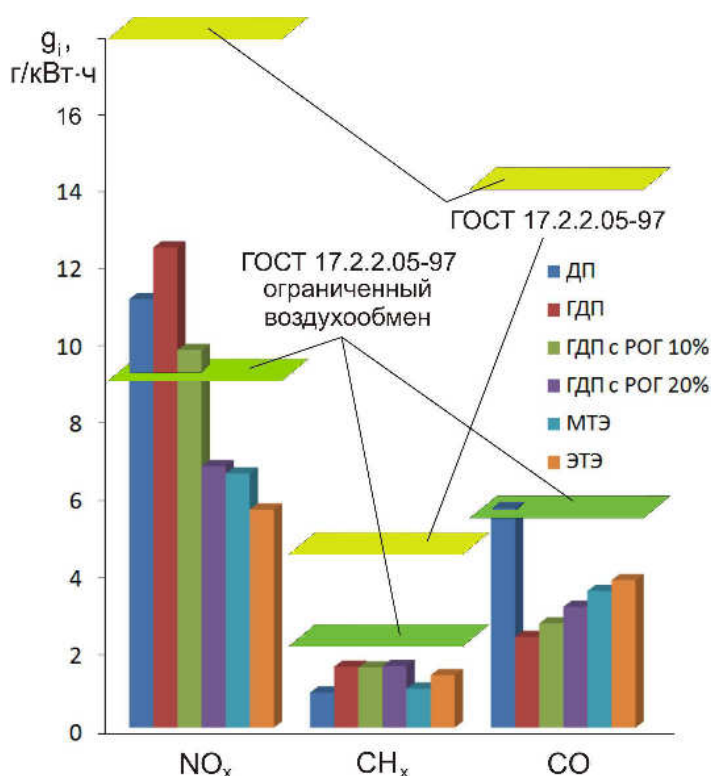


Рисунок 7.4 – Диаграмма удельных показателей токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97

Анализ графика удельных показателей токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, представленного в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97, показывает,

что при работе его на всех исследуемых альтернативных видах топлива (ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) происходит выброс вредных веществ (NO_x , CH_x и CO) в значениях, не превышающих требования рассматриваемого ГОСТа. Кроме того, указанный дизель по значениям выбросов вредных веществ (NO_x , CH_x и CO) соответствует также и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.05-97 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

Графическое изображение результатов исследований дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, по стандарту ISO-8174-4 и соответствие их Правилам ЕЭК ООН №96 представлено в виде диаграммы на рисунке 7.5.

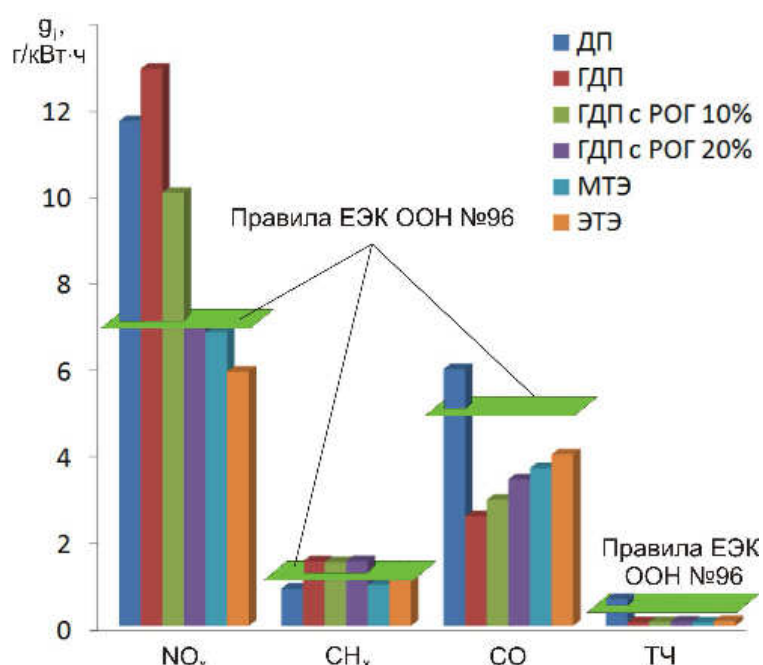


Рисунок 7.5 – Диаграмма удельных показателей токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии со стандартом ISO-8174-4

Анализ графика удельных показателей токсичности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, представленного в соответствии со стандартом ISO-8174-4, показывает, что при работе его на МТЭ и ЭТЭ происходит выброс вредных веществ (NO_x , CH_x , CO и TCh) в значениях, не превышающих Правила ЕЭК ООН №96. При работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ значения удельных выбросов вредных веществ для NO_x , CO и TCh соответствуют Правилам, но при этом отмечено незначительное превышение

по суммарным углеводородам CН_x . Следовательно, дизель 4Ч 11,0/12,5, работающий на ПГ и СТЭ и используемый на внедорожном транспорте, сельскохозяйственных и лесных тракторах, самоходных сельскохозяйственных машинах, дорожно-строительных машинах и на другой промышленной технике, можно также считать соответствующим (кроме CН_x при работе на ПГ) требованиям Правил ЕЭК ООН №96.

7.3 Расчет интегральных значений дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, в условиях его эксплуатации

Твердые частицы, состоящие преимущественно из сажи, являются одним из наиболее вредных веществ ОГ дизелей. В состав сажевых частиц, выбрасываемых дизелями с ОГ, так же входят частицы топливного и масляного происхождения. Их массовое соотношение зависит от параметров рабочего процесса и характеристик топлива. Частицы топливного происхождения представляют собой сульфаты воды, сажу и органически растворимые фракции. Доля углеродной фракции в составе ТЧ может возрасти в зависимости от нагрузочного и скоростного режимов работы дизеля до 90%. Количество же сажи, имеющей масляное происхождение зависит от многих факторов, в том числе напрямую от угара масла, и может составлять до четверти массы ТЧ.

Дымность дизеля 4Ч 11,0/12,5 определяли при положении органов управления регулятором частоты вращения коленчатого вала дизеля, соответствующем полной подаче топлива, на следующих скоростных режимах дизеля:

- номинальная частота вращения коленчатого вала (2200 мин^{-1});
- частота вращения коленчатого вала, соответствующая режиму максимального крутящего момента дизеля (1700 мин^{-1});
- четыре частоты вращения коленчатого вала через равные интервалы в диапазоне частоты вращения, соответствующей максимальному крутящему моменту и номинальной ($1800, 1900, 2000, 2100 \text{ мин}^{-1}$).

Перед началом измерения дымности дизель работал на заданном режиме не менее 10 мин, причем в течение последних 5 мин измеряемые крутящий момент и частота вращения коленчатого вала не отличались от заданных не более чем на 1% и 10 мин^{-1} соответственно. Дымность на каждом режиме измеряли не менее трех раз, при этом разность результатов между максимальным и минимальным значениями не превышала $0,2 \text{ м}^{-1}$, а измеренные значения не представляли убывающую или возрастающую последовательность. Промежуток времени между двумя последовательными измерениями не превышал 1 мин.

Поскольку принцип действия используемого для проведения экспериментальных исследований дымомера BOSCH – EFAW – 68A (рисунок 3.10, б) основан на измерении прозрачности, то значения дымности можно получить путем преобразования прозрачности τ в коэффициент светопоглощения k по следующим выражениям [120]:

$$k = -\frac{1}{L_A} \ln\left(1 - \frac{N}{100}\right), \quad (7.11)$$

где L_A – эффективная оптическая база дымомера, м^{-1} , $L_A=0,43 \text{ м}^{-1}$; τ – прозрачность, %; N – дымность, определяемая по формуле, %

$$N = 100 - \tau. \quad (7.12)$$

Результаты исследований дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, сведены в таблицу 7.10.

Таблица 7.10 – Результаты исследований дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98

Топливо	Дымность ОГ, %
Дизельное	45,1
ПГ	5,2
ПГ с РОГ 10%	6,0
ПГ с РОГ 20%	7,3
МТЭ	5,3
ЭТЭ	8,7

Графическое изображение результатов исследований дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на ПГ и СТЭ, и соответствие их требованиям ГОСТ ГОСТ 17.2.2.02-98 представлено в виде диаграммы на рисунке 7.6.



Рисунок 7.6 – Диаграмма дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ПГ и СТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98

Анализ диаграммы дымности ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5, представленной в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98, показывает, что при работе его на всех исследуемых альтернативных видах топлива (ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) дымность ОГ не превышает нормативы рассматриваемого ГОСТа. Кроме того, указанный дизель по значениям дымности ОГ соответствует также и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.02-98 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин при работе его на ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ.

7.4. Основные результаты и выводы по седьмой главе

1. Проведенный анализ норм выбросов вредных веществ с ОГ дизелей для тракторов, самоходных сельскохозяйственных машин и другой внедорожной техники показывает, что для дизеля 4Ч 11,0/12,5 попадающего как под требования ГОСТ 17.2.2.05-97, так и под Правила ЕЭК ООН №96 нормы удельных выбросов вредных веществ имеют существенное отличие. Так, в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 удельные выбросы вредных веществ не должны

превышать при неограниченном воздухообмене NO_x – 18,0, CH_x – 4,5 и CO – 10,0 г/(кВт·ч), а при ограниченном воздухообмене NO_x – 9,0, CH_x – 2,2 и CO – 4,0 г/(кВт·ч). В соответствии же с требованиями Правил ЕЭК ООН №96 удельные выбросы вредных веществ не должны превышать NO_x – 7,0, CH_x – 1,3, CO – 5,0 и ТЧ – 0,4 г/(кВт·ч), что «жестче» требований ГОСТ 17.2.2.05-97 по NO_x в 2,6 раза и на 22,2%, по CH_x в 3,5 раза и на 69,2% соответственно при неограниченном и ограниченном воздухообмене. Нормы выбросов CO в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН №96 также в 2,0 раза «жестче» требований ГОСТ 17.2.2.05-97 при неограниченном воздухообмене, а при ограниченном уже «мягче» их на 20,0%.

2. Получены в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 удельные выбросы вредных веществ ОГ дизеля, работающего на ДТ, ПГ и СТЭ, отличающиеся от нормативов рассматриваемого ГОСТа: ДП: NO_x – меньше на 38,9%, CH_x – меньше в 3,3 раза, CO – меньше на 43,2%; ГДП: NO_x – меньше на 30,9%, CH_x – меньше на 47,3%, CO – меньше в 4,3 раза; ГДП с РОГ 10%: NO_x – меньше на 45,7%, CH_x – меньше на 48,0%, CO – меньше в 3,7 раза; ГДП с РОГ 20%: NO_x – меньше в 2,7 раза, CH_x – меньше на 46,7%, CO – меньше в 3,2 раза; МТЭ: NO_x – меньше в 2,7 раза, CH_x – меньше в 3,0 раза, CO – меньше в 2,8 раза; ЭТЭ: NO_x – меньше в 3,2 раза, CH_x – меньше в 2,2 раза, CO – меньше в 2,6 раза.

Получены в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97 при ограниченном воздухообмене удельные выбросы вредных веществ ОГ дизеля, работающего на ДТ, ПГ и СТЭ, отличающиеся от нормативов рассматриваемого ГОСТа: ДП: NO_x – больше на 23,3%, CH_x – меньше на 39,3%, CO – больше на 42,0%; ГДП: NO_x – больше на 38,2%, CH_x – больше на 5,3%, CO – меньше на 41,3%; ГДП с РОГ 10%: NO_x – больше на 8,7%, CH_x – больше на 4,0%, CO – меньше на 32,5%; ГДП с РОГ 20%: NO_x – меньше на 24,8%, CH_x – больше на 6,7%, CO – меньше на 21,8%; МТЭ: NO_x – меньше на 26,9%, CH_x – меньше на 32,7%, CO – меньше на 11,5%; ЭТЭ: NO_x – меньше на 37,2%, CH_x – меньше на 9,3%, CO – меньше на 4,5%.

Таким образом, удельные показатели токсичности ОГ дизеля, полученные в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97, показывают, что при работе его на всех исследуемых альтернативных видах топлива (ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) происходит выброс вредных веществ (NO_x , CH_x и CO) в значениях, не превышающих требования рассматриваемого ГОСТа. Кроме того, указанный дизель по значениям выбросов вредных веществ (NO_x , CH_x и CO) соответствует также и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.05-97 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

3. Получены в соответствии со стандартом ISO-8174-4 удельные выбросы вредных веществ ОГ дизеля, работающего на ДТ, ПГ и СТЭ, отличающиеся от нормативов Правил ЕЭК ООН №96: ДП: NO_x – больше на 66,8%, CH_x – меньше на 33,9%, CO – больше на 19,0%, ТЧ – больше на 55,0%; ГДП: NO_x – больше на 84,1%, CH_x – больше на 14,6%, CO – меньше на 49,4%, ТЧ – меньше в 5,1 раза; ГДП с РОГ 10%: NO_x – больше на 43,1%, CH_x – больше на 13,1%, CO – меньше на 41,6%, ТЧ – меньше в 4,5 раза; ГДП с РОГ 20%: NO_x – меньше на 1,9%, CH_x – больше на 15,4%, CO – меньше на 32,2%, ТЧ – меньше в 4,0 раза; МТЭ: NO_x – меньше на 3,0%, CH_x – меньше на 26,9%, CO – меньше на 27,0%, ТЧ – меньше в 5,2 раза; ЭТЭ: NO_x – меньше на 16,0%, CH_x – меньше на 0,8%, CO – меньше на 20,6%, ТЧ – меньше в 3,6 раза.

Таким образом, удельные показатели токсичности ОГ дизеля, полученные в соответствии со стандартом ISO-8174-4, показывает, что при работе его на МТЭ и ЭТЭ происходит выброс вредных веществ (NO_x , CH_x , CO и ТЧ) в значениях, не превышающих Правила ЕЭК ООН №96. При работе дизеля на ПГ, ПГ с РОГ значения удельных выбросов вредных веществ для NO_x , CO и ТЧ соответствуют Правилам, но при этом отмечено незначительное превышение по суммарным углеводородам CH_x . Следовательно, дизель 4Ч 11,0/12,5, работающий на ПГ и СТЭ и используемый на внедорожном транспорте, сельскохозяйственных и лесных тракторах, самоходных сельскохозяйственных машинах, дорожно-строительных

машинах и на другой промышленной технике, можно также считать соответствующим (кроме CH_x при работе на ПГ) требованиям Правил ЕЭК ООН №96.

4. Анализ режимов испытаний показывает, что в результате исследования дизеля, работающего на ДТ, ПГ и СТЭ, его интегральные показатели токсичности ОГ определенные в соответствии со стандартом ISO-8174-4 по NO_x на 1,5-5,0% и СО на 3,0-7,7% выше значений, полученных по требованиям ГОСТ 17.2.2.05-97, а значения CH_x на 5,2-5,9% наоборот ниже значений, полученных по указанному ГОСТу, что наглядно характеризует отличительные особенности по удельным выбросам вредных веществ исследуемых испытательных циклов и соответствующих им коэффициентов весомости.

5. Удельные показатели дымности ОГ дизеля, работающего по ДП, полученные в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98 находятся в диапазоне менее 8,3% и более 11,1% (в зависимости от исследуемого режима) допустимых нормативов рассматриваемого ГОСТа. Сравнивая удельные показатели дымности ОГ ДП с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98 при ограниченном воздухообмене получаем превышение выбросов на 21,9-75,5%.

Удельные показатели дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, полученные в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98 ниже допустимых нормативов рассматриваемого ГОСТа на всех исследуемых альтернативных видах топлива: на ГДП – в 7,7-9,5 раза; на ГДП с РОГ 10% – в 6,7-8,2 раза; на ГДП с РОГ 20% – в 5,5-6,7 раза; на МТЭ – в 7,7-9,3 раза; на ЭТЭ – в 4,6-5,7 раза.

Удельные показатели дымности ОГ дизеля, работающего на ПГ и СТЭ, полученные в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98 при ограниченном воздухообмене ниже допустимых нормативов рассматриваемого ГОСТа на всех исследуемых альтернативных видах топлива: на ГДП – в 4,9-7,1 раза; на ГДП с РОГ 10% – в 4,3-6,2 раза; на ГДП с РОГ 20% – в 3,5-5,1 раза; на МТЭ – в 4,9-7,0 раза; на ЭТЭ – в 3,0-4,3 раза.

Таким образом, удельные показатели дымности ОГ дизеля, полученные в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98, показывают, что при работе его

на всех исследуемых альтернативных видах топлива (ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ) дымность ОГ не превышает нормативы рассматриваемого ГОСТа. Кроме того, указанный дизель по значениям дымности ОГ соответствует также и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.02-98 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин при работе его на ПГ, ПГ с РОГ, МТЭ и ЭТЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования и рекомендации. Представленные теоретические положения и результаты экспериментальных исследований новых научно обоснованных технических и технологических перспективных решений по улучшению экологических показателей автотракторного дизеля с камерой сгорания типа ЦНИДИ и экономии нефтяного моторного топлива путем разработки теоретических основ процесса образования оксидов азота и их снижения, изменения конструктивных и регулировочных параметров при работе на ПГ, ПГ с РОГ и СТЭ, позволили получить ряд новых результатов и сделать следующие выводы и рекомендации:

1. В результате рассмотрения современного состояния проблемы токсичности, способов снижения содержания оксидов азота, механизмов их образования, проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований дано перспективное решение улучшения экологических показателей дизелей путем применения природного газа и спирто-топливных эмульсий.

2. На основании исследования закономерностей формирования оксидов азота предложены механизмы их химических процессов образования при работе дизелей на природном газе, метано- и этано-топливных эмульсиях, и разработана математическая модель, позволяющая рассчитать объемное содержание оксидов азота в широком диапазоне режимов работы дизелей на природном газе, природном газе с рециркуляцией отработавших газов и спирто-топливных эмульсиях, что допускает без дорогостоящих экспериментальных исследований оценить влияние альтернативных топлив на их экологические характеристики.

3. Представлены результаты теоретических исследований объемного содержания оксидов азота при работе дизеля на дизельном топливе, природном газе, природном газе с различными степенями рециркуляции, метано- и этано-топливных эмульсиях. При этом расхождения между теоретическими и экспериментальными данными не превышают 10%, что положительно

характеризует верификацию сочетания выполненных, по разработанной модели, теоретических и экспериментальных данных.

4. Для снижения содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля 4Ч 11,0/12,5 с камерой сгорания типа ЦНИДИ на основании полученных результатов исследования предложены рекомендации по поддержанию следующих соотношений компонентов альтернативных топлив: газа – 80%, запальной порции дизельного топлива – 20% (при работе на природном газе); спирт (метанол или этанол) – 25%, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А – 0,5%, вода – 7%, дизельное топливо – 67,5% (при работе на смеси со спиртами). При работе на природном газе с рециркуляцией установлена закономерность подачи рециркулируемых газов от 20 до 40% в зависимости от режима работы дизеля. Рекомендовано значение оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива равное 23 градусам. При этом установлена возможность сохранения мощностных показателей на уровне серийного дизеля.

5. Определены оптимальные значения эффективных показателей, характеристик сгорания и тепловыделения, объемного содержания и массовой концентрации оксидов азота, токсичности и дымности ОГ при работе дизеля на природном газе и спирто-топливных эмульсиях. Перевод указанного дизеля с нефтяного топлива на альтернативное позволил снизить содержание в отработавших газах при работе на природном газе с 20%-ной рециркуляцией (рециркуляция была применена для ликвидации возросших в результате использования природного газа оксидов азота) оксидов азота на 43,2%, сажи в 5,6 раза, диоксида углерода на 33,3%, оксида углерода на 10,0%; при работе на метанолю-топливной эмульсии – оксидов азота на 41,3%, сажи в 6,9 раза, диоксида углерода на 6,7%, оксида углерода на 45,0%; при работе на этанолю-топливной эмульсии – оксидов азота на 50,2%, сажи в 5,2 раза, диоксида углерода на 23,8%, оксида углерода на 25,0%.

6. Осуществлена оценка интегральной токсичности отработавших газов дизеля, работающего на природном газе, природном газе с рециркуляцией отработавших газов и спирто-топливных эмульсиях, в условиях его эксплуатации в

соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.05-97. При этом значения удельных показателей токсичности отработавших газов дизеля (g_{NO_x} , g_{CH_x} , g_{CO}) не превышают требования рассматриваемого ГОСТа. Кроме того, указанный дизель также соответствует и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.05-97 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

7. Осуществлена оценка интегральной токсичности отработавших газов дизеля, работающего на природном газе, природном газе с рециркуляцией отработавших газов и спирто-топливных эмульсиях, в условиях его эксплуатации в соответствии со стандартом ISO-8174-4. При работе дизеля на спирто-топливных эмульсиях значения удельных показателей токсичности отработавших газов (g_{NO_x} , g_{CH_x} , g_{CO} и $g_{TЧ}$) не превышают требования Правила ЕЭК ООН №96. При работе дизеля на природном газе с рециркуляцией значения удельных показателей токсичности отработавших газов (g_{NO_x} , g_{CO} и $g_{TЧ}$) не превышают требования Правила ЕЭК ООН №96. Следовательно, дизель 4Ч 11,0/12,5, работающий на природном газе и спирто-топливных эмульсиях и используемый на внедорожном транспорте, сельскохозяйственных и лесных тракторах, самоходных сельскохозяйственных машинах, дорожно-строительных машинах и на другой промышленной технике, соответствует (кроме CH_x при работе на ПГ) требованиям Правил ЕЭК ООН №96.

8. Осуществлена оценка интегральной дымности отработавших газов дизеля, работающего на природном газе, природном газе с рециркуляцией отработавших газов и спирто-топливных эмульсиях, в условиях его эксплуатации в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.2.02-98. При этом значения удельных показатели дымности отработавших газов дизеля не превышают требования рассматриваемого ГОСТа. Кроме того, указанный дизель по дымности отработавших газов также соответствует и условиям с ограниченным воздухообменом, что говорит о его полном соответствии требованиям ГОСТ 17.2.2.02-98 для дизелей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

9. Результаты исследований рассмотрены:

- Министерством сельского хозяйства и продовольствия Кировской области и рекомендованы к внедрению в предприятиях, занимающихся производством и переработкой продукции сельского хозяйства;

- ООО «Газпром межрегионгаз Киров» и рекомендованы для использования при переводе техники для работы на природном газе;

- ОАО «КировПассажирАвтотранс» для использования в производстве при переводе действующего автотранспортного парка для работы на природном газе.

10. Материалы диссертации используются в учебном процессе при изучении дисциплин аспирантуры по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника» (направленность программы 05.04.02 «Тепловые двигатели»); бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 23.03.03, 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.01 «Технология транспортных процессов», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия» в Вятской, Костромской, Нижегородской, Чувашской государственных сельскохозяйственных академиях и Казанском государственном аграрном университете.

11. По результатам проведенных исследований на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА создан макетный образец трактора МТЗ-80, переоборудованный для работы ПГ и СТЭ, который при работе на ЭТЭ прошел эксплуатационные испытания в ЗАО племзавод «Октябрьский» Кировской области.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- дальнейшие исследования физико-химических процессов образования и методик расчета других токсичных компонентов при работе дизелей на природном газе и спирто-топливных эмульсиях;

- исследования применения дополнительных мероприятий (теоретических и экспериментальных), направленных на модернизацию рабочих процессов широкого спектра дизелей, с целью полного (100%), либо максимально близкого к полному замещению нефтяного топлива альтернативным (природный газ, метиловый, этиловый спирты и др. альтернативные топлива).

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

1. ДВС - двигатель внутреннего сгорания
2. ЦД - цилиндр дизеля
3. ДП - дизельный процесс
4. ГДП - газодизельный процесс
5. КС - камера сгорания
6. МВС - метановоздушная смесь
7. ОГ - отработавшие газы
8. ПГ - природный газ
9. КПГ - компримированный природный газ
10. СТЭ - спирто-топливная эмульсия
11. МТЭ - метанола-топливная эмульсия
12. ЭТЭ - этанола-топливная эмульсия
13. кпд - коэффициент полезного действия
14. у.о.в.т. - угол опережения впрыскивания топлива
15. РОГ - рециркуляция отработавших газов
16. ρ - степень рециркуляции, %
17. в.м.т. - верхняя мертвая точка
18. н.м.т. - нижняя мертвая точка
19. п.к.в. - поворот коленчатого вала
20. NO - оксид азота, ppm, %, г/(кВт·ч)
21. NO_x - оксиды азота, ppm, %, г/(кВт·ч)
22. C_{NOx} - массовая концентрация NO_x, г/м³
23. Γ_{NOx} - объемное содержание NO_x, ppm, %
24. CO - оксид углерода, %, г/(кВт·ч)
25. CO₂ - диоксид углерода, %, г/(кВт·ч)
26. С - сажа, ед. по шкале Bosch
27. CH_x, C_nH_m - суммарные углеводороды, %, г/(кВт·ч)

28. $TЧ$ - твердые частицы, $г/(кВт \cdot ч)$
29. p_e - среднее эффективное давление, МПа
30. p_z - давление сгорания в цилиндре, МПа
31. $\Theta_{впр}$ - угол опережения впрыскивания топлива, градус
32. ϕ - угол поворота коленчатого вала, градус п.к.в.
33. ϕ_i - угол, равный периоду задержки воспламенения, градус п.к.в.
34. $\phi_{T_{z_{max}}}$ - угол, равный максимальной температуре цикла, градус п.к.в.
35. $d\chi/d\phi$ - относительная скорость активного тепловыделения, $1/градус$
36. $dp/d\phi$ - скорость нарастания давления в цилиндре, МПа / градус
37. t_r - температура отработавших газов, $^{\circ}C$
38. $t_{рг}$ - температура рециркулируемых газов, $^{\circ}C$
39. T - осредненная температура цикла в цилиндре, К
40. T_{max} - максимальная осредненная температура цикла в цилиндре, К
41. n - частота вращения, $мин^{-1}$
42. N_e - эффективная мощность дизеля, кВт
43. M_k - крутящий момент дизеля, $н \cdot м$
44. G_v - часовой расход воздуха, $кг / ч$
45. G_T - часовой расход топлива, $кг / ч$
46. g_e - удельный эффективный расход топлива, $г/(кВт \cdot ч)$
47. η_v - коэффициент наполнения
48. α - коэффициент избытка воздуха
49. η_e - эффективный кпд
50. τ_i - период задержки воспламенения
51. χ - относительное тепловыделение
52. χ_i - активное тепловыделение
53. ϵ - степень сжатия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортов, В.Е. Направления инновационного развития энергетики мира и России [Текст] / В.Е. Фортов, А.А. Макаров // УФН. - 2009. - Т. 168. - № 11. - С. 5-19.
2. Arent, D.J. The status and prospects of renewable energy for combating global warming [Text] / D.J. Arent, A. Wise, R. Gelman // Energy Economics. - 2011. - V.33. - Issue 4. - July. - P. 584-593.
3. Lif, A. Water-in-diesel emulsions and related systems [Text] / A. Lif, K. Holmberg // Advances in Colloid and Interface Science. - 2006. - V.123. - № 126. - P. 231-239.
4. Фортов, В.Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и России [Текст] / В.Е. Фортов, О.С. Попель // Теплоэнергетика. - 2014. - №6. - С. 4-13.
5. Markov, V.A., Biryukov, V.V., Kaskov, S.I. Ethanol used as an environmentally sustainable energy resource for thermal power plants [Text] // Thermal Engineering. - 2016. - V.63. - №9. - P.628-635.
6. Марков, В.А. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях [Текст] / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.И. Мальчук. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - 360 с.
7. Басков, В.Н. Моторные биотоплива: состояние и перспективы развития технологии в мире и в России [Текст] / В.Н. Басков, Е.С. Панцхава // Теплоэнергетика. - 2013. - №4. - С. 43-47.
8. Subramanian, K.A. A comparison of water-diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions [Text] / K.A. Subramanian // Energy Conversion and Management 52. - 2011. - P. 849-857.
9. James, C. A highly efficient six-stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery [Text] / C. James, P. Szybist // Energy 35. - 2010. - P. 1658-1664.
10. Фомин, В.М. Метод улучшения показателей работы газового двигателя, созданного на базе дизеля [Текст] / В.М. Фомин, В.В. Гусаров, А.П. Латышев // Тракторы и сельхозмашины. - 2017. - №1. - С.54-60.
11. Кульчицкий, А.Р. Вопросы создания и эксплуатации газомоторной техники в агропромышленном комплексе [Текст] / А.Р. Кульчицкий // Газовая промышленность. -

2015. - №3 (728). – С. 100-103.

12. Казаков, Н.А. Экологическая безопасность транспорта [Текст] / Н.А. Казаков, А.П. Масленникова // Автобизнесмаркет. - 2004. - №14. – С. 4-7.

13. К вопросу расширения использования газа в качестве моторного топлива [Текст] / С.В. Дунаев, А.В. Исаев, А.В. Лесин, В.П. Попов, К.И. Федин // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. - 2017. - №1. - С.10-14.

14. Горчичное масло как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу [Текст] / В.А. Марков, С. Бовеэнь, В.А. Неверов, С.А. Зыков // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2017. - № 1. - С. 10-21.

15. Азаров, В.К. Экологические проблемы автомобильного транспорта и риски в экономике страны [Текст] / В.К. Азаров, В.Ф. Кутенев, В.А. Петрушов // Инвестиции в России. - 2018. - №1 (276). - С.11-17.

16. Кавтарадзе, Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях [Текст]: учебник для вузов / Р.З. Кавтарадзе. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 515 с.

17. Кулешов, А.С. Развитие многозонных моделей для расчета сгорания в современных ДВС [Текст] / А.С. Кулешов, Ю.М. Фадеев, А.А. Кулешов // Двигателестроение. – 2017. - №2 (268). - С.7-10.

18. Rajkumar, S., Thangaraja, J. Effect of biodiesel, biodiesel binary blends, hydrogenated biodiesel and injection parameters on NO_x and soot emissions in a turbocharged diesel engine [Text] // Fuel. - 2019. - P. 101-118.

19. Апелинский, Д.В. Исследование возможностей снижения расхода топлива на режимах холостого хода газового двигателя, разработанного на базе дизеля [Текст] / Д.В. Апелинский, В.В. Гусаров, В.М. Фомин // Тракторы и сельхозмашины. - 2017. - № 3. - С.3-9.

20. Кульчицкий, А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей [Текст]: учеб. пособие для высшей школы / А.Р. Кульчицкий. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Академический Проект, 2004. – 400 с.

21. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.А. Звонов. - 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1981. - 160 с.

22. Лиханов, В.А. Снижение токсичности автотракторных дизелей [Текст] / В.А. Лиханов, А.М. Сайкин. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Колос, 1994. - 224 с.

23. Лиханов, В.А. Природный газ как моторное топливо для тракторных дизелей [Текст] / В.А. Лиханов. - Киров: Вятская ГСХА, 2002. - 280 с.
24. Титков, А.И. От концепции – к стратегии развития автомобильной промышленности в первой четверти XXI века [Текст] / А.И. Титков // Автомобильная промышленность. – 2005. - № 2. – С. 1-4.
25. Production and application of abe as a Biofuel [Text]/ S.J.M. Algayyim, T. Yusaf, A.P. Wandel, I. Hamawand // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2018. - V.82. - P.1195-1214.
26. Influence of Soy-lecithin as Bio-additive with straight vegetable oil on ci engine Characteristics [Text] / P.R. Shah, U.N. Gaitonde, A. Ganesh // Renewable Energy. - 2018. - V.115. - P.685-696.
27. Экологическая эффективность автотранспортного комплекса в регионах России при переводе на природный газ [Текст] / А.Г. Ишков, К.В. Романов, Р.В. Тетеревлев [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - № 2 (50). - С. 15-25.
28. Лиханов, В.А. Снижение дымности отработавших газов путем применения природного газа [Текст]: монография / В.А. Лиханов, Р.Р. Деветьяров, П.Н. Вылегжанин; под общ. ред. проф. В.А. Лиханова. - Киров: Вятская ГСХА, 2016. – 146 с.
29. Лиханов, В.А. Применение природного газа для работы дизеля Д-240 [Текст]: монография / В.А. Лиханов, Р.Р. Деветьяров, П.Н. Вылегжанин; под общ. ред. проф. В.А. Лиханова. - Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2015. – 268 с.
30. Лиханов, В.А. Снижение дымности отработавших газов дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения этанола-топливных эмульсий [Текст]: монография / В.А. Лиханов, И.М. Шаромов – Киров: Вятская ГСХА, 2012. – 144 с.
31. Лиханов, В.А. Исследование рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при использовании в качестве топлива этанола-топливной эмульсии [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.И. Чупраков; под общ. ред. В.А. Лиханова. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. – 146 с.
32. Лиханов, В.А. Улучшение экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на этанола-топливной эмульсии путем снижения содержания оксидов азота в отработавших газах [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.В. Зонов. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. – 169 с.
33. Kuszewski, H. Experimental investigation of the autoignition properties of ethanol–

biodiesel fuel blends [Text] // Fuel. - 2019. - V. 235. - P. 1301-1308.

34. Глушков, С.П. Влияние использования альтернативных видов топлива на характеристики рабочих процессов ДВС [Текст] / С.П. Глушков, В.И. Кочергин, В.В. Красников // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. - 2018. - №1. - С. 24-32.

35. Al-Esawi, N. The impact of biodiesel fuel on Ethanol/Diesel blends [Text] / N. Al-Esawi, M.A. Qubeissi, R. Kolodnytska // Energies. - 2019. - V. 12. - № 9. - P. 1804.

36. Хачиян, А.С. Применение спиртов в дизелях [Текст] / А.С. Хачиян // Двигателестроение.-1984. - № 8. - С. 30-34.

37. Odintsov, V. Regularities of changes in specific carbon and nitrogen oxide emissions of marine and transport diesel engines [Text] / V. Odintsov, D. Glazkov, N. Sviridyuk // Global perspectives in MET: Towards Sustainable, Green and Integrated Maritime Transport Nikola Vaptsarov Naval Academy Varna, Bulgaria, International Association of Maritime Universities, 2017. - P.470-480.

38. Перспективные автомобильные топлива [Текст] / Р.Ф. Хемфилл [и др.]; пер. с англ. А.П. Чочиа; под ред. Я.Б. Черткова. - М.: Транспорт, 1986. - 319 с.

39. Engine parameter optimization of palm oil biodiesel as alternate fuel in CI engine [Text] / A.N. Kumar, P.S. Kishore, K.B. Raju [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. - 2019. - V. 26. - № 7. - P. 6652-6676.

40. An overview of higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines [Text] / Erdiwansyah, R. Mamat, M.S.M. Sani [et al.] // Energy Reports. - 2019. - V. 5. - P. 467-479.

41. Лоптев, С.М. Метанол: пути синтеза и использования [Текст] / С.М. Лоптев, А.Ш. Мосесов, А.Я. Розовский. - М.: ГКНТ ВНИИЦ, 1984. - 47 с.

42. Терентьев, А.Г. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов [Текст] / А.Г. Терентьев, В.М. Тюков, Ф.В. Смаль. - М.: Химия, 1989. - 272 с.

43. Малов, Р.В. Некоторые особенности применения метанола в дизелях [Текст] / Р.В. Малов, В.К. Ю, И.В. Ксенофонтов // Двигателестроение. - 1989. - №8. - С. 30-31.

44. Кавтарадзе, Р.З., Краснов, В.М. Влияние частичной гомогенизации смеси на образование оксидов азота в камере сгорания водородного дизеля [Текст] // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - №2 (50). С.50-56.

45. Горбунов, В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. - М.: РУДН, 1998. - 214 с.

46. Луканин, В.Н. Особенности воспламенения струи метанола в поджигаемой метанола-воздушной смеси [Текст] / В.Н. Луканин, В.З. Махов, Г.П. Вилькявичюс // Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Киров, 1988. - С. 132-133.

47. Vellaiyan, S. Multi-response optimization to improve the performance and emissions level of a diesel engine fueled with ZnO incorporated water emulsified soybean biodiesel/diesel fuel blends [Text] / S. Vellaiyan, A. Subbiah, P. Chockalingam // Fuel. - 2019. - V. 237. - P. 1013-1020.

48. Yesilyurt, M.K. The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends [Text] // Renewable Energy. - 2019. - V. 132. - P. 649-666.

49. Results of simulation and experimental research of automobile gas diesel engine [Text] / V.V. Sinyavski, M.G. Shatrov, A.Y. Dunin [et al.] // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. - 2019. - V. 7. - № 1. P. 281-286.

50. Попов В.М. Исследование рабочего процесса тракторного дизеля воздушного охлаждения при различных способах подачи метанола в цилиндры [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Попов Вячеслав Михайлович. - Киров, 1986. - 207 с.

51. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях [Текст]: монография / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Семенов, А.В. Шахов, В.В. Багров. – М.: ООО НИЦ «Инженер» (Союз НИО), ООО «Онико-М», 2011. – 536 с.

52. Кавтарадзе, Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород [Текст] / Р.З. Кавтарадзе. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 238 с.

53. Лопатин, О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизелей путем применения альтернативных видов топлива [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин. – Киров: Вятская ГСХА, 2009. – 500 с.

54. Лопатин, О.П. Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения оксидов азота в дизеле [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин; под общ. ред. акад. РАТ, докт. техн. наук, проф. В.А. Лиханова. - Киров: Вятская ГСХА, 2017. – 408 с.

55. Дунин, А.Ю. Результаты экспериментального исследования влияния на показатели рабочего цикла дизеля давления впрыскивания до 300 МПа [Текст] //

Автомобильная промышленность. - 2018. - №1. - С.5-7

56. Effect of aluminium oxide nanoparticles blended pongamia methyl ester on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine [Text] / M. Sivakumar, R. Ramesh kumar, M.H. Syed Thasthagir [et al.] // Renewable Energy. - 2018. - V.116. - P.518-526.

57. Бояренко, А.Г., Подчинок, В.М., Гумелёв, В.Ю. Экологические проблемы дизеля [Текст] // Современная техника и технологии. - 2016. - №2 (54). - С.77-82.

58. Киприянов, Ф.А. Исследование показателей токсичности отработавших газов двигателя внутреннего сгорания при работе на генераторном газе и традиционном моторном топливе [Текст] / Киприянов Ф.А. // Проблемы современной науки и образования. - 2017. - №1 (83). - С.26-29.

59. Diesel-to-natural gas engine conversion with lower compression ratio [Text] / G.G. Ter-Mkrtichyan, A.M. Saikin, K.E. Karpukhin [et al.] // Pollution Research. - 2017. - V.36. - №.3. - P.678-683.

60. Analysis of emission characteristics of gas turbine engines with some alternative fuels [Text] / A.M. Starik, A.M. Savel'ev, O.N. Favorskii [et al.] // International Journal of Green Energy. - 2018. - V.15. - №3. - P.161-168

61. Kholod, N., Evans, M. Reducing black carbon emissions from diesel vehicles in russia: an assessment and policy recommendations [Text] // Environmental Science & Policy. - 2016. - V.56. - P.1-8.

62. Effect of using hydroxy - CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel [Text] / H.T. Arat, M.K. Baltacioglu, M.Özcanli [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. - 2016. - V.41. - №19. - P.8354-8363.

63. Lazarev, E., Lomakin, G. New energy-saving technologies in transport energy [Text] // WIT Transactions on Ecology and the Environment. - 2014. - T.190 - V.1. - P.677-683.

64. Assessment of the impact of compressed gas vehicle on the environment [Text] / S.M. Ugay, K.S. Golokhvast, N.S. Pogotovkina [et al.] // Life Science Journal. - 2014. - V.11. - №10s. - P. 515-517.

65. Dimethyl ether: a review of technologies and production challenges [Text] / Z. Azizi, T. Tohidian, M.R. Rahimpour [et al.] // Chemical Engineering and Processing. - 2014. - V.82. - P.150-172.

66. Sustainable biodiesel production from oleaginous yeasts utilizing hydrolysates of various non-edible lignocellulosic biomasses [Text] / A. Patel, N. Arora, K. Sartaj [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2016. - V.62. - P.836-855.

67. Konig, A. Engine Operation of Partially dissociated Methanol [Text] / A. Konig, K.W. Ellinger, K. Korbel // SAE Techn. Pap. Ser.- 1985. - № 850573. - 15 p.

68. Korematzu K. Dual fuelled diesel engine with diesel fuel and reformed methanol [Text] / K. Korematzu // SAE Techn. Pap. Ser.-1983. - № 831238. - P. 113-121.

69. Quality control of biodiesel content of b7 blends of methyl jatropha and methyl crambe biodiesels using mid-infrared spectroscopy and multivariate control charts based on net analyte signal [Text] / B.V. Siteo, H. Mitsutake, E. Guimaraes [et al.] // Energy and Fuels. - 2016. - V.30. - №2. - P.1062-1070.

70. Lonts, H. Alcohol Cold Starting: A Theoretical atudy [Text] / H. Lonts, D. Browning // 18 IECEC. - Orlando, 1983. - P.586-591.

71. Assessment of adaptability of natural gas vehicles by the constructive analogy method [Text]/ I. Anisimov, A. Ivanov, E. Chikishev [et al.] // International Journal of Sustainable Development and Planning. - 2017. - V.12. - №6. P.1006-1017.

72. Menrod, H. Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition Engine Fuelled with Dissociated and Steam-reformed Methanol [Text] / H. Menrod, G. Decker, R.R. Davidson // SAE Techn. Pap. Ser. - 1985. - № 852106. - 12 p.

73. Markov V.A., Loboda S.S., Kamaltdinov V.G. Optimization of diesel fuel and corn oil mixtures composition [Text] // Procedia Engineering. Ser. 2. International Conference on Industrial Engineering "ICIE 2016", 2016. - P. 225-234.

74. Me Call, D.M. Performance and emissions characteristics of a spark ignition engine fueled with dissociated and steamreformed methanol [Text] / D.M. Me Call // SAE Techn. Pap. Ser. – 1985. - № 852106. - 10 p.

75. Developing biostable fuel compositions based on diesel fuels and biodiesels [Text] / L.R. Mahmudova, M.M. Movsumzadeh, I.M. Akhmedov [et al.] // Theoretical & Applied Science. - 2016. - №7 (39). - P.70-74.

76. Sendilvelan, S., Bhaskar, K. Effect of multiple injection strategies to reduce oxides of nitrogen and control of pollutants emissions of an automobile [Text] // Russian Journal of Chemistry. - 2016. - V.9. - №4. - P. 692-696.

77. Neitz, A. Resulte of MAN-FM Diesel Engines Operating on straight Alcohol Fuels

[Text] / A. Neitz, F. Chmela // IV Int.Symp. on Alcohol fuels Techn. - San Paulo, 1980. - P. 139-146.

78. Palmer, F.H. Fundamental Volability/driveability cha-racteristics of oxygenated Gasolines at high underbonnet tempera-tures [Text] / F.H. Palmer, G.J. Lanf // SAE Techn. Pap. Ser.-1983.- № 831705. - 13 p.

79. Perfley, R.K. Utilisation of pure Alcohol Fuels in a Diesel Engine by spark ignition [Text] / R.K. Perfley, H.G. Agelman // IV Int. Symp. on Alcohol Fuels Techn.- San Paulo, 1980. - P. 84-92.

80. Pundir, B.P. In-cylinder charge Non-Homo-geneity and cyclic variation in SI-engines with alcohol Fuels [Text] / B.P. Pundir, V.A. Zvonow, C.P. Gupta // Proceedings of the Fifth International Symposium on Alcohol Fuel Technology. – Auckland, New Zealand, 1982. - P.28-36.

81. Identifying the descriptor governing no oxidation on mullite sm (Y, Tb, Gd, Lu) MN_2O_5 for diesel exhaust cleaning [Text] / H.-B. Li, W.-H. Wang, X. Qian [et al.] // Catalysis Science and Technology. - 2016. - V.6. - №11. P.3971-3975.

82. Rao, K. Gopalakrichnan and Murthy B.S. Mixture Maldistribution and Aldehyde Emission in Alcohol Fueled SI Engine [Text] / K. Rao, Subba, V. Ganesan // SAE Techn. Pap.Ser. - 1983. - № 830511. - 10 p.

83. Shadis William, J. Gasohol as a Means to Eco-Nomize Vehiole Fuel [Text] / J. Shadis William, W. Mc Callum Peter // SAE Techn. Pap. Ser.-1980.- № 800889. - 8 p.

84. Toshiyuki, S. Methanol Diesel Engine and its Application to a Diesel vehicle [Text] / S. Toshiyuki // SAE Techn.Pap.Ser. - 1984. - № 840116. - 8 p.

85. Lozhkina, O.V., Lozhkin, V.N. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates [Text] // Transportation Research Part D: Transport and Environment. - 2016. - V.47. - P.251-264.

86. Hardenberg, H.O. Thermodynamische Betrachtungen zum Mercedes-Bens Methanol-Gasmotor-Konzopt [Text] / H.O. Hardenberg // Automob.-Ind.- 1983. - №3. - P. 297-301.

87. Extended Performance of Alcoholfumigation in Diesel Engines thro-ung different multipoint alcohol injection timing Cycles [Text] / D. Savagel, R.A. White, S. Cole, G. Pritscheff // SAE Techn. Pap. Ser. -1986. -№ 861580. - P. 11.

88. Лиханов, В.А. Исследование процессов сгорания и тепловыделения в

цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе [Текст] / В.А. Лиханов, А.А. Лопарев, Л.В. Рудаков. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 129 с.

89. Леонард, Р. Истощение нефтяных запасов и грядущая эпоха природного газа [Текст] / Р. Леонард // Нефтегазовая вертикаль. – 2001. – № 9. – С. 50-59.

90. Марков, В.А. Оптимизация состава смесевых биотоплив для дизелей [Текст] / В.А. Марков, С.Н. Девянин, С.А. Нагорнов // Автомобильная промышленность. - 2016. - №3. – С. 22-29.

91. Fuel Options for the Fuel cell Vehicle: Hydrogen, Methanol or Gasoline? [Text] / С.Е. Thomas, В.Д. James, F.D. Lomax Jr, I.F. Kuhn Jr // International Journal of Hydrogen Energy - 2000. - V.25. №6. - P. 551- 567.

92. Истомин, С.В., Цыпцына, А.В.Снижение токсичных веществ отработавших газов дизелей в местах с ограниченным воздухообменом [Текст] // Научное обозрение. - 2016. - №12. - С.297-300.

93. Карелина, А.С. Экологические аспекты автомобильного транспорта [Текст] / А.С. Карелина // Наука без границ - 2017. - №1. - С.29-39.

94. Звонов, В.А. Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле [Текст] / В.А. Звонов, А.В. Козлов, В.Ф. Кутенев. – М.:НАМИ, 2001. - 248 с.

95. Грехов, Л.В., Драган, Ю.Е. Формирование характеристики впрыскивания топлива с помощью аккумуляторной топливной системы для малотоксичных дизелей наземных транспортных средств [Текст] // Грузовик. - 2016. - №3. - С. 20-24.

96. Токсичность автотракторных двигателей и способы ее снижения [Текст] / Н.П. Самойлов, Е.И. Игонин, О.А. Кашеваров, Д.Н. Самойлов.- Казань: Изд-во Казанск. унта, 1997. - 170 с.

97. Скворцов А.А. Развитие рынка газомоторного топлива в Российской Федерации [Текст] / А.А. Скворцов // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2017. - № 11. - С. 483-485.

98. Патрахальцев Н.Н., Виноградов Л.В., Лотфуллин Ш.Р. Повышение экономичности газового двигателя камаз отключением части цилиндров на режимах малых нагрузок [Текст] / Н.Н. Патрахальцев, Л.В. Виноградов, Ш.Р. Лотфуллин // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. - №1 (55). – С. 31-35.

99. Выбор состава метанола-рапсовой эмульсии для ее использования в качестве топлива дизеля [Текст] / А.В. Шемякин, В.В. Терентьев, Ю.А. Панов [и др.] // Тракторы

и сельхозмашины. – 2017. - №11. – С. 10-14.

100. Стабилизация экологической обстановки и использование современных видов моторного топлива [Текст]: Информационно-аналитические аспекты. - М.: СЭБ Интернационал Холдинг, 2001. - 368 с.

101. ГОСТ Р ИСО 8178-7-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2000. - 15 с.

102. Кратко, А.П. Перспективы автомобильных газодизелей [Текст] / А.П. Кратко, Т.Р. Филипосянц // Автомобильная промышленность. - 1994. - № 2. - С. 9-10.

103. Титков, А.И. Природный газ - моторное топливо XXI века [Текст] / А.И. Титков // Автомобильная промышленность. - 1998. - № 2. - С. 26-29.

104. Шкрабак, В.С. Экономия жидкого дизельного топлива путем перевода дизелей на газодизельный процесс [Текст] / В.С. Шкрабак, А.В. Николаенко, А.А. Капустин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. – С.-Петербург, 2002. - С. 30-39.

105. Стандарты на состав отработавших газов тракторных и комбайновых дизелей [Текст] / А.Р. Кульчицкий, А.Г. Коротнев, И.В. Денисенко [и др.] // Двигателестроение. – 1996. - № 1. – С. 13.

106. Лиханов, В.А. Снижение дымности отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле с двойной системой топливоподачи [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.А. Глухов; под общ. ред. В.А. Лиханова. – Киров: Вятская ГСХА, 2008. – 139 с.

107. Лиханов, В.А. Влияние метанола на его экологические параметры дизеля с воздушным охлаждением [Текст] / В.А. Лиханов, А.А. Анфилатов // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2016. - № 5 (110). - С. 11-13.

108. Лиханов, В.А. Исследование рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле с двойной системой топливоподачи [Текст]: монография / В.А. Лиханов, А.Н. Чувашев. – Киров: Вятская ГСХА, 2007. – 129 с.

109. Лиханов, В.А. Работа дизеля на метаноле и рапсовом масле [Текст] / В.А. Лиханов, А.В. Фоминых, В.Н. Копчиков // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - №9. – С. 3-5.

110.Акобия, Ш.Е. Перспективы снижения вредных выбросов при применении диметилэфира [Текст] / Ш.Е. Акобия, Т.Н. Смирнова // Грузовик &. - 1999. - № 2. - С. 27-29.

111.Математическое моделирование испарения рапсового масла и этанола в камере сгорания дизельного двигателя [Текст] / В.А. Лиханов, С.А. Романов, М.И. Арасланов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - №4. – С. 3-6.

112.Особенности использования диметилового эфира в качестве моторного топлива [Текст] / Б.И. Базаров, С.А. Калауов, Ф.Ш. Сидиков, И.И. Усманов // Химия и химическая технология. - 2016. – Т.51. - №1. – С. 62-64

113.Лиханов, В.А. Улучшение экологических и эффективных показателей дизеля Д-120 путем применения этанола [Текст] / В.А. Лиханов, А.В. Россохин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2016. - № 10 (115). - С. 26-28.

114.ГОСТ ISO 8178-4-2013. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах [Текст]. - М.: Стандартиформ, 2014. - 23 с.

115.ГОСТ Р 41.49-2003 (Правила ЕЭК ООН № 49). Единообразные предписания, касающиеся сертификации двигателей с воспламенением от сжатия и двигателей, работающих на природном газе, а также двигателей с принудительным зажиганием, работающих на сжиженном нефтяном газе, и транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия, двигателями, работающими на природном газе, и двигателями с принудительным зажиганием, работающими на сжиженном нефтяном газе, в отношении выбросов вредных веществ [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2004. - 180 с.

116.Распоряжение Правительства РФ «Экологическая доктрина Российской Федерации» [Текст]: утв. 31.08.2002 г. - № 1225-р.

117.ГОСТ Р 41.24-2003 (Правила ЕЭК ООН №24). Единообразные предписания, касающиеся сертификации двигателей с воспламенением от сжатия в отношении дымности; сертификации автотранспортных средств в отношении установки на них двигателей с воспламенением от сжатия, сертифицированных по типу конструкции; сертификации автотранспортных средств с двигателями с воспламенением от сжатия в

отношении дымности; измерения мощности двигателей [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2004. - 36 с.

118.ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН №96). Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2011. - 65 с.

119.ГОСТ 17.2.2.05-97. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения выброса вредных веществ с отработавшими газами дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1998. – 13 с.

120.ГОСТ 17.2.2.02-98. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1998. - 13 с.

121.ГОСТ Р 41.83-2004 (Правила ЕЭК ООН №83). Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2004. - 181 с.

122.ГОСТ 17.2.2.01-84. Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 11 с.

123.Программа по расширению использования КПП в качестве моторного топлива на собственном транспорте организаций группы Газпром на 2014-2017 годы [Текст]: утв. Приказом ОАО «Газпром» 14.07.2014 г. - № 338.

124.Распоряжение правительства Российской Федерации «О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива» [Текст]: утв. 13.05.2013 г. - № 767-р.

125.Васидов, А.Х., Калауов, С.А., Базаров, Б.И. Системное представление перевода и эксплуатации транспортных средств с дизелями на питание природным газом [Текст] / А.Х. Васидов, С.А. Калауов, Б.И. Базаров // European Science. - 2016. - №3 (13). – С. 39-43.

126.Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении [Текст] / Я.Б. Зельдович, П.А. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. - М. - Л.: АН СССР, 1947. - 148 с.

127. Семёнов, Н.Н. Развитие цепных реакций и теплового воспламенения [Текст] / Н.Н. Семёнов. - М.: Знание, 1969. - 94 с.
128. Сигал, И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива [Текст] / И.Я. Сигал. - 2-е изд. перераб. и доп. - Л.: Недра, 1988. - 312 с.
129. Батурин, С.А. Исследование процессов образования окислов азота в быстроходном дизеле автотракторного типа [Текст] / С.А. Батурин, А.С. Лоскутов, Ж.К. Алин // Рабочие процессы и усовершенствование теплотехнических устройств и электрических систем: сб. науч. тр. - Алма-Ата: КазПИ, 1981. - Вып. 13. - С. 68-73.
130. Нашленас, Э. Моделирование процесса образования вредных веществ при сгорании углеводородного топлива [Текст] / Э. Нашленас, В.И. Смайлис. - Вильнюс: ИФ АН Лит. ССР, 1983. - 26 с.
131. Отс, А.А. Образование окислов азота из жидкого топлива [Текст]: сб науч. тр. / А.А. Отс, Д.М. Егоров, К.Ю. Саар. - Таллинн: ТПИ, 1978. - № 450. - С. 78-93.
132. Померанцев, В.В. Вопросы борьбы с загрязнением атмосферы [Текст] / В.В. Померанцев, Д.В. Ахмедов // Проблемы охраны и рациональное использование природных ресурсов. - Л., 1975. - С. 33-37.
133. Khan, J.M. Factors affecting smoke and gaseous emissions from direct injection engines and a method of calculation [Text] / J.M. Khan, G. Greeves, C.H. Wang // SAE Techn. Pap. Ser. - 1973. - № 730169. - 23 p.
134. Lugas, G.C. Off-stoichiometry operation of an sienginea model of formation and control of nitric oxide [Текст] / G.C. Lugas, K.S. Varde // SAE Techn. Pap. Ser. - 1976. - № 750352. - 9 p.
135. Ветрова, Н.В. Приближённая теория образования окислов азота в топках парогенераторов [Текст] / Н.В. Ветрова, В.В. Померанцев, Л.Т. Дульнева // Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды: сб. науч. тр. - Л.: ЛПИ, 1977. - Вып. 2. - С. 38-40.
136. Сигал, И.Я. К вопросу образования окислов азота в процессах горения [Текст] / И.Я. Сигал // Образование окислов азота в процессах горения и пути снижения выброса их в атмосферу: сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1979. - С. 3-7.
137. Сигал, И.Я. Образование окислов азота при сжигании топлива [Текст] / И.Я. Сигал // Окислы азота в продуктах сжигания топлив: сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1981. - С. 3-16.

138.Lavoie, G.A. Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines [Text] / G.A. Lavoie, J.B. Heywood, J.C. Keck // Combustion science and technology. - 1970. - V. 1. - № 4. - P. 313-326.

139.Pattas, K. Stickoxidbildung bei der Ottomotorischen Verbrennung [Text] / K. Pattas, G. Häfner // MTZ. - 1973. - Bd. 34. - №12. - S. 397-404.

140.Fenimore, C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. [Text] / C.P. Fenimore. - P. 2. - Pittsburgh: Combustion inst., 1971. - 102 p.

141.Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст] / Д.А. Франк-Каменецкий. - М.: Наука, 1967. - 367 с.

142.Бочков, М.В. Химическая кинетика образования оксидов азота при горении [Текст] / М.В. Бочков, Л.А. Ловачев, Б.И. Четвертушкин. - М.: Наука, 1974. - 146 с.

143.Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений [Текст] / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. - 2-е изд. доп. - М.: Наука, 1966. - 688 с.

144.Райзер, Ю.П. Образование окислов азота в ударной волне при сильном взрыве в воздухе [Текст] / Ю.П. Райзер // Журнал физической химии. - 1959. - Т. 33. - № 3. - С. 700-710.

145.Салова, Т.Ю. Экологический мониторинг окружающей среды при эксплуатации автотракторной техники [Текст] / Т.Ю. Салова. - С.-Петербург: Индикатор, 1998. - 80 с.

146.Теснер, П.А. Кинетика образования пироуглерода из ацетиленов [Текст] / П.А. Теснер, А.Е. Городецкий, Э.Ф. Арефьева // Кинетика и катализ. - 1980. - Т. 21. - С. 274-276.

147.Нельсон, Н. Образование окиси азота при горении [Текст] / Н. Нельсон // Ракетная техника и космонавтика. - 1976. - Т. 14. - № 9. - С.30-36.

148.Sofke S., Eggers J., Greve M. Контроль выбросов NO_x в мощных газовых двигателях по давлению в цилиндре (материалы конгресса СИМАС 2010) [Текст] / S. Sofke, J. Eggers, M. Greve // Двигателестроение. – 2012. - №3 (249). – С.40-51.

149.Лавров, Н.В. Физико-химические основы процесса горения топлива [Текст] / Н.В. Лавров. - М.: Наука, 1971. - 272 с.

150.Шоу, Г. Уменьшение выбросов окислов азота из газотурбинной камеры в результате модификации топлива [Текст] / Г. Шоу // Энергетические машины и

установки. - М.: Мир, 1973. - №4. - С.87-94.

151.Malte, P.C. The role of energy-releasing kinetics in NO_x formation: fuel-lean jet-stirred CO - air combustion [Text] / P.C. Malte, D.T. Pratt // Combustion science and technology. - 1974. - V.9. - № 5/6. - P.221-231.

152.Haynes, B.S. The behavior of nitrogen species in fuel rich hydrocarbon flames [Text] / B.S. Haynes, D. Iverach, N.J. Kirov // 15-th Symposium of combustion Tokyo. - Pittsburgh, 1974. - P.1103-1112.

153.Бурико, Ю.Я. Влияние подмешивания воздуха к горючему газу на образование окислов азота в турбулентном диффузионном факеле [Текст] / Ю.Я. Бурико, В.П. Кузнецов. - ФГВ. - 1980. - Т.16. - №4. - С.60-67.

154.Сигал, И.Я. Образование окислов азота при ламинарном и турбулентном горении [Текст] / И.Я. Сигал, Н.А. Гуревич, Е.М. Лавренцов // Теория и практика сжигания газа. - Л.: Недра, 1975. -Т. 4. - С. 513-521.

155.Fenimore, C.P. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames [Text] / C.P. Fenimore // Combustion and flame. - 1972. - V. 19. - № 2. - P. 289-296.

156.Malte, P.C. Hydroxyl radical and atomic oxygen concentrations in high-intensity turbulent combustion [Text] / P.C. Malte, S.C. Schidt, D.T. Pratt // 16-th Symposium of combustion. - Pittsburgh: Combustion inst, 1967. - P. 145-155.

157.Сигал И.Я. Исследование минимального выхода окислов азота в пламенах метана, окиси углерода и водорода // Использование газа в народном хозяйстве. -1980. - № 2. - С. 23-27.

158.Eyzat, P. A new look at nitrogen oxides formation in internal combustion engines [Text] / P. Eyzat, J.C. Guibet // SAE Techn. Pap. Ser. - 1968. - № 680124. - 17 p.

159.Winfried, B. Untersuchungen der Nichtgleichgewichtsvorgänge der Raum von Verbrennungsmotoren ablaufenden Stickoxidreaktionen [Text] / B. Winfried // Staub - Keimhaltung der Luft. - 1971. - Bd. 31 - № 7. - S. 279-282.

160.Атрощенко, В.И. Курс технологии связанного азота [Текст] / В.И. Атрощенко, А.М. Алексеев, А.П. Засохин. - М.: Химия, 1969. - 383 с.

161.Боженок, Е.И. Исследование способов организации рабочего процесса малотоксичного дизеля [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Боженок Евмен Илларионович. - Л.,1979. - 182 с.

162.Влияние альтернативного процесса впрыскивания топлива на локальные

образования оксидов азота и сажи в камере сгорания дизеля [Текст] / Р.З. Кавтарадзе, Д.О. Онищенко, И.А. Зиновьев [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. - 2016. - №5. - С.152-159.

163.Влияние формы полуразделенной камеры сгорания на образование оксидов азота в газовом двигателе [Текст] / Р.З. Кавтарадзе, Д.О. Онищенко, А.С. Голосов, А.В. Шибанов // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - №5 (53). – С. 31-39.

164.Ловачев, Л.А. Кинетика образования NO_x в метановоздушных пламенах [Текст] / Л.А. Ловачев // Химическая физика. - 1983. - № 8 - С. 1085-1091.

165.Росляков, П.В. Расчёт образования топливных оксидов азота при сжигании азотосодержащих топлив [Текст] / П.В. Росляков // Теплоэнергетика. - 1986. - № 1. - С. 37-41.

166.Miller, J.A. A chemical kinetic model for the selective reduction of nitric oxide by ammoniac [Text] / J.A. Miller, M.C. Branch, R.J. Keck // Combustion and flames. - 1981. - V.43. - №1. - P. 81-98.

167.Harries, R.S. A formation on oxides of nitrogen in high temperature $\text{CH}_4\text{-O}_2\text{-N}_2$ -flame [Text] / R.S. Harries, M. Nasfall, A. Williams // Combustion science and technology. - 1976. - № 4. - P. 85-94.

168.Bachmaier, F. The formation of nitric oxide and the detection of HCN in premixed hydrocarbon - air flames at atmosphere [Text] / F. Bachmaier, K. Eberins, T. Just // Combustion science and technology. - 1978. - V. 7. - P. 77-84.

169.Miyanchi, T. A stade of nitric oxide formation in fuel-rich hydrocarbon flames role of cyanide species H, OH and O [Text] / T. Miyanchi, J. Mori, A. Imamura // 16-th Symposium of combustion. - Pittsburgh: Combustion inst., 1976. - P. 1073-1082.

170.Sataronis, J. Prediction of propagating laminar flames in methane oxygen nitrogen mixtures [Text] / J. Sataronis // Combustion and flames. - 1978. - V. 33. - P. 217-239.

171.Matsui, J. Spectroscopes study of prompt nitrogen oxide formation mechanism in hydrocarbon - air flames [Text] / J. Matsui, T. Nomaguchi // Combustion and flame. - 1978. - V. 32. - P. 205-214.

172.Крыжановский, В.Н. Динамика образования окиси азота в низкотемпературной области нормального фронта [Текст] / В.Н. Крыжановский, И.Я. Сигал // Распределение и сжигание газа. - Саратов: СПИ, 1977. - Вып. 3. - С. 48-53.

173.Сигал, А.И. Предотвращение образования диоксида азота в отопительных

котлах [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: Сигал А.И. - Л., 1985. - 24 с.

174.Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени [Текст] / Н.А. Чигир, Р.Д. Вейнберг, К.Т. Боумэн [и др.]; пер. с англ.; под ред. Ю.Ф. Дитякина. - М.: Машиностроение, 1981. - 407 с.

175.Варнатц, Ю. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. - М.: Физматлит, 2003. – 351 с.

176.Fenimore, C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames [Text] / C.P. Fenimore // 13-th. symposium of combustion. - Pittsburgh: Combustion inst, 1971. - P. 373-380.

177.Homer, J.B. Nitric oxide formation and radical overshoot in premixed hydrogen flames [Text] / J.B. Homer, M.M. Sutton // Combustion and flames. - 1973. - V. 20. - № 1. - P. 71-75.

178.Нго-Дык-Лам. Исследование условий образования окислов азота и бенз(α)пирена в камерах сгорания [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: Нго-Дык-Лам. - Л., 1980. - 154 с.

179.Отс, А.А. О факторах, влияющих на образование окислов из азота топлива [Текст] / А.А. Отс, Д.М. Егоров, К.Ю. Саар: сб науч. тр. - Таллинн: ТПИ, 1978. - № 466. - С. 43-50.

180.Elagan, R.S. Rate Constrained partial equilibrium model for formation of nitric oxide from organic fuel nitrogen [Text] / R.S. Elagan, S. Galant, J.P. Appleton // Combustion and flame. - 1974. - V.12. - № 3. - P. 299-311.

181.Hazard, H.R. Conversion of fuel nitrogen to NO_x in a compact combustor [Text] / H.R. Hazard // Trans. of the ASME. - 1974. - V.96. - № 3. - P.185-188.

182.Конюхов, В.Г. Изучение условий образования бенз(α)пирена и окислов азота и усовершенствование методов их определения в продуктах сгорания газомазутных парогенераторов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.01 / Конюхов Владимир Григорьевич. - Ташкент, 1978. - 229 с.

183.Haynes, B.S. The role of fuel nitrogen in nitric oxide formation [Text] / B.S. Haynes, D. Iverach, N.J. Kirov. - Austral. Chem. Process and Eng. - 1974. - V.27. - №5. - P.21-28.

184.Kaizer, E. Zim Einflub des in Heizolen gebundenen Stikstoffs auf die Stickoxide-

mission [Text] / E. Kaizer // *Energietechnik*. - 1979. - Bd.29. - № 2. - S.61-63.

185. Саблина, З.А. Состав и химическая стабильность топлив [Текст] / З.А. Саблина. - М.: Химия, 1972. - 280 с.

186. Добрянский, А.Ф. Геохимия нефти [Текст] / А.Ф. Добрянский. - М.: Гостотехиздат, 1961. - 382 с.

187. Чертков, Я.Б. Моторные топлива [Текст] / Я.Б. Чертков. - Новосибирск: Наука, 1987. - 208 с.

188. Христинич, В.А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды [Текст] / В.А. Христинич, А.Г. Тумановский - Киев: Техника, 1983. - 144 с.

189. Введенский, А.А. Термодинамические расчёты нефтехимических процессов [Текст] / А.А. Введенский. - Л.: Гостотехиздат, 1960. - 576 с.

190. Turner, D.W. Influence of combustion modification and nitrogen content on nitrogen oxides emissions from fuel combustion [Text] / D.W. Turner, R.L. Andrews, G.W. Siegmund // *Combustion and flame*. - 1972. - V.44. - №2. - P.21-30.

191. Siegmund, G.W. NO_x emission from industrial boilers: potential control methods [Text] / G.W. Siegmund, D.W. Turner // *Trans. of the ASME*. - 1974. - № 1. - P.185-198.

192. Desolte, G. Overall reaction rates of NO and NO₂ formation from fuel nitrogen [Text] / G. Desolte // *15-th Symposium of combustion Tokyo*. - Pittsburgh, 1974. - P.1093-1102.

193. Kaskan, W.E. Mechanism of decay of ammonia in flame gases from an NH-O flame [Text] / W.E. Kaskan, D.E. Huynes // *Combustion and flames*. - 1973. - V. 20. - № 3. - P. 381-389.

194. Кулешов, А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А.С. Кулешов, Л.В. Грехов. - М.: МГТУ, 2000. - 64 с.

195. Смайлис В.И. Теоретические и экспериментальные основы создания малотоксичных дизелей [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Смайлис В.И. - Л., 1988. - 464 с.

196. Звонов, В.А., Козлов, А.В. Модель образования оксидов азота в цилиндрах двигателя с искровым зажиганием [Текст] // *Труды НАМИ*. - 2002. №230. - С.69-85.

197. Звонов, В.А., Теренченко, А.С. математическая модель процесса сгорания и образования NO_x в дизеле с добавкой испаренного метанола на впуск [Текст] //

Приводная техника. - 2003. - №3. С.10-21.

198.Кульчицкий, А.Р. Токсичность поршневых ДВС. Образование вредных веществ при горении топлив [Текст]. – Владимир: Владимирский гос. ун-т., 2010. – 79 с.

199.Фурса, В.В. Исследование образования окислов азота в цилиндре дизеля [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Фурса Владимир Васильевич. - Харьков, 1977. – 24 с.

200.Онищенко, Д.О. Трехмерное моделирование рабочего процесса среднеоборотного дизеля и его применение для анализа возможности снижения концентрации оксидов азота в отработавших газах путем изменения формы камеры сгорания [Текст] / Д.О. Онищенко, С.А. Панкратов, В.А. Рыжов // Тепловые процессы в технике. – 2016. - №6. - С. 264-271.

201.Новиков, Л.А. Моделирование рабочего процесса и эмиссии окислов азота (NO_x) малотоксичного дизеля с рециркуляцией отработавших газов, обогащённых кислородом [Текст] / Л.А. Новиков, Н.А. Вольская, Г. Хинчук // Двигателестроение. - 1996. - № 1. - С. 13-18.

202.Мехтиев, Р.И. Исследование рабочих процессов и токсичности двигателей с послойным зарядом и форкамерно-факельным зажиганием [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Мехтиев Рафик Исрафил Оглы. - Баку, 1981. - 480 с.

203.Свиридов, Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях [Текст] / Ю.Б. Свиридов. - Л.: Машиностроение, 1972. - 244 с.

204.Махов, В.З. Об особенностях процесса образования окиси азота при диффузионном сгорании [Текст] / В.З. Махов // Эффективность ДВС: сб. науч. тр. - М.: ВЗМИ, 1981. - С. 97-101.

205.Николаенко, А.В. Моделирование кинетики образования оксидов азота в дизелях [Текст] / А.В. Николаенко, Т.Ю. Салова // Двигателестроение. - 1998. - № 1. - С. 35-37.

206.Салова, Т.Ю. Моделирование процессов нейтрализации оксидов азота в различных условиях сгорания топлива [Текст] / Т.Ю. Салова // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 84-89.

207.Моделирование образования оксидов азота в цилиндре двс при локальном расслоении топливовоздушной смеси [Текст] / Е.А. Захаров, В.А. Звонов, Г.Н. Злотин [и

др.] // Приводная техника. - 2001. - №4. - С.56-60.

208.Горбатенков, А.И. Оптимизация режимов работы дизеля с целью снижения оксидов азота в отработавших газах [Текст] / А.И. Горбатенков, Т.Ю. Салова // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2000. - С. 61-67.

209.Николаенко, А.В. Математическая модель образования и методика расчёта концентрации оксидов азота в дизелях [Текст] / А.В. Николаенко, Т.Ю. Салова // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. - С.-Петербург: СПбГАУ, 1999. - С. 15-26.

210.Новиков, Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей [Текст] / Л.А. Новиков // Двигателестроение. - 2002. - № 2. - С. 23-27.

211.Новиков, Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей (продолжение) [Текст] / Л.А. Новиков // Двигателестроение. - 2002. - № 3. - С. 32-34.

212.Малов, Р.В. Кинетика воспламенения и горения бинарных спиртовых топлив в дизелях [Текст] / Р.В. Малов, И.В. Ксенофонтов // Двигателестроение. - 1986. - № 3. - С. 55-57.

213.Звонов, В.А., Гиринович, М.П. Исследование механизмов образования оксидов азота в условиях камеры сгорания [Текст] // Двигатели внутреннего сгорания. - 2008. - №1. - С.29.

214.Аття, А.М.А., Кульчицкий, А.Р. Влияние структуры водотопливной эмульсии на экологические и экономические показатели дизеля [Текст] / А.М.А. Аття, А.Р. Кульчицкий // Двигателестроение. – 2012. - № 3 (249). – С. 16-20.

215.Muzio, L.J. The effect of temperature variation in the engine combustion chamber on formation and emission of nitrogen oxides [Text] / L.J. Muzio, E.S. Starkman, L. Carretto // SAE Techn. Pap. Ser. - 1971. - №710158. - 11p.

216.Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В.Е. Алемасов. - М.: Оборонгиз, 1962. - 478 с.

217.Семёнов, Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности [Текст] / Н.Н. Семёнов. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1958 - 690 с.

218.Автомобильный транспорт и защита окружающей среды [Текст] / Р.В. Малов,

В.И. Ерохов, В.А. Щетинин [и др.]. - М.: Транспорт, 1982. - 200 с.

219. Ксандопуло, Г.И. Химия газофазного горения [Текст] / Г.И. Ксандопуло, В.В. Дубинин. - М.: Химия, 1987. - 240 с.

220. Полак, Л.С. Вычислительные методы в химической кинетике [Текст] / Л.С. Полак, М.Я. Гольденберг, А.А. Левицкий. - М.: Наука, 1984. - 280 с.

221. Сполдинг, Д.В. Конвективный массоперенос [Текст] / Д.В. Сполдинг; пер. с англ. З.П. Шульмана; под ред. А.В. Лыкова. - М.-Л.: Энергия, 1965. - 384 с.

222. Химия горения [Текст] / У. Гардинер [и др.]; пер. с англ.; под ред. У. Гардинера. - М.: Мир, 1988. - 464 с.

223. Гаврилов, В.В. Математическое моделирование предпламенных процессов в дизеле с объёмным смесеобразованием [Текст] / В.В. Гаврилов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. тр. Межд. науч.- техн. конф. - СПб.: СПбГАУ, 2002. - С. 338-394.

224. Физико-химические процессы в газовой динамике [Текст]: справочник. - Том 2: Физико-химическая кинетика и термодинамика / Под ред. ГГ. Чёрного и С.А. Лосева. - М.: Научно-исследовательский центр механики. - 2002. - 368 с.

225. Разлейцев, Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях [Текст] / Н.Ф. Разлейцев. - Харьков: Вища школа, 1980. - 169 с.

226. Семенов Н.Н. Цепные реакции [Текст] / Н.Н. Семенов. - Л.: ОНТИ, Госхимтехиздат, 1934. - 555 с.

227. Салова, Т.Ю. Моделирование и исследование процессов образования и нейтрализации оксидов азота дизелей [Текст] / Т.Ю. Салова. - С.-Петербург: Индикатор, 1998. - 80 с.

228. Создание систем топливоподачи для перспективных дизелей [Текст] / Ryouta Minamino, Такао Kawabe, Hiroshi Omote, Shusuke Okada // Двигателестроение. - 2014. - № 3 (257). - С. 44-51.

229. Синявский, В.В. Форсирование двигателей системы и агрегаты наддува [Текст]: учебное пособие / В.В. Синявский, И.Е. Иванов - М.: МАДИ, 2016. - 112 с.

230. Марков, В.А., Шатров, В.И. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок и тенденции их совершенствования // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. - 2016. - №5 (110). - С.96-116.

231.Грехов, Л.В. Перспективная топливоподающая аппаратура для реализации малотоксичного рабочего процесса дизелей [Текст] / Л.В. Грехов, А.А. Денисов, Е.Е. Старков // World science: Problems and innovations: сб. статей победителей V межд. науч.-пр. конф. - Пенза, 2016. – С.46-57.

232.Николаенко, А.В. Состояние и некоторые пути улучшения экологических показателей сельскохозяйственных тракторов [Текст] / А.В. Николаенко, Т.Ю. Салова, В.С. Шкрабак // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 57-58.

233.Ермолович, И.В. Перспективный малотоксичный дизель с двухстадийным способом смесеобразования [Текст] / И.В. Ермолович, Н.И. Носков, В.Е. Тимофеев // Тракторы и сельхозмашины. - 2001. - № 2. - С. 20-22.

234.Катализаторы горения для бензинов и дизельных топлив [Текст] / Д.В. Сердюк, В.В. Сердюк, Л.А. Ашкинази, А.М. Данилов // Автомобильная промышленность. - 2001. - № 5. - С. 23-24.

235.Улучшение экологических показателей дизелей путём улучшения качества топлива [Текст] / А.В. Николаенко, А.П. Картошкин, Д.В. Сердюк [и др.] // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 64-70.

236.Фомин, В.М. Совершенствование эколого-экономических показателей дизелей [Текст] / В.М. Фомин // Грузовик &. - 2001. - № 5. - С. 30-32.

237.Лопатин, О.П. Влияние режимных факторов и применения альтернативного топлива на содержание оксидов азота в дизельных двигателях [Текст] / О.П. Лопатин, А.С. Гребенев // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения: матер. межд. науч.-практ. конф.. - Вып. IX. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2007. - С. 385-390.

238.Расчетные исследования впрыскивания и распыливания топлива в двигателе с НССИ-процессом [Текст] / В.С. Акимов, А.С. Кулешов, В.А. Марков [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. - 2015. - №6 (105). - С.82-95.

239.HCCI in a CRF Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling [Text] / D. Flowers, S. Aceves, R. Smith [et al.] // SAE Technical Paper Series. – 2000. - №2000-01-

0328. - P.1-13.

240.Experimental Study on HCCI Combustion of Dimethyl Ether (DME). Methanol Dual-Fuel. [Text] / Z. Zheng, M. Yao, Z. Chen [et al.] // SAE Technical Paper Series/ - 2004. - №2004-01-2993. - P.1-9.

241.Кавтарадзе, Р.З., Зиновьев, И.А. Влияние частичной гомогенизации процесса сгорания на экологические показатели дизеля [Текст] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. - 2016. - №4 (109). - С.113-127.

242.Концепция и разработка перспективных конструкций форсунок аккумуляторного типа для среднеоборотных дизелей [Текст] / Л.В. Грехов, А.А. Денисов, Е.Е. Старков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2017. №10 (691). - С.43-51.

243.Перспективы применения клапана регулировки начального давления в топливной аппаратуре автотракторного дизеля [Текст] / А.А. Савастенко, Э.А. Савастенко, Л.В. Лепетан [и др.] // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2017. Т.16. - №8. - С.366-368.

244.Современные методы и средства снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей [Текст] / В.А. Оберемок, А.В. Жученко, А.М. Аванесян [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2016. - №123. - С. 727-741.

245.Анализ методов, обеспечивающих выполнение экологических требований транспортными дизелями [Текст] / А.Ю. Дунин, М.Г. Шатров, Л.Н. Голубков [и др.] // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). - 2017. - №3 (50). - С.62-69.

246.Lazarev, E.A., Matculevich, M.A., Lazarev, V.E. Performance evaluation of compression-to-combustion transition process in diesel engine cylinder [Text] // Procedia Engineering "International Conference on Industrial Engineering ICIE 2017", 2017. - P.44-49.

247.Бердников, А.А. Процессы, происходящие в двигателе с нетрадиционным рабочим циклом [Текст] // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2017. - №2 (32). - С.2-7.

248.Васильев, А.В., Ларцев, А.М. Улучшение показателей тракторного дизеля на основе использования узлов и агрегатов высокого технического уровня [Текст] //

Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. - 2016. - №4 (23). - С. 40-46.

249. Effects of a nanoceria fuel additive on the physicochemical properties of diesel exhaust particles [Text] / J. Zhang, L. He, J. Gong [et al.] // Environmental Sciences: Processes and Impacts. - 2016. - V.18. - №10. - P.1333-1342.

250. Звонов, В.А., Макаров, Н.А. Активирование топлива внешними физическими воздействиями и его влияние на рабочий процесс ДВС [Текст] // Автомобильная промышленность. - 2008. - №11. - С.26-28.

251. Давыдов, Н.А., Джерихов, В.Б., Новожилова, А.В. Присадки к топливу, уменьшающие дымность и токсичность отработавших газов дизельных двигателей [Текст] // Мир транспорта и технологических машин. - 2016. - №2 (53). - С.105-109.

252. Повышение экологичности дизелей путем внутрицилиндровой нейтрализации токсических веществ отработанных газов [Текст] // И.В. Парсаданов, Н.Д. Сахненко, В.А. Хижняк [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. - 2016. - №2. - С.63-67.

253. Салова, Т.Ю. Разработка систем снижения вредных выбросов на неустановившихся режимах работы двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Т.Ю. Салова, Н.А. Усачев // Известия Международной академии аграрного образования. - 2015. - №21. - С. 28-31.

254. Кукис, В.С., Омельченко, Е.А. Повышение экономических показателей дизеля с рециркуляцией отработавших газов и их охлаждением с помощью вихревой трубы [Текст] // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. - 2016. - V.9. - №3. - P.44-55.

255. Черников, О.Н. Применение систем рециркуляции для снижения токсичности отработавших газов дизеля [Текст] // Актуальные проблемы аграрной науки и пути их решения: сб. научн. тр. - Кинель, 2016. - С. 429-432.

256. Influence of exhaust gas recirculation on technical, economic, and environmental performance of high-uprated diesel aircraft engine [Text] / V.M. Gureev, A.K. Khairullin, F.A. Varlamov [et al.] // Russian Aeronautics. - 2016. - V.59. - №4. - P.554-558.

257. Effect of lignin-derived cyclohexanol on combustion, performance and emissions of a direct-injection agricultural diesel engine under naturally aspirated and exhaust gas recirculation (EGR) modes [Text] / B. Rajesh Kumar, R. Niranjana Kumar, S. Saravanan [et al.] // Fuel. - 2016. - V.181. - P.630-642.

258. Swaminathan, C., Sarangan, J. A comprehensive study on reduction of nox emis-

sion applying egr technique in a diesel engine using biodiesel (pome) as fuel with ether-based additives [Text] // International Journal of Ambient Energy. - 2017. - V.38. - №8. - P.834-843.

259. Study of a diesel engine performance with exhaust gas recirculation (EGR) system fuelled with palm biodiesel [Text] / M.H.M. Yasin, R. Mamat, A.F. Yusop [et al.] // Energy Procedia. "1st International Conference on Energy and Power ICEP 2016", 2017. - P.26-31.

260. Optimal performance and emissions of diesel/hydrogen-rich gas engine varying intake air temperature and egr ratio [Text] / H.W. Wu, T.T. Hsu, J.Y. He [et al.] // Applied Thermal Engineering. - 2017. - V.124. - P.381-392.

261. Experimental and numerical study on nox formation in CH₄-air mixtures diluted with exhaust gas components [Text] / A.C.A. Lipardi, P. Versailles, J.M. Bergthorson [et al.] // Combustion and Flame. - 2017. - V.179. - P.325-337.

262. Various strategies for reducing nox emissions of biodiesel fuel used in conventional diesel engines: a review [Text] / J. Jeevahan, G. Mageshwaran, G.B. Joseph [et al.] // Chemical Engineering Communications. - 2017. - V.204. - №10. - P.1202-1223.

263. Кочетков, А.С., Ильиных, В.Д. Влияние системы рециркуляции отработавших газов на экологические показатели дизельного двигателя [Текст] // Транспортные и транспортно-технологические системы материалы международной научно-технической конференции, 2017. - С.266-269.

264. Формирование требований к характеристике впрыскивания высокооборотного дизеля в целях снижения токсичности [Электронный ресурс] / Н.С. Маластовский, Ф.Б. Барченко, Л.В. Грехов [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2017. - №3 (63). - С.10.

265. Аболтин, Э.В. Моделирование характеристик дизельного двигателя с турбонаддувом и различными схемами рециркуляции газов [Текст] / Э.В. Аболтин, В.К. Ванин, Д.С. Тимофеев // Труды НАМИ. - 2015. - №262. - С. 113-125.

266. Effect of exhaust gas recirculation rate on the emissions of persistent organic pollutants from a diesel engine [Text] / S. Chen, K. Cui, J. Zhu [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. - 2019. - V.19. - №4. - P. 812-819.

267. Оценка термохимической активности отработавших газов в задачах моделирования регулируемого самовоспламенения в двигателе внутреннего сгорания [Текст] / Г.Л. Агафонов, П.А. Власов, А.М. Тереза, О.Б. Рябиков // Горение и взрыв. - 2016. - Т.9. - №1. - С. 67-73.

268. Толшин, В.И. Регулирование рециркуляции отработавших газов судового среднеоборотного дизеля [Текст] / В.И. Толшин, С.В. Кирпиченков // Двигателестроение. - 2002. - № 3. - С. 36-38.

269. Истомин, С.В. Новые направления повышения экологической безопасности ДВС [Текст] / С.В. Истомин, В.А. Стрельников // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. - С.-Петербург: СПбГАУ, 2002. - С. 191-192.

270. Jabłońska, M., Palkovits, R. It is no laughing matter: nitrous oxide formation in diesel engines and advances in its abatement over rhodium-based catalysts [Text] // Catalysis Science and Technology. - 2016. - V.6. - №21. - P.7671-7687.

271. Онищенко, И.А. О моделировании химической кинетики на макро и нано уровнях в задачах нейтрализации отработавших газов автотранспорта [Текст] / И.А. Онищенко, В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты. - 2016. - №3 (19). - С. 30-34.

272. Анализ методов и средств экологического контроля выбросов вредных веществ отработавших газов автомобилей [Текст] / В.А. Соломин, А.В. Шабанов, А.А. Шабанов [и др.] // Известия Московского государственного технического университета. - 2016. - №4 (30). - С. 82-89.

273. Каменев, В.Ф. Принципы построения математической модели современного малотоксичного дизеля для транспортно-технологических средств и сельхозмашин [Текст] / В.Ф. Каменев, П.А. Щеглов // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - №1. - С.3-8.

274. Применение накопительных нейтрализаторов оксидов азота для снижения токсичности отработавших газов тракторных дизелей [Текст] / В.Н. Каминский, А.В. Лоик, А.Ю. Титченко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. №11. С. 3-7.

275. Лунева, Д.А. Совершенствование экологичности дизельных двигателей [Текст] // Аллея науки. - 2017. - Т.2. - №14. - С.292-308.

276. К теории силовой очистки отработавших газов дизельных двигателей от сажевых частиц / А.А. Аукин, А.М. Аванесян, Н.Г. Леонтьев [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2017. - №127. - С.836-848.

277. Новоселова, Т.В. Влияние компонентов руды титана на структуру каталитического материала в нейтрализаторах, используемых для очистки

отработавших газов [Текст] / Т.В. Новоселова, Г.В. Медведев, Н.Н. Горлова // Инновационные технологии в науке и образовании. - 2016. - №1-2 (5). - С. 90-94.

278.Болдырев, И.В. Нейтрализатор отработавших газов двигателей внутреннего сгорания на базе цементосодержащих катализаторов [Текст] / И.В. Болдырев, Т.Н. Смирнова, Е.З. Голосман // Двигателестроение. - 1998. - № 2. - С. 40-41.

279.Колегов, Д.Ю. Жидкостная система очистки выхлопных газов дизельного двигателя [Текст] / Д.Ю. Колегов, И.А. Зотов // Автотранспортное предприятие. - 2016. - №6. – С. 45-46.

280.Каталитический нейтрализатор с пористыми, проницаемыми каталитическими блоками [Текст] / А.А. Мельберт, А.А. Новосёлов, А.В. Угнефук [и др.] // Грузовик &. - 2000. - № 11. - С. 10-11.

281.Воробьев-Обухов, А.Н. Задержать и уничтожить [Текст] / А.Н. Воробьев-Обухов // За рулем. – 2003 - № 9. – С. 28-30.

282.Жегалин, О.И. Снижение токсичности автомобильных двигателей [Текст] / О.И. Жегалин, П.Д. Лупачев. - М.: Транспорт, 1985. - 120 с.

283.Стрельников, В.А. Повышение экологической безопасности автотракторных дизелей за счет применения электротермокаталитических нейтрализаторов с сажевыми фильтрами [Текст] / В.А. Стрельников // Научное обозрение. - 2016. - № 23. – С. 72-78.

284.Гоголев, Ю.С. Будут сверхчистые Mercedes [Текст] / Ю.С. Гоголев // Автоцентр. - 2004. – № 6. – С. 34-36.

285.Морозов, К.А. Токсичность автомобильных двигателей [Текст] / К.А. Морозов. - М.: Легион-Автодата, 2000. - 80 с.

286.Демидов, А.А. Контроль концентрации аммиака в системах селективного восстановления оксидов азота дизелей [Текст] / А.А. Демидов, Г.Г. Надарейшвили, А.Ю. Титченко // Механика машин, механизмов и материалов. - 2015. №3 (32). - С. 42-46.

287.Николаенко, А.В. Моделирование и создание средств нейтрализации отработавших газов автотракторных дизелей [Текст] / А.В. Николаенко, Т.Ю. Салова // Двигателестроение. - 2000. - № 2. - С. 39-41.

288.Шутилов, А.А. Перспективы использования нового нанокристаллического $V_2O_5/Se-TiO_2$ катализатора восстановления оксида азота аммиаком в выхлопных газах дизельных двигателей автотранспорта [Текст] / А.А. Шутилов, Р.А. Шутилов, Г.А. Зенковец // Современная химическая физика: сб. тезисов XXVIII Симпозиума. – Туапсе,

2016. - С. 141.

289. Кукис, В.С. Определение и обеспечение целесообразного уровня температуры отработавших газов на входе в каталитический нейтрализатор для повышения эффективности его работы [Текст] / В.С. Кукис, Е.А. Омельченко // Sciences of Europe. - 2016. - №5-2 (5). - С. 85-90.

290. Чернецов, Д.А. Эффективность работы комбинированного устройства снижения токсичности отработавших газов дизеля [Текст] Д.А. Чернецов, В.П. Капустин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. - 2014. – Т.7-1 (66). - С. 59-62.

291. Патрахальцев, Н.Н. Оценка показателей экономичности и токсичности выбросов дизеля, регулируемого изменением рабочего объема на режимах малых нагрузок [Текст] / Н.Н. Патрахальцев, П.П. Ощепков, Х. Бехджуйан // Автомобильная промышленность. – 2017. - №1. - С. 8-11.

292. Толшин, В.И. Оценка характера изменения концентрации NO_x при рециркуляции отработавших газов дизеля (по данным испытаний дизеля 6Ч18/22) [Текст] / В.И. Толшин // Двигателестроение. - 2002. - № 1. - С. 32-33.

293. Иванов, А.С. Альтернативное топливо для дизельных двигателей [Текст] / А.С. Иванов, Е.М. Чикишев // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2016. - №2 (107). – С. 14-19.

294. Марков, В.А. Природный газ как наиболее выгодное моторное топливо [Текст] / В.А. Марков, Е.Ф. Поздняков, В.И. Шатров // Автомобильная промышленность. – 2017. - №1. - С. 11-15.

295. Ерохов, В.И. Совершенствование экологических параметров газодизельных автомобилей [Текст] / В.И. Ерохов, И.В. Одинокова // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - №2 (50). – С. 57-66.

296. Булеков, Н.О. Альтернативные моторные топлива для АПК из биологического сырья [Текст] / Н.О. Булеков // Наука без границ. - 2017. - №1 (6). – С. 16-23.

297. Киприянов, Ф.А. Исследование показателей токсичности отработавших газов двигателя внутреннего сгорания при работе на генераторном газе и традиционном топливе [Текст] / Ф.А. Киприянов // Проблемы современной науки и образования. - 2017. - №1 (83). С. 26-29.

298. Егоров, В.А. Применение альтернативных видов топлива и движителей в

России и в мире. Текущее состояние и перспективы [Текст] / В.А. Егоров, А.Н. Ременцов, Е.В. Кулагина // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сб. науч. тр. по материалам 75-ой науч.-методической и науч.-исследовательской конф. - 2017. – М.: МАДИ. – С.73-80.

299.Марков, В.А. Оптимизация состава биотоплив с добавками метиловых эфиров рапсового и подсолнечного масел [Текст] / В.А. Марков, С.Н. Девянин, С.А. Зыков // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - №5 (53). - С. 12-30.

300.Устройство для производства и добавления водорода в топливовоздушную смесь двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Е.М. Овсянников, Т.Б. Гайтова, П.Н. Клюкин, В.Н. Полякова // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - №6 (54). – С. 28-32.

301.Грушников, В.А. Альтернативное топливо? [Текст] / В.А. Грушников // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2016. - №7 (112). – С. 18-25.

302.Корнюшин, В.М. Биодизель – альтернативное топливо для дизелей [Текст] / В.М. Корнюшин, Ю.О. Ручкин, А.В. Солнцев // Инновационные подходы к развитию агропромышленного комплекса региона: матер. 67-ой Межд. науч.-практ. конф. – Рязань: Рязанский ГАУ им. П.А. Костычева, 2016. – С. 111-114.

303.Григораш, К.В. Актуальность использования природного газа как альтернативного моторного топлива [Текст] / К.В. Григораш, О.Р. Митрофанова, В.Г. Кузнецов // Приоритетные научные исследования и разработки: сб. статей Межд. науч.-практ. конф. – Саратов, 2016. – С. 41-43.

304.Бедная, Т.А. Сравнительный анализ альтернативных источников топлива для автомобильного транспорта [Текст] / Т.А. Бедная, И.А. Сероштан, Д.А. Павлов // Современные аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону: Донской ГТУ, 2016. – С. 162-166.

305.Носырев, Д.Я. Газодизель на сжиженном природном газе [Текст] / Д.Я. Носырев, П.А. Кабанов, Р.Г. Валиуллин // Наука и образование транспорту. - 2015. - №1. - С. 23-26.

306.Получение присадок для дизельного топлива, используемого в сельском хозяйстве [Текст] / С.В. Романцова, Б.Т. Алибаев, А.Ю. Корнев, С.А. Нагорнов // Наука в центральной России. – 2017. - №1 (25). – С. 54-62.

307.Кириллов, Н.Г. Водородное топливо для автотранспорта [Текст] / Н.Г. Кириллов // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2016. - №1 (106). – С. 9-14.

308.A predictive Model and Experimental Verification for Droplet size Distribution of Diesel-Metanol-water Emulsion in Sprays [Text] / W. Wand, D. Wu, L. Cheng, J. Yan // His-An Chiao Tung Ta Hsueh. - 2016. – V.50. - №5. P. 65-71.

309.Experimental Investigation of Spray Characteristics of Diesel-Metanol-Water Emulsion [Text] / D. Wu, W. Wand, Z. Pang, S. Cao, J. Yan // Atomization and Sprays. - 2015. – V.25. - №8. – P. 675-694.

310.Lui, J. Effects of Diesel Injection Pressure on the Performance and Emissions of a HD Common-rail Diesel Engine Fueled with Diesel/Methanol dual Fuel [Text] / J. Lui, C. Yao, A. Yao // Fuel. - 2014. – V.140. – P. 192-200.

311.Effects of Methanol-Containing additive on Emission Characteristics from a Heavy-Duty Diesel Engine [Text] / M.R. Chao, T.C. Lin, H.R. Chao [et al.] // The Science of the Total Environment. - 2001. – V.279. - №1-3. P. 167-179.

312.Effects of Methanol-Containing Additive on the Emission of Carbonyl Compounds from a Heavy-Duty Diesel Engine [Text] / H.R. Chao, T.C. Lin, M.R. Chao [et al.]// Journal of Hazardous Materials. - 2000. – V.73. - №1. P. 39-54.

313.Chang, W.R. Environmental impact and Sustainability study on Biofuels for Transportation Applications [Text] / W.R. Chang, J.J. Hwang, W. Wu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2017. – V.67. – P. 277-288.

314.Aydin, F. Effects of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel in Single Cylinder Diesel Engine to engine Performance and Emissions [Text] / F. Aydin, H. Ogut // Renewable Energy. - 2017. – V.103. – P. 688-694.

315.Experimental Study on Evaporation Characteristics of Ethanol-Diesel blend Fuel Droplet [Text] / K. Han, B. Yang, C. Zhao [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. - 2016. – V.70. – P. 381-388.

316.A Semi-detailed chemical Kinetic Mechanism of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) and Diesel blend for Combustion Simulations [Text] / S. Zhang, W. Wu, C.-F. Lee [et al.] // SAE International Journal of Engines. - 2016 – V.9. - №1. - P. 631-640.

317.Datta, A. Impact of Alcohol Addition to Diesel on the Performance Combustion and Emissions of a Compression Ignition Engine [Text] / A. Datta, B.K. Mandal // Applied Ther-

mal Engineering. - 2016 – V.98. - P. 670-682.

318. Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine [Text] / W. Titak, S. Szwaja, K. Lukacs [et al.] // Fuel. - 2015 – V.154. - P. 196-206.

319. Influence of Biofuel Additions on the Ignition Delay of Single Diesel Fuel Drops [Text] / A.K. Kopeika, V.V. Golovko, A.N. Zolotko [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. - 2015 – V.88. - №4. - P. 948-957.

320. Study on Combustion and Emission of Diesel Engine Using Micro-Emulsified Ethanol-Diesel Fuel [Text] / P. Sun, C. Chen, L. Ye, J. Wang // ICMREE 2013 – Proceedings: 2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment. – Chengdou. - 2013. – P. 228-231.

321. Development and Validation of an Environmentally Friendly Attenuated Total Reflectance in the Mid-Infrared Region Method for the Determination of Ethanol Content in used Engine Lubrication Oil [Text] / R.R. Hatanaka, R. Sequinel, C.E. Gualtieri [et al.] // Talanta. - 2013. - V. 109. P. 191-196.

322. Effect of Waste Frying Oil Based Methyl and Ethyl Ester Biodiesel Fuels on the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine [Text] / H. Sanli, M. Canakci, E. Alptekin [et al.] // Fuel. - 2015. - V.159. - P. 179-187.

323. An Overview: Energy Saving and Pollution Reduction by Using Green Fuel Blends in Diesel Engines [Text] / J.K. Mwangi, W.J. Lee, Y.C. Chang [et al.] // Applied Energy. - 2015. V. 159. P. 214-236.

324. Rajesh Kumar, B. Use of Higher Alcohol Biofuels in Diesel Engines: a Review [Text] / B. Rajesh Kumar, S. Saravanan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2016. - V.60. P. 84-115.

325. Thermal Effusivity and Thermal Conductivity of Biodiesel/Diesel and Alcohol/Water Mixtures [Text] / A.O. Guimaraes, F.A.L. Machado, E.C. Da Silva [et al.] // International Journal of Thermophysics. - 2012. – V.33. - №10-11. - P. 1842-1847.

326. Physical and Chemical Properties of Ethanol-Biodiesel Blends for Diesel Engines [Text] / E. Torres-Jimenez, M. Svolsak-Jerman, A. Gregorc [et al.] // Energy and Fuels. - 2010. - V.24. - №3. - P. 2002-2009.

327. Physical and Chemical Properties of Ethanol-Diesel Fuel Blends [Text] / E. Torres-Jimenez, M.S. Jerman, A. Gregorc [et al.] // Fuel. - 2011. - V.90. - №2. - P. 795-802.

328. Gupta, R.B. Gasoline, Diesel and Ethanol Biofuels From Grasses and Plants [Text] /

R.B. Gupta, A. Demirbas. - Cambridge University Press, 2010. – 230 p.

329. Carbonyl Compound Emissions From a Heavy-Duty Diesel Engine Fueled with Diesel Fuel and Ethanol-Diesel Blend [Text] / C. Song, Z. Zhao, G. Lv [et al.] // Chemosphere. - 2010. – V.79. - №11. - P. 1033-1039.

330. Мартынов, В.Г. Природный газ – основа устойчивого развития энергетики [Текст] / В.Г. Мартынов, А.С. Лопатин, В.В. Бессель // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. - 2017. - №1-1 (103). – С. 70-77.

331. К вопросу расширения использования газа в качестве моторного топлива [Текст] / С.В. Дунаев, А.В. Исаев, А.В. Лесин [и др.] // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. - 2017. - №1. – С. 10-14.

332. Марков, В.А. Природный газ как наиболее выгодное моторное топливо [Текст] / В.А. Марков, Е.Ф. Поздняков, В.И. Шатров // Автомобильная промышленность. - 2017. - №1. – С. 11-15.

333. Тойгамбаев, С.К. Перевод дизелей на газовое топливо и эксплуатация газодизеля [Текст] / С.К. Тойгамбаев // Актуальные проблемы современной науки. - 2016. - №3 (88). – С. 211-216.

334. Коммерческие автопарки переходят на природный газ [Текст] // Транспорт Российской Федерации. - 2016. - №1 (62). – С. 16-17.

335. Исследование рабочих процессов в цилиндре газодизеля 4Ч 11,0/12,5: монография [Текст] / В.А. Лиханов, Р.Р. Девятьяров, О.П. Лопатин, П.Н. Вылегжанин. – Киров: Вятская ГСХА, 2004. – 330 с.

336. Природный газ как моторное топливо обладает перспективами космического масштаба [Текст] // Газовая промышленность. - 2015. - № S3 (728). – С. 6-9.

337. На природном газе через всю страну! [Текст] // Транспорт на альтернативном топливе. - 2015. - №6 (48). – С. 10-11.

338. Кириллов, Н.Г. Экология и автотранспорт: о необходимости перехода на природный газ как перспективное моторное топливо [Текст] / Н.Г. Кириллов, А.Н. Лазарев // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2015. - №6. – С. 19-27.

339. На повестке дня – природный газ [Текст] // Газ России. - 2015. - №3. – С. 24-26.

340. Осин, Л. Природный газ автомобильное топливо [Текст] / Л. Осин // Энергия:

экономика, техника, экология. - 2015. - №6. – С. 73-76.

341.Шикунец, М.В. Расширение использования природного газа в качестве моторного топлива на собственном транспорте группы «ГАЗПРОМ» [Текст] / М.В. Шикунец, Д.Б. Самсонов // Газовая промышленность. - 2015. - №S3 (728). – С. 86-87.

342.Концепция создания нового семейства газовых двигателей и двигателей на альтернативных видах топлива [Текст] / П.В. Клишин, А.П. Латышев, В.Н. Коноплев, В.Д. Секерин // Экономические аспекты развития промышленности в условиях глобализации: матер. Межд. науч.-практ. конф. – М.: МАМИ, 2015. – С. 98-102.

343.Гольтяпин, В.Я. Тракторы на газомоторном топливе [Текст] / В.Я. Гольтяпин // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - №2. – С. 3-7.

344.Чикишев, Е.М. Перспективы использования природного газа и приборов его учета на автомобильном транспорте [Текст] / Е.М. Чикишев, А.С. Иванов, И.А. Анисимов // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2015. - №4. – С. 3-9.

345.Чудаков, Г.М. Применение газовых видов топлива для автомобилей [Текст] / Г.М. Чудаков, М.Г. Иванов // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. - 2015. - №3. – С. 65-82.

346.Марков, В.А. Проблемы использования природного газа в качестве моторного топлива для городского автотранспорта [Текст] / В.А. Марков // Грузовик. - 2015. - №4. – С. 6-12.

347.Журавский, М.А. Текущее состояние и перспективы использования СПГ в качестве моторного топлива [Текст] / М.А. Журавский, А.Л. Трибун // Газовая промышленность. - 2015.- №S3 (728). – С. 39-44.

348.Алексей Миллер: Газовый КамАЗ доказал эффективность природного газа в качестве моторного топлива [Текст] // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2015. - №2. – С. 34-35.

349.Батыршин, Р.Р. Автотехника ОАО «КамАЗ» на природном газе [Текст] / Р.Р. Батыршин, А.А. Гатиятов // Транспорт на альтернативном топливе. - 2012. - №1. – С. 42-43.

350.Куприянова, Н.В. Газовый КамАЗ как пример эффективности использования природного газа в качестве моторного топлива [Текст] / Н.В. Куприянова // Газовая промышленность. - 2015.- №S3 (728). – С. 88-90.

351.Бакунов, А.С. Особенности работы дизельного двигателя на компримированном природном газе [Электронный ресурс] / А.С. Бакунов, А.В. Рожко // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: матер. Межд. науч.-практ. конф. – Омск: СибАДИ, 2016. – С. 526-532.

352.Вальехо-мальдонадо, П.Р. Динамика процесса сгорания в дизеле и газодизеле [Текст] / П.Р. Вальехо-мальдонадо, В.Л. Трифонов, В.А. Марков // Автомобильная промышленность. - 2016. - №10. - С. 15-18.

353.Шикунец, М.В. Газомоторный транспорт сегодня [Текст] / М.В. Шикунец, А.Л. Трибун // Газовая промышленность. - 2015. - №S3 (728). – С. 58-63.

354.Пронин, Е.Н. Автомобильный метан прорвался на мировой рынок [Текст] / Е.Н. Пронин, Д. Матич, М. Лахе // Транспорт на альтернативном топливе. - 2011. - №1. – С. 4-9.

355.Дизель, работающий по газодизельному циклу [Текст] / И.А. Куликов, Е.В. Яблоков, А.А. Бердников, С.Н. Казанцев // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2014. - Т.1. – С. 137-139.

356.Яцкевич, Д.Д. Техническое обслуживание автобусов с двигателем, работающим на компримированном природном газе [Текст] / Д.Д. Яцкевич, И.В. Матвиенко, С.Б. Соболевский // Автотранспортное предприятие. - 2016. - №2. – С. 32-37.

357.Дрыгина, Ю.Н. Газомоторный рынок России – метановый вектор [Текст] / Ю.Н. Дрыгина // Транспорт на альтернативном топливе. - 2013. - №6 (36). – С. 8-9.

358.Перспективы использования сжатого природного газа при эксплуатации сельскохозяйственной техники [Текст] / В.П. Коваленко, С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина [и др.] // Наука в центральной России. - 2015. - №5 (17). – С. 62-68.

359.Кульчицкий, А.Р. Перспективы газомоторных тракторов [Текст] / А.Р. Кульчицкий // Сельский механизатор. - 2015. - №8. – С. 16-17.

360.Автомобили с бензогазовыми двигателями и газодизелями: особенности конструкции и технического обслуживания [Текст] / К.Е. Долганов, А.Г. Говорун, А.И. Петриченко [и др.]. - К.: Техника, 1991. - 123 с.

361.Кудрявский, В.В. Применение газовых двигателей в автомобилях [Текст] / В.В. Кудрявский, В.В. Сиваков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2015. - Т.3. - №8-2 (19-2). - С. 254-258.

362.Савельев, Г.С. Эффективность газомоторного топлива для сельхозтехники [Текст] / Г.С. Савельев, М.Н. Кочетков, Е.В. Овчинников // Сельскохозяйственные машины и технологии. - 2015. - №1. – С. 12-15.

363.Васидов А.Х., Базаров Б.И., Калауов С.А. Использование природного газа в качестве моторного топлива для механических транспортных средств. Проблемы и перспективы [Текст] / А.Х. Васидов, Б.И. Базаров, С.А. Калауов // Автомобильная промышленность. – 2017. - №6. – С. 32-34.

364.История развития КПП-транспорта в Таиланде [Текст] // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2010. - №2 (50). – С. 92-94.

365.Бо, Ц. Использование газомоторного топлива на автотранспорте в Китае [Текст] / Ц. Бо, Б.С. Рачевский // Транспорт на альтернативном топливе. - 2014. - №6 (42). – С. 57-61.

366.Лиханов, В.А. Сгорание и сажеобразование в цилиндре газодизеля [Текст] / В.А. Лиханов. – Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. - 104 с.

367.Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей мобильных теплоэнергетических установок при работе на альтернативных топливах [Текст] / Ю.С. Васильев, В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Вестник машиностроения - 2019. - №9. - С.80-84.

368.Исследование процессов образования и разложения оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, В.Г. Мохнаткин, М.А. Олейник.- Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 127 с.

369.Лопатин, О.П. Исследование процессов образования оксидов азота в цилиндре газодизеля с турбонаддувом [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин. – Киров: Вятская ГСХА, 2015. – 127 с.

370.Лопатин, О.П. Исследование процессов образования и разложения оксидов азота в цилиндре дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха при работе на природном газе [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, М.Л. Скрябин. - Киров: Вятская ГСХА, 2008. – 150 с.

371.Карницкий, В.В. Газодизельные автомобили НАМИ [Текст] / В.В. Карницкий, Г.Г. Тер-Мкртичян // Автомобильная промышленность. - 1993. - №10. - С. 27-30.

372.Результаты исследований двигателей КамАЗ, питаемых природным газом [Текст] / В.Н. Луканин, А.С. Хачиян, В.М. Федоров [и др.] // Проблемы конструкции двигателей: Труды НАМИ. - М., 1998. - 150 с.

373.Минкин, И.М. Газодизель - силовая установка XXI века [Текст] / И.М.Минкин, В.В. Карницкий // Автомобильная промышленность. - 2002. - № 5. - С. 4-8.

374.Лиханов, В.А. Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения альтернативных топлив [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Лиханов Виталий Анатольевич. - Киров, 1999. - 589 с.

375.Чалкин, В.Н. Применение аммиака в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.Н. Чалкин, А.П. Марченков // Дорожно-транспортный комплекс: состояние, проблемы и перспективы развития: сб. науч. тр. – Чебоксары: Волжский филиал МАДИ, 2016. – С. 310-315.

376.Фомин, В.М. Повышение эффективности использования альтернативного топлива на транспорте [Текст] / В.М. Фомин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2016. - №2 (28). – С. 84-92.

377.Патрахальцев, Н.Н. Возможности повышения эксплуатационной топливной экономичности многотопливного дизеля изменением его активного рабочего объема [Текст] / Н.Н. Патрахальцев, Х. Бехджуйан, А.А. Савастенко // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - №5 (53). - С. 55-63.

378.Ильина, И.Е. Альтернативные виды топлива в автомобильных двигателях [Текст] / И.Е. Ильина, О.Н. Морозова // Научный альманах. - 2015. - №9 (11). – С. 723-726.

379.Куликов, С.В. Использование перспективных видов топлива для автомобилей [Текст] / С.В. Куликов // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. - 2015. – Т.2. - №2. – С. 379-385.

380.Булеков, Н.О. Альтернативные моторные топлива для АПК из биологического сырья [Текст] / Н.О. Булеков // Наука без границ. - 2017. - №1 (6). – С. 16-23.

381.Козлов, А.В. Диметиловый эфир как альтернативное топливо для дизельных двигателей [Текст] / А.В. Козлов, А.С. Теренченко, Т.Р. Филипосянц // Труды НАМИ. - 2015. - №260. – С. 58-68.

382.Целесообразность использования альтернативного топлива [Текст] / Л.Б.

Ларионов, П.А. Болоев, П.И. Ильин [и др.] // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2015. – Т.1. - №3 (25). – С. 76-80.

383.Использование смесей дизельного топлива и метилового эфира подсолнечного масла в качестве моторного топлива [Текст] / В.А. Марков, С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев // Грузовик. - 2015. - №1. – С. 37-48.

384.Улучшение экологических показателей работы дизеля при использовании альтернативного вида топлива на основе этанола [Текст] / А.Н. Карташевич, П.Ю. Малышкин, Г.Н. Гурков, А.А. Соболевский // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2013. - №11. – С. 95-100.

385.Марков, В.А. Работа дизеля на дизельном топливе с добавкой этанола [Текст] / В.А. Марков, В.В. Бирюков, С.Н. Девянин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2015. - №2 (44). - С. 18-28.

386.Лиханов, В.А. Снижение токсичности и улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения метанола [Текст]: монография / В.А. Лиханов. – Киров: Вятская ГСХА, 2001. – 212 с.

387.Применение метанола и метилового эфира рапсового масла для работы дизеля 2Ч 10,5/12,0 [Текст]: монография / В.А. Лиханов, В.Н. Копчиков, А.В. Фоминых. - Киров: Вятская ГСХА, 2017. – 226 с.

388.Лиханов, В.А., Романов, С.А. Исследование рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на метанола-топливной эмульсии [Текст]: монография / В.А. Лиханов, С.А. Романов. – Киров: Вятская ГСХА, 2010. – 166 с.

389.Влияние этанола и рапсового масла на показатели процесса сгорания дизеля [Текст] / В.А. Лиханов, М.И. Арасланов, А.Н. Козлов, С.А. Романов // Строительные и дорожные машины. - 2016. - №11. – С. 50-52.

390.Лиханов, В.А. Дизель с воздушным охлаждением. Влияние метанола на его экологические параметры [Текст] / В.А. Лиханов, А.А. Анфилатов // Автомобильная промышленность. - 2015. - №9. – С. 10-12.

391.Лиханов, В.А. Исследование рабочих процессов в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метанола-топливной эмульсии [Текст]: монография / В.А. Лиханов, С.Н. Гущин. - Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 120 с.

392.Гарипов, К.Н. Экспериментальное исследование влияния степени обводненности спиртового топлива на характеристики ДВС с унифицированным

рабочим процессом [Текст] / К.Н. Гарипов, М.Д. Гарипов, Р.Ю. Сакулин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2010. – Т.4. - №2 (27). – С. 7-12.

393. Мальчук, В.И. Комплектация и некоторые результаты испытаний макетного образца дизеля, реализующего зональное смесеобразование с применением этанола [Текст] / В.И. Мальчук, М.Г. Шатров, А.Ю. Дунин / Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). - 2007. - №1. – С. 35-40.

394. Лопатин, О.П. Образование и нейтрализация оксидов азота в цилиндре газодизеля [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин - Киров: Вятская ГСХА, 2004. -106 с.

395. Особенности химизма и феноменологии образования оксидов азота в цилиндре дизеля при работе на природном газе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, М.А. Олейник, В.Н. Дубинецкий // Тракторы и сельхозмашины. - 2006. - № 11. - С 13-16.

396. Кондратьев, В.Н. Кинетика и механизм газофазных реакций [Текст] / В.Н. Кондратьев, Е.Е. Никитин. - М.: Наука, 1974. - 558 с.

397. Чесноков, С.А. Сокращенный механизм горения метана в условиях ДВС [Текст] / С.А. Чесноков // Актуальные проблемы управления качеством производства и эксплуатации автотранспортных средств: Матер. 9-ой Межд. науч. - практ. конф. - Владимир, 2002. - С. 319-322.

398. Моделирование процессов испарения и смесеобразования в цилиндре тракторного дизеля при работе на этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.И. Чупраков [и др.] // Известия МГТУ «МАМИ». - 2017. - № 1 (31). - С. 23-27.

399. Звонов, В.А. Метанол как топливо для транспортных двигателей [Текст] / В.А. Звонов, В.И. Черных, В.К. Балакин. - Харьков: Основа, 1990. - 150 с.

400. Глестон, С. Теория абсолютных скоростей [Текст] / С. Глестон, К. Лейдлер, Г. Эйринг. - М.: Изд-во. ин. лит., 1948. – 580 с.

401. Лопатин, О.П. Моделирование эмиссии оксидов азота в цилиндре тракторного газодизеля [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - № 7. - С. 3-8.

402. Lopatin, O. Simulation of a working process and emission of nitric oxides gase-

diesel by activity with recirculation of exhaust gases [Text] / V. Lihanov, O. Lopatin // Inzynieria Systemow Bioagrotechnicznych – Zeszut 5. – Plock, 2005. – P. 83-89.

403.Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах [Текст] / Б. Льюис, Г. Эльбе. - 2-е изд. - М.: Мир, 1968. - 592 с.

404.Щетинков, Е.С. Физика горения газов [Текст] / Е.С. Щетинков. - М.: Наука, 1965. - 740 с.

405.Частухин, В.И. Топливо и теория горения [Текст]: учебное пособие / В.И. Частухин, В.В. Частухин. – К.: Выща шк., 1989. – 223 с.

406.Рид, Р.Е. Свойства газов и жидкостей [Текст] / Р.Е. Рид, Д. Праусниц, Г. Шервуд; пер. с англ.; под ред. Б.И. Соколова. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.

407.Михеев, В.П. Сжигание природного газа [Текст] / В.П. Михеев, Ю.П. Медников. - Л.:Недра, 1975. - 391 с.

408.Лопатин, О.П. Исследование экологических показателей дизеля при работе на природном газе, метанолю- и этанолю-топливных эмульсиях [Текст] / О.П. Лопатин // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - № 4-1 (35). - С. 81-83.

409.Лопатин, О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах тракторного дизеля 4Ч 11,0/12,5 (Д-240) при работе на природном газе путем применения рециркуляции отработавших газов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Лопатин Олег Петрович. - Киров, 2004. - 200 с.

410.ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2013. - 13 с.

411.ГОСТ 17479.1-85. Масла моторные. Классификация и обозначения [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - 11 с.

412.ГОСТ 27577-2000. Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 2000. - 10 с.

413.ГОСТ 2222-95. Метанол технический синтетический [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1995. - 17 с.

414.ГОСТ 5962-2013 Спирт этиловый ректифицированный из пищевого сырья. Технические условия [Текст]. М.: Изд-во стандартов, 2014. - 6 с.

415.ГОСТ – 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 34 с.

416.ГОСТ 10578-96. Насосы топливные дизелей. Общие технические условия [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1997. - 18 с.

417.ГОСТ 10579-88. Форсунки дизелей. Общие технические условия [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 6 с.

418.ГОСТ 15888-90. Аппаратура дизелей топливная. Термины и определения [Текст]. - М.: изд-во стандартов, 1990. - 12 с.

419.Система АСГА-Т. Нормативные требования. АПИ 2.950.003 [Текст]. - Смоленск, 1984. - 50 с.

420.Чистяков-Шебекино Б.Е. Разработка стабилизаторов и методов исследования эмульсий для топлив: ТЭД по теме 59 - 80 [Текст] / Б.Е. Чистяков-Шебекино. - ВНИИПАВ, 1984. - 52 с.

421.Веденяпин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных [Текст] / Г.В. Веденяпин. - М.: Колос, 1973. - 199 с.

422.Зейдель, А.Н. Погрешности измерений физических величин [Текст] / А.Н. Зейдель. - Л.: Наука, 1985. - 112 с.

423.Система регулирования газодизеля [Текст]: пат. 2257482 Рос. Федерация: МПК7 F02D 19/08 / Лиханов В.А., Шишканов Е.А., Девятьяров Р.Р., Вылегжанин П.Н., Лопатин О.П.; заявл. 01.04.2003; опубл. 20.10.2004, Бюл. №21.

424.Устройство для регулирования перепуска отработавших газов во впускной трубопровод двигателя внутреннего сгорания [Текст]: пат. 2260706 Рос. Федерация: МПК7 F02M 25/06 / F02D 21/08, 23/02 / Лиханов В.А., Лопатин О.П.; заявл. 05.04.2004; опубл. 20.09.2005, Бюл. №26.

425.Лопатин, О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля путем их рециркуляции [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, Е.А. Шишканов // Тракторы и сельхозмашины. - 2007. - № 9. - С. 8-9.

426.Лопатин, О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. 2012. № 4 (28). С. 70-73.

427.Лопатин, О.П. Улучшение эксплуатационных показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Известия Международной академии аграрного образования. - 2013. - Т.4. - №16. - С.

170-173.

428.Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей дизеля путем применения этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2013. - № 2. - С. 6-7.

429.Лопатин, О.П. Улучшение эксплуатационных показателей тракторного дизеля Д-240 путем применения этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Научно-практический журнал Пермский аграрный вестник. - 2013. - № 1 (1). - С. 29-32.

430.Лопатин, О.П. Применение природного газа и рециркуляции на тракторном дизеле 4Ч 11,0/12,5 [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2014. - № 6. - С. 7-9.

431.Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения природного газа и рециркуляции [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2014. - №4 (40). - С. 21-25.

432.Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей тракторного дизеля путем применения природного газа и рециркуляции отработавших газов, метанола- и этанола-топливных эмульсий [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 3. - С. 3-6.

433.Лопатин, О.П. Улучшение эффективных показателей тракторного дизеля путем применения компримированного природного газа и рециркуляции отработавших газов, метанола- и этанола-топливных эмульсий [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 7. - С. 12-15.

434.Лопатин, О.П. Влияние применения природного газа и рециркуляции отработавших газов, метанола- и этанола-топливных эмульсий на содержание токсичных компонентов в ОГ [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2015. - № 4 (46). - С. 42-47.

435.Лопатин, О.П. Исследование эффективных показателей дизеля при работе на природном газе, метанола- и этанола-топливных эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - № 4-1 (35). - С. 79-81.

436.Лопатин, О.П. Трактор с комплексной системой снижения токсичности [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2016. - №

3. - С. 10-15.

437.Лопатин, О.П. Исследование нагрузочных характеристик токсичности дизелей семейства ММЗ при работе на природном газе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2016. - № 6. - С. 16-21.

438.Лопатин, О.П. Нагрузочные режимы работы газодизеля с рециркуляцией отработавших газов [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2016. - № 11 (116). - С. 10-16.

439.Лопатин, О.П. Исследование мощностных и экономических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе, метанолю- и этанолю-топливных эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2016. - № 2 (50). - С. 43-49.

440.Лопатин, О.П. Исследование скоростного режима дизелей семейства ММЗ при работе на природном газе [Электронный ресурс] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2017. - № 1 (61). - С. 12.

441.Лопатин, О.П. Исследование нагрузочных режимов тракторного дизеля при работе на спиртовой эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.И. Чупраков // Строительные и дорожные машины. - 2017. - № 2. - С. 39-43.

442.Лопатин, О.П. Влияние этанолю-топливной эмульсии на экологические параметры дизеля [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.И. Чупраков // АвтоГазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2017. - Т.16. - № 4. - С. 166-172.

443.Лопатин, О.П. Влияние степени рециркуляции отработавших газов на эффективные и экологические показатели дизеля [Текст] / О.П. Лопатин // Приволжский научный вестник. - 2015. - №5-1 (45). – С. 90-92.

444.Лопатин, О.П. Исследования эффективных и экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на природном газе с рециркуляцией отработавших газов, метанолю- и этанолю-топливных эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2015. - № 5-1. - С. 22-25.

445.Лопатин, О.П. Газодизельная модификация дизеля 4Ч 11,0/12,5 [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2017. - Т.16. - № 5. - С. 221-226.

446.Лопатин О.П. Рабочий процесс дизеля на природном газе с рециркуляцией [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Вестник транспорта Поволжья.- 2017.- №2 (62). – С. 105-112.

447.Lopatin, O. Polepszenie ekologicznych wskaźników w silnikach wysokoprężnych przy zastosowaniu alternatywnych paliw [Text] / V. Lihanov, O. Lopatin // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów ue. Materiały na konferencję. – Warszawa: Instytut budownictwa, mechanizacji i elektryfikacji rolnictwa, 2008. – S. 59-64.

448.Lopatin, O. Obniżenie zawartości tlenków azotu w spalinach silnika D-245.12S z turbodoładowaniem poprzez zastosowanie gazu ziemnego [Text] / V. Lihanov, O. Lopatin // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów ue. Materiały na konferencję. – Warszawa: Instytut budownictwa, mechanizacji i elektryfikacji rolnictwa, 2009. – S. 177-181.

449.Lopatin, O. Obniżenie zawartości tlenków azotu w spalinach silnika 2CZ 10,5/12,0 poprzez podawanie metanolu z dodatkowego systemu zasilania paliwem [Text] / V. Lihanov, O. Lopatin // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów ue. Materiały na konferencję. – Warszawa: Instytut budownictwa, mechanizacji i elektryfikacji rolnictwa, 2009. – S. 182-188.

450.Lopatin, O.P. Study of Loading Regimes of Diesel Engines Operating on Natural Gas [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // International Journal of Applied Engineering Research. - 2018. - V.13. - №5. - P.2936-2939.

451.Лопатин, О.П. Исследование показателей процесса сгорания в тракторном дизеле при применении природного газа и рециркуляции, метано- и этано-топливных эмульсий [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 9. - С. 3-5.

452.Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей дизеля при работе на природном газе с рециркуляцией [Электронный ресурс] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2016. - № 4 (52). - С. 9.

453.Лопатин О.П. Исследование динамики процесса сгорания в цилиндре тракторного газодизеля [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 3. С. 45-49.

454.Лопатин О.П. Исследование процесса сгорания в тракторном дизеле,

работающем на этанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2017. - № 5. - С. 11-18.

455.Lopatin, O.P. The Study of the Process of Combustion of the Alcohol-Fuel Emulsions and Natural Gas in a Diesel Engine [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // International Journal of Applied Engineering Research. - 2018. - V.13. - №3. - P.1703-1709.

456.Lopatin, O. Estimation of operational effectiveness of natural gas and recirculation of exhaust gases for a decrease toxicity of a diesel engine 4F 11,0/12,5 [Text] / V. Lihanov, O. Lopatin, A. Rossohin // Inzynieria Systemow Bioagrotechnicznych. – Zeszut 5. – Plock, 2005. – S. 79-82.

457.Сгорание и тепловыделение в цилиндре тракторного дизеля при работе на метанола-топливной эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, С.А. Романов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - № 11. - С. 14-19.

458.Лопатин, О.П. Использование природного газа, метанола- и этанола-топливных эмульсий как экологичных энергоносителей для мобильных теплоэнергетических установок [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Теплоэнергетика. - 2017. - №12. - С.82-92.

459.Lopatin, O.P. Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // Thermal Engineering. - 2017. - Vol.64. - №12. - P.935 - 944.

460.Лопатин, О.П. Использование природного газа, спиртов и топлив на их основе в дизельных двигателях [Текст]: монография / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин. - Киров: Вятская ГСХА, 2018. – 395 с.

461.Lopatin, O.P. Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas [Text] / V. Romanyuk, V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // Теоретическая и прикладная экология. - 2018. - №3. - С.27-32.

462.Лопатин, О.П. Снижение токсичности отработавших газов автомобильного дизеля конвертацией на спирто-топливные эмульсии [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Экология и промышленность России. - 2018. – Т.22. - №10. - С.54-59.

463.Лопатин, О.П. Использование экологичного топлива на основе метанола в дизеле [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2018. - Т.17. - №9. - С.411-415.

464.Лопатин, О.П. Индицирование рабочего процесса тракторного дизеля на

природном газе и спиртах [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2018. - №4. - С.18-25.

465.Лопатин, О.П. Экологичное топливо на основе спирта для тракторных дизелей [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2018. - №7. - С.25-29.

466.Лопатин, О.П. Индицирование рабочего процесса дизеля на спирто-топливных эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2018. - №8. - С.42-47.

467.Лопатин, О.П. Образование токсичных компонентов и процесс сгорания в тракторных дизелях при работе на биотопливе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Строительные и дорожные машины. - 2018. - №9. - С.46-50.

468.Лопатин, О.П. Горение природного газа и спиртотопливных эмульсий в поршневом двигателе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2018. - №5 (65). - С.63-69.

469.Лопатин, О.П. Исследование токсичности дизелей, работающих на биотопливах на основе метилового спирта [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Известия МГТУ «МАМИ». - 2018. - №3 (37). - С.51-57.

470.Лопатин, О.П. Исследование нагрузочных режимов работы дизеля на спиртотопливных эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2018. - Т.17. -№10. - С.449-452.

471.Лопатин, О.П. Исследование скоростных режимов работы тракторного дизеля на спирто-топливных эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2018. - №5. - С.15-19 (0,31 п.л. / 0,16 п.л.).

472.Лопатин, О.П. Повышение экологической безопасности дизельных двигателей путем использования топлив на основе метилового спирта [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2018. - №6 (66). - С.61-67.

473.Lopatin, O.P. Investigation of the speed regime of tractor diesel engine running on natural gas with recirculation [Text] / V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // VII International Conference «Modern Technologies for Non-Destructive Testing». IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 457 (2018) 012011.

474.Лопатин, О.П. Улучшение экологических показателей дизельных двигателей

применением биотоплива [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Двигателестроение. - 2018. - №4 (274). - С.13-17.

475.Лопатин, О.П. Моделирование сажеобразования в цилиндре дизеля [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.Н. Козлов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2019. - Т. 25. - № 1. - С. 47–59.

476.Лопатин, О.П. Исследование токсичности биодизельного двигателя, работающего на спирте [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2019. - Т. 25. - №1. - С. 92–100.

477.Лопатин, О.П. Горение природного газа в дизельных двигателях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2019. – Т.18. - №3. - С. 130-133.

478.Лопатин, О.П. Использование спиртов и топлив на их основе для дизелей [Текст] / О.П. Лопатин, В.А. Лиханов // Автомобильная промышленность. - 2019. - № 4. - С. 27–31.

479.Лопатин, О.П. Исследование скоростных режимов дизелей, работающих на газомоторном топливе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2019. - Т.18. - №6. - С. 245-247.

480.Лопатин, О.П. Тепловыделение в тракторных дизелях, работающих на биотопливе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Тракторы и сельхозмашины. - 2019. - №2. - С.3-9.

481.Лопатин, О.П. Сгорание и тепловыделение в дизеле, работающем на смесевом спиртовом топливе [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Двигателестроение. - 2019. - № 2. - С. 26–31.

482.Лопатин, О.П. Определение оптимального состава биотоплива для использования в дизельных ДВС [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. 2019. № 1 (67). С. 62-68.

483.Лопатин, О.П. Исследование токсичности дизелей, работающих на различных альтернативных топливах и режиме максимального крутящего момента [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Транспорт на альтернативном топливе. - 2019. - №3 (69). - С.58-65.

484.Лопатин, О.П. Индицирование рабочего процесса дизелей, работающих на различных альтернативных топливах [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин //

АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2019. – Т.18. - №8. - С. 360-362.

485.Lopatin, O.P. Alternative energy: methanol, ethanol and alcohol esters of rapeseed oil as eco - friendly biofuel [Text] / A. Marchuk, V.A. Likhanov, O.P. Lopatin // Теоретическая и прикладная экология. - 2019. - №3. - С.80-86.

486.Лопатин, О.П. Оценка интегральной токсичности отработавших газов дизеля, работающего на природном газе и спиртовых эмульсиях [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // Экология и промышленность России. - 2019. – Т.23. - №9. - С.60-65.

487.Лопатин, О.П. Биотопливо. Скоростные режимы токсичности биодизелей [Текст] / В.А. Лиханов, О.П. Лопатин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. - 2019. - Т.18. - №10. - С. 467-471.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Департамент научно-технологической политики и образования

**федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Костромская государственная сельскохозяйственная академия»**
156530, Костромская обл., Костромской р-н, пос. Караваяво, Учебный городок, Караваявская с/а, дом 34,
ОКПО 00493296, ОГРН 1024402232513, ИНН 4414001246, КПП 441401001
Факс: (4942) 65-75-99; Тел: (4942) 65-71-10; E-mail: info@ksaa.edu.ru; Сайт: www.kgsxa.ru

№ 24-21/19 от «10» 11 2017 г.
На № _____ от « » _____ 20 г.


УТВЕРЖДАЮ:
Ректор ФГБОУ ВО Костромская ГСХА
С.Ю. Зудин
«10» ноябрь 2017 г.

АКТ

об использовании (внедрении) научно-исследовательской
работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан инженерно-технологического факультета, кандидат технических наук, доцент С.А. Полозов, заведующий кафедрой тракторы и автомобили федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Костромская ГСХА), кандидат технических наук, доцент А.М. Молодов и представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов О.П. Лопатин составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения оксидов азота в дизеле» (исполнитель – О.П. Лопатин, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), внедрена (использована) в учебном процессе при изучении дисциплин по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства, бакалавриата по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия» на инженерно-технологическом факультете ФГБОУ ВО Костромская ГСХА.

Декан инженерно-технологического
факультета ФГБОУ ВО Костромская ГСХА,
канд. техн. наук, доцент

Полозов С.А. Полозов

Заведующий кафедрой
Тракторы и автомобили
ФГБОУ ВО Костромская ГСХА,
канд. техн. наук, доцент

Молодов

А.М. Молодов

Представитель ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
канд. техн. наук, доцент кафедры
тепловых двигателей, автомобилей и тракторов

Лопатин

О.П. Лопатин

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия»

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по научной и инновационной работе
ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА
докт. с.-х. наук, профессор Е.В. Дабахова

«11» 11 2017 г.

АКТ

об использовании (внедрении) научно-исследовательской
работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан инженерного факультета, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин, докт. техн. наук, профессор А.В. Пасин, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА), докт. техн. наук, профессор А.И. Новожилов и представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов О.П. Лопатин составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения оксидов азота в дизеле» (исполнитель – О.П. Лопатин, канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА) внедрена (использована) в учебном процессе: при чтении лекций, в курсовых и выпускных квалификационных работах для студентов, обучающихся по специальности 35.03.06 и 35.04.06 «Агроинженерия» на инженерном факультете ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА.

Декан инженерного факультета,
профессор кафедры мобильных энергетических
средств и сельскохозяйственных машин
ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА,
докт. техн. наук, профессор



А.В. Пасин

Заведующий кафедрой эксплуатации
мобильных энергетических средств
и сельскохозяйственных машин
ФГБОУ ВО Нижегородская ГСХА,
докт. техн. наук, профессор



А.И. Новожилов

Представитель ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
канд. техн. наук, доцент кафедры
тепловых двигателей, автомобилей и тракторов



О.П. Лопатин

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашская государственная сельскохозяйственная академия»



УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА

А.Е. Макушев

11 2017 г.

об использовании (внедрении) научно-исследовательской
работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан инженерного факультета, канд. техн. наук, доцент Пушкаренко Николай Николаевич, заведующий кафедрой транспортно-технологических машин и комплексов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА), докт. техн. наук, профессор Акимов Александр Петрович и представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов Лопатин Олег Петрович составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения оксидов азота в дизеле» (исполнитель – О.П. Лопатин, канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА) внедрена (используется) в учебном процессе на инженерном факультете ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА при чтении лекций студентам бакалаврам специальности 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.03.06 «Агроинженерия», магистрам специальности 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.04.06 «Агроинженерия», выполнении ими курсовых и выпускных квалификационных работ.

Декан инженерного факультета
ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА,
канд. техн. наук, доцент

Н.Н. Пушкаренко

Заведующий кафедрой
транспортно-технологических машин и комплексов
ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА,
докт. техн. наук, профессор

А.П. Акимов

Представитель ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
канд. техн. наук, доцент кафедры
тепловых двигателей, автомобилей и тракторов

О.П. Лопатин

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное
 учреждение высшего образования
 «Вятская государственная сельскохозяйственная академия»

УТВЕРЖДАЮ:
 И.о. ректора ФГБОУ ВО Вятская ГСХА
 докт. техн. наук, профессор В.А. Мухоматкин



2017 г.

АКТ

об использовании (внедрении) научно-исследовательской
 работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, декан инженерного факультета, заведующий кафедрой эксплуатации и ремонта машинно-тракторного парка, докт. техн. наук, профессор Р.Ф. Курбанов, заведующий кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов, докт. техн. наук, профессор В.А. Лиханов и канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА) О.П. Лопатин составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения оксидов азота в дизеле» (исполнитель – О.П. Лопатин, канд. техн. наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), внедрена (использована) в учебном процессе при изучении дисциплин аспирантуры по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника» (направленность программы 05.04.02 «Тепловые двигатели»); бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 23.03.03, 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.01 «Технология транспортных процессов», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия» на инженерном факультете ФГБОУ ВО Вятская ГСХА.

Декан инженерного факультета,
 заведующий кафедрой эксплуатации и
 ремонта машинно-тракторного парка
 ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
 докт. техн. наук, профессор

Р.Ф. Курбанов

Заведующий кафедрой
 тепловых двигателей, автомобилей и тракторов
 ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
 докт. техн. наук, профессор

В.А. Лиханов

Канд. техн. наук, доцент кафедры
 тепловых двигателей, автомобилей и тракторов
 ФГБОУ ВО Вятская ГСХА

О.П. Лопатин

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное
 учреждение высшего образования
 «Казанский государственный аграрный университет»

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГБОУ ВО Казанский ГАУ
 профессор Д.И. Файзрахманов

2018 г.

АКТ

об использовании (внедрении) научно-исследовательской
 работы в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, директор института механизации и технического сервиса, заведующий кафедрой общинженерных дисциплин, доктор технических наук, профессор С.М. Яхин, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и энергетических установок федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ), доктор технических наук, профессор К.А. Хафизов и представитель федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов О.П. Лопатин составили настоящий акт о том, что госбюджетная научно-исследовательская работа на тему: «Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения содержания оксидов азота в дизеле» (исполнитель – О.П. Лопатин, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), внедрена (использована) в учебном процессе при изучении дисциплин по специальностям 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 35.06.04 «Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве», бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 35.03.06, 35.04.06 «Агроинженерия» в институте механизации и технического сервиса ФГБОУ ВО Казанский ГАУ.

Директор института механизации
 и технического сервиса
 ФГБОУ ВО Казанский ГАУ
 доктор технических наук, профессор

С.М. Яхин

Заведующий кафедрой тракторов,
 автомобилей и энергетических установок
 ФГБОУ ВО Казанский ГАУ
 доктор технических наук, профессор

К.А. Хафизов

Представитель ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,
 канд. техн. наук, доцент кафедры
 тепловых двигателей, автомобилей и тракторов

О.П. Лопатин



МИНИСТЕРСТВО
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ
КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Руководителям
сельскохозяйственных предприятий
Кировской области
(по списку)

ул. Дерендяева, д.23,
г. Киров обл., 610020
Тел.: (8332) 64-68-57
Факс: (8332) 64-76-88
E-mail: dsx@dsx-kirov.ru

14.02.2019 № *226-44-12*

на № _____

О рекомендации
для использования в производстве

Министерство сельского хозяйства и продовольствия Кировской области, учитывая Распоряжение Правительства РФ №767 от 13 мая 2013 г. «О расширении использования природного газа в качестве моторного топлива», включающего в себя поручения по разработке комплекса правовых, экономических и организационных мер государственной поддержки производства, выпуска в оборот и оборота транспортных средств и сельскохозяйственной техники на природном газе, создания дорожной заправочной и сервисной инфраструктуры, системы статистического учёта и технического регулирования при использовании природного газа в качестве моторного топлива, рекомендует результаты исследований, представленных в работе Лопатина О.П. «Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения содержания оксидов азота в дизеле», для внедрения в предприятиях, занимающихся производством и переработкой продукции сельского хозяйства.

Заместитель министра сельского
хозяйства и продовольствия
Кировской области,
кандидат сельскохозяйственных наук



Е.А. Софронов



ООО «ГАЗПРОМ МЕЖРЕГИОНГАЗ»

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ**
«ГАЗПРОМ МЕЖРЕГИОНГАЗ КИРОВ»
(ООО «ГАЗПРОМ МЕЖРЕГИОНГАЗ КИРОВ»)

Ул. Казанская, д.18, г. Киров, Российская Федерация, 610004

Тел.: (8332) 35-94-30, 35-94-00, факс: (8332) 35-94-90

www.kirovregiongaz.ru

ОКПО 52347322, ОГРН 1024301307084, ИНН/КПП 4345010511/434501001

22.10.2019 № 22

на № _____ от _____

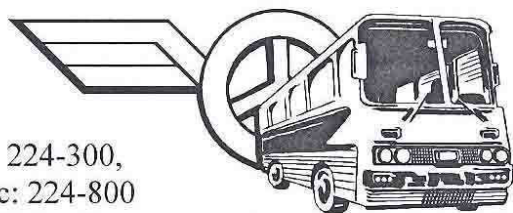
Рекомендации для использования в производстве

ООО «Газпром межрегионгаз Киров» рассмотрев результаты научно-исследовательской работы «Применение природного газа и спирто-топливных эмульсий для снижения содержания оксидов азота в дизеле», выполненную на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», подтверждает, что данные исследования представляют собой интерес и могут быть использованы при переводе техники для работы на природном газе.

**Заместитель генерального
директора**

 **М.А. Подлевских**

Российская Федерация
ОАО «КировПассажирАвтотранс»



тел: 224-300,
факс: 224-800
610025 г. Киров, пер.Автотранспортный, 4
ИНН 4345086060, БИК 043304711
р/счет 40702810700000006529
кор/счет 30101810100000000711
АО КБ «Хлынов»
secretar@kirovkpat.ru

« 16 » *сентября* 2019 год
№ 273

Врио ректора ФГБОУ ВО
Вятская государственная
сельскохозяйственная академия
д.п.н., к.с/х.н., профессору
Е.С.Симбирских

Рекомендации для использования в производстве

ОАО «КировПассажирАвтотранс» рассмотрев результаты научно-исследовательской работы «Применение природного газа и спиртотопливных эмульсий для снижения содержания оксидов азота в дизеле», выполненную на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», подтверждает, что данные исследования представляют собой практический интерес и могут быть использованы в производстве при переводе действующего автотранспортного парка для работы на природном газе.

Генеральный директор



Д.Ю.Пырлог



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ЗАО Племзавод «Октябрьский»

А.Н. Росляков

11 2018 года

Акт

о проведении эксплуатационных испытаний

Настоящий акт в составе комиссии: главный инженер ЗАО Племзавод «Октябрьский» В.В. Снигирев, инженер по эксплуатации машинно-тракторного парка ЗАО Племзавод «Октябрьский» С.Н. Цепелев, сотрудники кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор В.А. Лиханов, кандидат технических наук, доцент О.П. Лопатин составлен о том, что в 2018 году на животноводческом комплексе ЗАО Племзавод «Октябрьский» проведены эксплуатационные испытания трактора МТЗ-80, модернизированного для работы на этанолю-топливной эмульсии, в составе машинно-тракторного агрегата с раздатчиком кормов КТУ-10. Во время эксплуатационных испытаний, проходивших с апреля по октябрь 2018 года, наработка трактора составила 240 моточасов. В результате испытаний трактор показал высокую эффективность и надежность работы, подтвердил заявленные проектные характеристики.

От ЗАО Племзавод «Октябрьский»:

Главный инженер

В.В. Снигирев

Инженер по эксплуатации
машинно-тракторного парка

С.Н. Цепелев

От кафедры тепловых двигателей, автомобилей
и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА:Заведующий кафедрой тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов, профессор

В.А. Лиханов

Доцент кафедры тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов

О.П. Лопатин

СОГЛАСОВАНО

Декан инженерного факультета

ФГБОУ ВО Вятская ГСХА

профессор Р.Ф. Курбанов



« 09 _____ 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО Вятская ГСХА

профессор В.Г. Мохнаткин



« _____ 2016 г.

Акт

о создании опытного образца трактора МТЗ-80

Настоящий акт в составе комиссии: заведующий кафедрой тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА доктор технических наук, профессор В.А. Лиханов, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов, заместитель декана инженерного факультета, кандидат технических наук, доцент А.В. Россохин, доцент кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов, кандидат технических наук, доцент А.А. Анфилатов составлен о том, что по результатам научно-исследовательской работы, проведенной доцентом кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятская ГСХА О.П. Лопатиным, на базе кафедры создан опытный образец трактора МТЗ-80 с дизелем Д-240, переоборудованным для работы на природном газе и спирто-топливных эмульсиях, с улучшенными экологическими показателями. Проведены его функциональные испытания, подтверждены заявленные мощностные и экологические характеристики, разработаны практические рекомендации для внедрения образца в серийное производство.

Заведующий кафедрой тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов, доктор технических наук,
профессор

В.А. Лиханов

Заместитель декана инженерного факультета,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Россохин

Доцент кафедры тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов,
кандидат технических наук

А.А. Анфилатов

Доцент кафедры тепловых двигателей,
автомобилей и тракторов,
кандидат технических наук

О.П. Лопатин

Техническая характеристика трактора МТЗ-80, работающего на ПГ и СТЭ
 ($\Theta_{\text{впр}} = 23^\circ$, $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$)

Показатели	Топливо					
	Дизельное	ПГ	ПГ с РОГ 10%	ПГ с РОГ 20%	МТЭ	ЭТЭ
Дизель	4Ч 11,0/12,5					
Тип камеры сгорания	ЦНИДИ					
N_e , кВт	55,2				55,4	55,0
g_e , г/(кВт·ч)	243	207	212	218	316	297
$G_{\text{дт}}$, кг/ч	13,4	2,4	9,7	10,0	9,7	8,8
$G_{\text{тс}}$, кг/ч	13,4	11,4	11,7	12,0	17,5	16,3
Снижение токсичности, %:						
NO_x		-	16,7	43,2	41,3	50,2
С		в 6,9 раза	в 6,2 раза	в 5,6 раза	в 6,9 раза	в 5,2 раза
CO_2		46,7	43,8	33,3	6,7	23,8
СО		25,0	20,0	10,0	45,0	25,0



Рисунок – Макетный образец трактора МТЗ-80,
 модернизированный для работы на ПГ и СТЭ