

**ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)**

На правах рукописи



ОМЕЛЬЧЕНКО Евгений Алексеевич

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

05.04.02 – Тепловые двигатели

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
В.С. Кукис

Челябинск–2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Проблемы и перспективы снижения вредных выбросов с отработавшими газами поршневых двигателей внутреннего сгорания.....	10
1.1. Экологические проблемы взаимодействия поршневых двигателей внутреннего сгорания и окружающей среды.....	10
1.2. Основные факторы, влияющие на образование вредных веществ в дизелях.....	11
1.3. Способы повышения экологической безопасности дизелей.....	18
1.4. Выводы, цель и задачи исследования.....	40
Глава 2. Использование вихревых труб в системах снижения токсичности поршневых двигателей внутреннего сгорания.....	42
2.1. Возможные варианты использования вихревых труб для снижения токсичности поршневых двигателей внутреннего сгорания.....	43
2.2. Математическая модель и теоретическое исследование вихревой трубы для системы рециркуляции отработавших газов.....	51
2.3. Выводы.....	62
Глава 3. Программа и методика экспериментального исследования. Экспериментальная установка.....	63
3.1. Программа и методика экспериментального исследования.....	63
3.2. Экспериментальная установка	70
3.3. Выводы.....	83
Глава 4. Результаты экспериментального исследования выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизеля 4ЧН13/15 с их рециркуляцией и охлаждением.....	84
4.1. Определение показателей двигателя в исходной комплектации.....	84

4.2. Определение влияния доли и температуры рециркулируемых газов на параметры двигателя.....	90
4.3. Влияние регулирования температуры отработавших газов на эффективность работы каталитического нейтрализатора.....	105
4.4. Обобщение экспериментальных исследований по определению влияния доли рециркулируемых газов в свежем заряде и их температуры на выбросы оксидов азота и твердых частиц.....	111
4.5. Выводы.....	112
Глава 5. Оценка особенностей рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией отработавших газов и их охлаждением (численный эксперимент).....	114
5.1. Исходные данные для расчета.....	114
5.2. Результаты оценки особенностей рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией отработавших газов и их охлаждением...	119
5.3. Выводы.....	148
Заключение.....	150
Основные сокращения.....	153
Использованная литература.....	154
Приложения.....	168

ВВЕДЕНИЕ

«Поршневые двигатели внутреннего сгорания – чрезвычайно экономичные и удобные источники энергии – используют практически во всех областях человеческой деятельности» [44]. Они производят более 80 % энергии, потребляемой человечеством [2, 17, 44, 31, 13, 82, 129 и др.]. Их широкое распространение обусловлено тем, что в результате многолетнего развития, ставшего возможным благодаря общему научно-техническому прогрессу, успехам металлургии и машиностроения, они достигли весьма высоких энергетических и экономических показателей, обладают достаточной надежностью и хорошо освоены в технологическом отношении. «По долгосрочным научным прогнозам в обозримом будущем бензиновые двигатели и дизели по-прежнему будут составлять основу транспортной энергетики» [44].

Однако выбрасываемые из поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) в атмосферу отработавшие газы (ОГ) содержат большое количество вредных веществ (ВВ), которые наносят непоправимый вред здоровью человека, возведенным им зданиям и сооружениям, окружающей природе [60, 69, 72, 101 и др.]. В современном двигателестроении снижение экологического вреда, наносимого ПДВС, является важнейшей самостоятельной задачей.

Сказанное свидетельствует о существовании *противоречия* между безальтернативной в настоящее время и в ближайшей перспективе потребностью человечества продолжать широкое использование ПДВС для своих нужд, с одной стороны, и вредным воздействием их ОГ на человека и окружающую среду (ОС) - с другой.

Обзор способов повышения экологической безопасности дизелей, проведенный в первой главе диссертации, показал, что в силу особенностей их рабочего процесса, мероприятия, направленные на снижение выбросов продуктов неполного сгорания, оксида углерода, углеводородов и вредных частиц сопровождается ростом выбросов оксидов азота и наоборот. Поэтому для обеспечения соответствия дизелей действующим и перспективным нормам по токсичности целе-

сообразно использование методов снижения ВВ поршневыми ДВС, включающих сочетание систем рециркуляции отработавших газов (РОГ) с охлаждением РГ и нейтрализации ОГ [18, 67, 70, 31 и др.].

Применение систем РОГ и их нейтрализации показывает, что эффективность использования указанных способов существенно зависит от температуры РГ и температуры ОГ (при этом вредны как малые, так и чрезмерно высокие ее значения). Однако большую часть времени силовые установки мобильной техники работают на переменных скоростных и нагрузочных режимах. В результате температура ОГ (а значит и РГ) колеблется в широких пределах (от 120 до 750 °С и выше), что создает проблему обеспечения оптимальной реализации указанных способов повышения экологической безопасности ПДВС. В настоящее время для обеспечения целесообразной температуры РГ используют традиционные рекуперативные теплообменники [5,18, 19, 45, 67, 70, 98, 118, 125, 130 и др.], характеризующиеся значительной массой, металлоемкостью (цветных металлов) и имеющие существенные гидравлические сопротивления.

Кроме того, следует отметить, что создание надежного и эффективного теплообменника для охлаждения РГ представляет собой сложную задачу из-за отложений и загрязнений, выделяющихся из ОГ дизеля.

В плане исключения указанных негативных особенностей традиционных теплообменников значительный интерес представляет использование для охлаждения РГ вихревых труб (ВТ). Работы [39, 50, 54, 96, 97] свидетельствуют о теоретической возможности использования ВТ для частичного решения отмеченной выше проблемы.

Цель настоящего исследования: повысить экологическую безопасность поршневых двигателей внутреннего сгорания за счет использования вихревой трубы в системе выпуска отработавших газов.

Для достижения указанной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ проблем и перспектив снижения вредных выбросов с отработавшими газами ПДВС.

2. Рассмотреть возможные пути использования вихревых труб в системах снижения токсичности ПДВС.

3. Разработать программу, методику экспериментального исследования, создать экспериментальную установку для оценки возможности снижения вредных выбросов ПДВС (на примере дизеля 4ЧН13/15) за счет рециркуляции охлажденных с помощью вихревой трубы отработавших газов и регулирования с ее помощью их температуры перед каталитическим нейтрализатором.

4. Провести эксперимент, обработать и проанализировать его результаты с точки зрения возможности снижения вредных выбросов ПДВС (на примере дизеля 4ЧН13/15) за счет рециркуляции охлажденных с помощью вихревой трубы отработавших газов и регулирования с ее помощью их температуры перед каталитическим нейтрализатором.

5. Провести расчетно-теоретическую оценку особенностей рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией отработавших газов и их охлаждением с использованием вихревой трубы.

6. На основе полученных результатов сформулировать рекомендации по использованию вихревых труб с целью снижения вредных выбросов ПДВС и наметить перспективы развития этого направления.

Объектом исследования служили процессы в газоздушном тракте и камере сгорания ПДВС с рециркуляцией ОГ и каталитическим нейтрализатором.

Предметом исследования являлись экологические и экономические показатели дизеля с газотурбинным наддувом, оборудованного каталитическим нейтрализатором, системой рециркуляции отработавших газов и их охлаждением с помощью вихревой трубы.

Научную новизну имеют следующие положения, **выносимые на защиту**:

- результаты оценки возможности снижения концентрации оксидов азота и твердых частиц в ОГ и повышения экономических показателей дизеля путем охлаждения рециркулируемых газов с помощью вихревой трубы;

- выявленные закономерности протекания рабочего процесса и образования в камере сгорания оксидов азота и сажи в дизеле с рециркуляцией ОГ и их охлаждением с помощью вихревой трубы;

- результаты экспериментальной оценки возможности снижения концентрации вредных веществ в отработавших газах за счет регулирования их температуры перед каталитическим нейтрализатором с помощью вихревой трубы.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит:

- в подтверждении возможности снижения концентрации оксидов азота и твердых частиц в отработавших газах, а также повышения экономических показателей дизеля с рециркуляцией отработавших газов и их охлаждением с помощью вихревой трубы;

- подтверждении возможности снижения концентрации вредных веществ в отработавших газах за счет регулирования их температуры перед каталитическим нейтрализатором с помощью вихревой трубы;

- установлении количественной зависимости выбросов твердых частиц и оксидов азота, от доли рециркулируемых газов в свежем заряде; степени снижения их температуры с помощью вихревой трубы; частоты вращения коленчатого вала и нагрузки на двигатель.

Результаты исследования могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих поршневых и комбинированных ДВС, при проведении НИР и ОКР в области двигателестроения, а также в учебном процессе.

Методология и методы исследования базировались на системном, комплексном и процессном подходах к решению сформулированных выше задач, методах изучения специальной литературы, теоретического анализа и синтеза полученного экспериментального материала, индуктивного и дедуктивного методах обобщения полученных эмпирическим путем данных, математических и статистических методах обработки полученных экспериментальных материалов, а также для установления количественных зависимостей между изучаемыми явлениями. Теоретическая основа работы базировались на использовании основных положений теории рабочих процессов тепловых двигателей, методов статистической

обработки результатов испытаний и компьютерного моделирования, а также научных исследований в области двигателестроения, термодинамики и теплотехники, выполненных такими учёными как С.А. Батурин, В.М. Бродянский, О.И. Жегалин, В.А. Звонов, Н.Н. Иванченко, Р.З. Кавтарадзе, В.Н. Луканин, А.Р. Кульчицкий, А.Л. Новоселов В.И. Смайлис и др. Выводы и рекомендации сформулированы на базе результатов натурного и расчетно-теоретического исследования дизеля 4С13/15.

Степень достоверности результатов исследования определяется достаточным объемом экспериментов, применением комплекса современных, информативных и объективных методов исследования, соответствующих государственным стандартам, использованием современной измерительной аппаратуры, систематической её поверкой и контролем погрешностей, подтверждением теоретических положений экспериментальными.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены и одобрены на: IX International research and practice conference «Fundamental and applied science». (Sheffield, 2014); IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики» (Санкт-Петербург, 2015); LIV международной научно-технической конференции «Достижение науки – агропромышленному производству» (Челябинск, 2015); X международной научно-практической конференции "Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия" (Новосибирск, 2015); VIII Межрегиональной научно-практической конференции «Инновационные технологии, системы вооружения и военной техники для Арктики, Сибири и Дальнего Востока» (Омск, 2015); International Conference on Industrial Engineering (Челябинск, 2015).

Реализация результатов работы. Материалы диссертации используются в ООО «Уральский дизель-моторный завод», ОАО «НИИД» и Омском автобронетанковом инженерном институте.

Публикации. По теме диссертации опубликовано две монографии, 9 научных статей, в том числе три – в изданиях, рекомендованных ВАК, и две в материалах международных конференций.

Объем и содержание работы. Диссертация содержит 172 с., включающих 76 рисунков, 15 таблиц, и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы (131 наименование) и приложения.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

1.1. Экологические проблемы взаимодействия поршневых двигателей внутреннего сгорания и окружающей среды

Как было отмечено во введении «поршневые двигатели внутреннего сгорания ... используют практически во всех областях человеческой деятельности» и «по долгосрочным научным прогнозам в обозримом будущем бензиновые двигатели и дизели ... будут составлять основу транспортной энергетики» [44].

В процессе работы ПДВС непрерывно взаимодействуют с ОС, получая из нее топливо и воздух и выбрасывая в нее продукты своей деятельности, что порождает целый ряд экологических проблем.

Прежде всего, это проблема сжигания большого количества природного органического топлива, запасы которого ограничены, что в перспективе создает серьезную экологическую опасность для человечества. Процесс сжигания топлива в ПДВС включает в себя как обязательный элемент его топлива с использованием кислорода атмосферного воздуха, что обуславливает его интенсивное расходование. Предполагают [2], что в ближайшие 150–180 лет количество кислорода в атмосфере сократится на треть по сравнению с современным его содержанием.

Серьезнейшие проблемы в ОС создают и выбрасываемые из ПДВС вредные вещества, входящие в состав ОГ, наносящие непоправимый вред здоровью человека, возведенным им зданиям и сооружениям, окружающей природе.

1.2. Основные факторы, влияющие на образование вредных веществ в дизелях

К нормируемым в настоящее время ВВ, образующимся в ходе работы ПДВС, относят оксид углерода, углеводороды, твердые (дисперсные) частицы и оксиды азота [76, 86, 94, 99 и др.]. Исходя из обратимости химических реакций процесс сгорания теоретически не может дойти до конца, полнота сгорания определяется условиями протекания процесса [71,31, 40], в первую очередь качеством смесеобразования. Нехватка окислителя в локальных зонах пламени в камере сгорания, в частности дизеля, снижение температуры газов, приводит к неполному окислению топлива и увеличению концентрации углеводородов, оксида углерода и сажевых частиц в ОГ. Избыток окислителя в условиях высоких температур и давлений приводит к интенсивному образованию оксидов азота [42].

Рассмотрим кратко (подробнее – см., например, [60, 68, 83, 89, 102]) основные факторы, влияющие на образование ВВ в дизелях.

Продукты неполного сгорания и частичного разложения топлива (оксиды углерода, углеводороды и сажа) образуются из-за общего или локального дефицита кислорода. Определяющими факторами их образования являются: состав и качество топлива; коэффициент избытка воздуха, равномерность макроструктуры и оптимальная микроструктура рабочей смеси.

Существенное значение имеет также фазовое положение процесса сгорания. Его «затягивание» увеличивает содержание CO, CH и сажи. Образование оксидов азота, напротив, является следствием возникновения реакций окисления азота в высокотемпературных зонах камер сгорания при наличии несвязанного кислорода. Концентрация NO_x в ОГ не зависит от сорта топлива, но обусловлена скоростью охлаждения («закалки») продуктов сгорания.

Исходя из этих определяющих причин, можно проанализировать образование ВВ в зависимости от регулировочных и режимных факторов.

Состав и качество топлива. Качество топлива в основном оказывает прямое влияние на содержание в ОГ как нормируемых, так и ненормируемых токсичных компонентов. Содержание серы и ее соединений в ОГ (главным образом, в виде твердых частиц) пропорционально содержанию серы в топливе. Увеличение доли циклических и полициклических ароматических углеводородов в топливе повышает дымность ОГ. Влияние на эмиссию NO_x непосредственно проявляется через органические соединения азота, входящие в состав топлива. Возможно также косвенное влияние на образование NO_x через скорость горения топлива и температуру пламени. Эффект по снижению всех токсичных выбросов, полученный за счет улучшения качества топлива, достаточно очевиден и находится в пределах 10–20 % [40]. Подробный анализ влияния физико-химических свойств дизельного топлива на выбросы ВВ с ОГ дизелей приведен в исследовании [131].

Различные присадки к топливам позволяют улучшать их моторные качества и воздействовать на состав ОГ. В частности, распространены антидымные присадки к топливу на основе различных металлов (например, бария), являющихся катализаторами горения, эффект по снижению дымности ОГ от применения которых может достигать 40-60 %. В течение многих лет изучается эффективность добавления воды к воздуху или топливу для улучшения различных показателей ПДВС [40]. Добавление воды к топливовоздушному заряду приводит к снижению максимальной температуры сгорания, что обусловлено затратами энергии на испарение воды и нагрев ее паров (удельная теплоемкость водяного пара выше теплоемкости воздуха) и, следовательно, к снижению интенсивности образования оксидов азота.

Альтернативные топлива в настоящем исследовании не рассматриваются.

Коэффициент избытка воздуха. В дизелях общий коэффициент избытка воздуха обуславливает содержание в ОГ твердых частиц (сажи) и углеводородов, но мало влияет на концентрацию СО. Четкое увеличение продуктов

неполного сгорания и сажеобразования наблюдается только при коэффициенте избытка воздуха менее 1,35–1,40.

Увеличение давления воздушного заряда (например, повышением степени наддува, использованием двухступенчатого наддува) влечет за собой снижение эмиссии оксида углерода, сажевых частиц. Влияние повышения давления на оксиды азота неоднозначно, так как, с одной стороны, увеличивается коэффициент избытка воздуха, снижая эмиссию NO_x , с другой – растет температура воздуха на впуске в цилиндр, увеличивая эмиссию оксидов азота. В современных дизелях обычно используются регулируемые турбокомпрессоры (например, с изменяемой геометрией), что обеспечивает оптимальную величину давления воздушного заряда для каждого режима работы ПДВС.

Снижение температуры воздушного заряда (например, использованием ОНВ) на каждые $10\text{ }^\circ\text{C}$, позволяет уменьшить удельные выбросы NO_x примерно на 10 % [76, 20].

Сопротивление систем впуска и выпуска оказывает влияние на давление и температуру воздушного заряда. Обычно клапаны открываются с помощью кулачкового механизма с постоянным профилем кулачка, при этом на режимах работы двигателя, отличающихся от номинального, закон подъема клапанов не является оптимальным. В настоящее время наблюдается тенденция замены традиционных механических газораспределительных механизмов на системы с электромагнитным, гидравлическим или электрогидравлическим приводом. Подобную систему применяет, например, «Caterpillar» (Variable Valve Actuation - VVA) на дизелях серии C13 и C15.

От геометрии впускного клапана и канала зависит аэродинамика движения воздушного заряда, т.е. особенности процесса смесеобразования.

Величина надпоршневого зазора обуславливает объем зоны гашения пламени при положении поршня около ВМТ, т.е. определяет эмиссию продуктов неполного сгорания, в основном – углеводородов.

Геометрия боковой поверхности поршня определяет количество масла, попадающего в камеру сгорания со стенок цилиндра. От этого параметра зависят выбросы углеводородов, оксида углерода и сажевых частиц.

Увеличение степени сжатия приводит к росту температур горения и продуктов сгорания, к росту эмиссии NO_x и снижению эмиссии CH [9].

Тип смесеобразования. При пленочном смесеобразовании наблюдается наименьшее количество CO , CH и сажевых частиц в ОГ; при объемном – оксидов азота. Объемно-пленочное смесеобразование занимает промежуточное положение.

Момент впрыскивания топлива. Образование ВВ в дизелях существенно зависит от момента впрыскивания топлива, определяемого углом ПКВ до ВМТ ($\theta_{\text{впр}}$). Позднее впрыскивание переносит окончание процесса сгорания за пределы процесса расширения на начало выпуска, в результате чего количество продуктов неполного сгорания в ОГ возрастает.

Увеличение $\theta_{\text{впр}}$ благоприятно сказывается на содержании несгоревших углеводородов, однако вызывает резкое увеличение эмиссии оксидов азота. Последнее объясняется тем, что с ростом $\theta_{\text{впр}}$ увеличивается период задержки воспламенения, что, в свою очередь, приводит к повышению доли цикловой подачи топлива, прошедшей предпламенную подготовку и сгорающей с высокой скоростью. Это обуславливает рост максимальных давления и температуры цикла, естественно, приводящих к увеличению эмиссии оксида азота.

Геометрия распылителя обуславливает характер развития топливных струй: их количество, угол раскрытия, дисперсность топливных капель, дальность. Объем подыгольного колодца определяет эффект подтекания топлива после основного впрыска, что приводит к увеличению эмиссии углеводородов.

Положение носка распылителя относительно поршня определяет точку встречи вершины топливного факела с поверхностью камеры сгорания, что особенно важно для полуоткрытых камер сгорания.

Увеличение максимального давления впрыскивания топлива оказывает положительное влияние на качество смесеобразования, влечет более полное сгорание топлива и, как следствие, ведет к снижению выбросов оксида углерода, углеводородов, сажевых частиц и росту выбросов оксидов азота [73, 86, 105 и др.]. Одной из наиболее распространенных систем впрыскивания высокого давления в настоящее время является «Common Rail». Для более эффективной работы она дополняется системой электронного управления впрыском, которая является частью общей системы управления двигателем и обеспечивает оптимальные значения угла начала подачи и давления впрыскивания топлива для каждого скоростного и нагрузочного режима.

Увеличение давления начала впрыскивания топлива приводит, с одной стороны, к задержке начала впрыскивания (выбросы NO_x снижаются), с другой – к увеличению дисперсности капель (выбросы NO_x растут). Совокупное влияние этих факторов определяется особенностями рабочего процесса.

Режим работы двигателя. Увеличение нагрузки на дизель, компенсируемое повышением цикловой подачи топлива, приводит к росту максимальных давлений и температур цикла, соответственно, увеличению концентрации NO_x в ОГ, увеличению времени испарения топлива, что влечет рост концентрации продуктов неполного сгорания [60]. Однако характер изменения удельных величины выбросов ВВ не столь однозначен.

Общей закономерностью образования токсичных компонентов в ОГ дизелей является рост продуктов неполного сгорания (CO , CH и сажи) по мере увеличения нагрузки (рисунок 1.1), когда коэффициент избытка воздуха понижается от 6–8 единиц на холостом ходу до 1,4–1,6 на режиме номинальной мощности.

В ОГ дизелей на режиме холостого хода содержится всего около 0,1 % (по объему) CO , концентрация которого увеличивается при росте среднего эффективного давления вплоть до 0,2 % на режиме полной подачи топлива.

Образованию углеводородов в продуктах сгорания дизелей способствуют относительно низкие температуры среды и локальный дефицит кислорода.

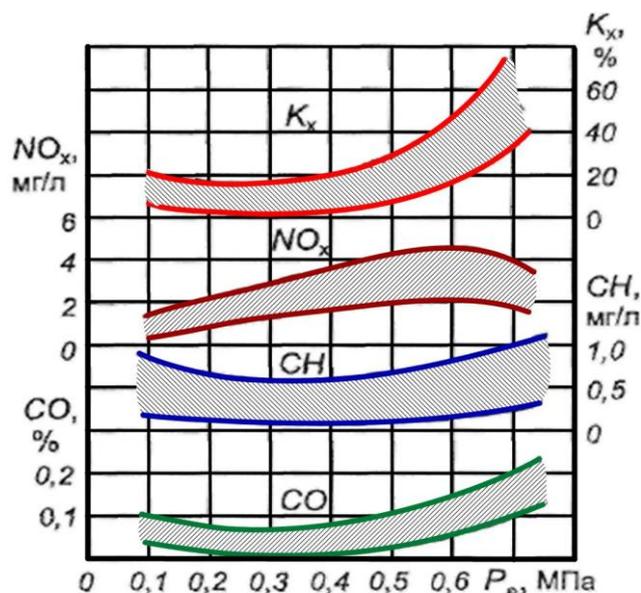


Рисунок 1.1 - Зависимость содержания вредных веществ в отработавших газах дизеля от нагрузки [13]

Поэтому при работе дизелей на малых нагрузках и на режиме холостого хода регистрируется наибольшее количество углеводородов (вплоть до $0,8 \text{ г/м}^3$). Минимум выбросов CH проходит при $p_e = 0,4\text{--}0,6$ МПа, а при полной подаче топлива, вследствие локального дефицита кислорода в зонах диффузионного горения, концентрация CH вновь повышается.

Еще более значительным при повышении нагрузки является рост выбросов сажи. Резкое повышение дымности, начиная с $p_e = 0,4\text{--}0,5$ МПа, объясняется ухудшением процессов смесеобразования, изменением общего и локальных коэффициентов избытка воздуха и замедлением диффузионной стадии сгорания на фоне повышающейся температуры в зоне пламени. В результате для каждого типа дизеля существуют предельные значения цикловой подачи, при которых можно обеспечить удовлетворение нормативов по дымности ОГ. Такая цикловая подача устанавливается при регулировке топливных насосов высокого давления и не должна выходить за эти пределы в процессе эксплуатации.

Количество оксидов азота в ОГ дизелей по мере роста нагрузки также возрастает, достигая максимума при $p_e = 0,5\text{--}0,6$ МПа, что объясняется ростом темпера-

турного уровня цикла при сохранении достаточного количества несвязанного кислорода. Дальнейший рост нагрузки приводит к ухудшению смесеобразования вследствие увеличения цикловых подач топлива и появления в камере сгорания большого числа зон, переобогащенных топливом. В этих зонах уменьшается температура и недостаточна концентрация несвязанного кислорода, что уменьшает эмиссию NO_x в ОГ.

При работе дизеля по скоростной характеристике с увеличением частоты вращения коленчатого вала наблюдается некоторое снижение выбросов CO и CH (рисунок 1.2), что объясняется интенсификацией процессов впрыскивания и распыливания топлива и усилением вихревого движения воздушного заряда.

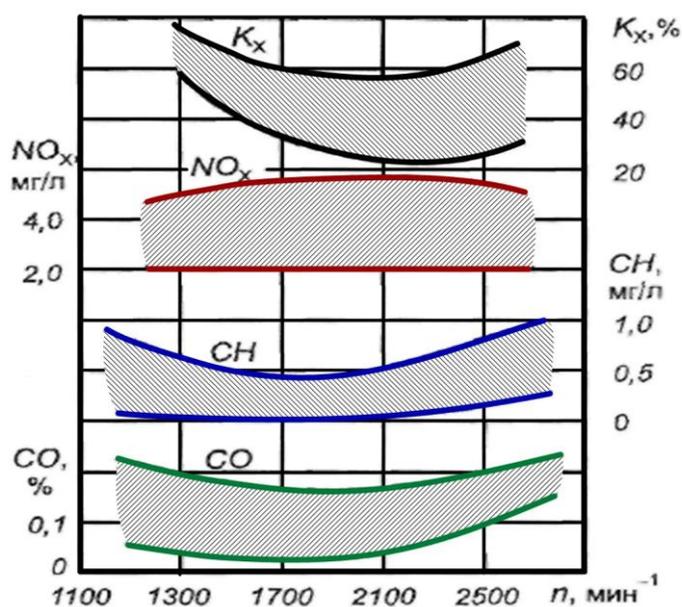


Рисунок 1.2 - Зависимость содержания вредных веществ в отработавших газах дизеля от частоты вращения коленчатого вала [13]

По этим же причинам уменьшается концентрация сажи, что обуславливает снижение дымности K_x . Однако такое улучшение экологических характеристик происходит только до определенного режима (примерно до $n = 1700\text{--}2000 \text{ мин}^{-1}$). Дальнейший рост частоты вращения коленчатого вала сокращает время и ухудшает качество смесеобразования, что ведет к повышению концентрации CO и CH и увеличению выбросов сажи, сопровождающегося повышением дымности. При

определенной для каждого типа дизеля частоте вращения наступает предел дымления, что ограничивает его быстроходность.

Увеличение частоты вращения коленчатого вала слабо влияет на выброс оксидов азота, хотя, как показано на рисунке 2, максимальное содержание NO_x соответствует режиму полного и быстрого сгорания топлива, когда содержание CO и CH минимально.

Уменьшение частоты вращения коленчатого вала дизеля ведет к увеличению времени, отводимого на процесс смесеобразования, что позволяет повысить его качество, а также к уменьшению длительности процесса сгорания, выраженной через угол ПКВ, что влечет повышение максимальных температур и давлений сгорания.

1.3. Способы повышения экологической безопасности дизелей

Поскольку в ОГ дизелей при их нормальном техническом состоянии содержится небольшое количество оксида углерода и несгоревших углеводородов, то основное внимание уделяется уменьшению выбросов оксида азота и твердых частиц – сажи [28, 75 и др.]. Наличие избыточного кислорода в ОГ не позволяет обеспечить нейтрализацию NO_x как это выполняется в бензиновых двигателях. В данном случае требуется вводить дополнительные восстановители, например аммиак (NH_3), что существенно усложняет двигатель. Поэтому преобладающим является подавление эмиссии NO_x непосредственно при сгорании топлива. С этой целью организация рабочего процесса дизелей корректируется путем:

оптимизации временных и энергетических характеристик впрыскивания топлива, обеспечивающих наилучшую микро- и макроструктуру заряда, а также минимальную задержку воспламенения;

оптимизации вихревого движения воздушного заряда;

совершенствования конструкции дизелей
впрыскивания воды во впускную систему;
использования водотопливных эмульсий;
применения рециркуляции ОГ.

В целом перечисленные приемы направлены на то, чтобы процесс сгорания начинался по возможности ближе к ВМТ при минимальном периоде задержки воспламенения.

Оптимизация временных и энергетических характеристик впрыскивания топлива. Образование ВВ в дизеле существенно зависит от качества смесеобразования, общего и локальных значений коэффициента избытка воздуха, а также температуры продуктов сгорания.

С учетом этого одним из факторов, изменяя который можно эффективно влиять на образование ВВ, является момент начала впрыскивания топлива. С целью улучшения экологических свойств дизелей угол опережения впрыскивания топлива относительно ВМТ ($\theta_{впр}$) устанавливается не исходя из минимизации удельных расходов топлива, а по условию компромисса между значениями допустимых выбросов оксидов азота и углеводородов, зависимость которых от угла $\theta_{впр}$ противоположна. В связи с этим для дизелей последних поколений момент начала впрыскивания топлива выбирается таким, при котором существенно снижается эмиссия оксидов азота и в то же время удельный выброс углеводородов не превышает 0,15–0,20 г/(кВт·ч) [31].

Рекомендуется сложная программа изменения момента начала впрыскивания топлива в зависимости от частоты вращения коленчатого вала, нагрузки и теплового состояния двигателя. При работе холодного двигателя на холостом ходу угол опережения впрыскивания топлива целесообразно увеличивать с ростом частоты вращения коленчатого вала, чтобы исключить появление «белого» дыма с большим содержанием углеводородов. Однако после прогрева двигателя значение $\theta_{впр}$ должно уменьшаться примерно на 10 град ПКВ. При работе «горячего» двигателя под нагрузкой программа изменения момента впрыскивания топлива

имеет совершенно иной характер: $\theta_{\text{впр}}$ должен уменьшаться при повышении скоростного и нагрузочного режимов работы дизеля от частоты вращения холостого хода до частоты вращения 800–1200 мин⁻¹ и сохраняться на уровне 5–6 град ПКВ после ВМТ при больших частотах вращения. Реализация таких программ осуществляется с помощью электронных систем управления топливоподачей.

Помимо момента начала впрыскивания топлива на образование ВВ влияет продолжительность впрыскивания. При слишком затянутом впрыскивании последние порции топлива вводятся непосредственно в «горячие» продукты сгорания и нагреваются при дефиците кислорода. Вследствие этого увеличивается количество продуктов неполного сгорания, возрастает выброс сажевых частиц. Поэтому в современных дизелях продолжительность впрыскивания уменьшают до технически возможных пределов в 20–30 град ПКВ.

Сокращение продолжительности впрыскивания достигается за счет существенного повышения давления впрыскивания ($p_{\text{впр}}$). Повышение $p_{\text{впр}}$ положительно влияет на мелкость распыливания, позволяя оптимизировать микроструктуру топливной струи и макроструктуру заряда и за счет этого снизить дымность ОГ (рисунок 1.3).

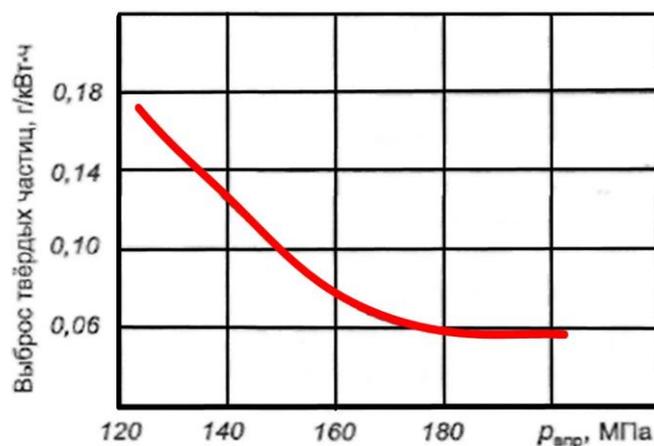


Рисунок 1.3 - Зависимость выброса твердых частиц от давления впрыскивания топлива

В связи с этим в современном дизелестроении определилась совершенно четкая тенденция роста $p_{впр}$ до 100–120 МПа. Существуют варианты топливной аппаратуры, имеющие давление впрыскивания вплоть до 180 МПа и более.

Оптимизация вихревого движения заряда. Вихревое движение заряда вместе с параметрами топливной струи существенно влияет на макроструктуру топливовоздушной смеси. Как показывают опыты (рисунок 1.4) [61], существует вполне определенная интенсивность вихря, при которой минимизируются как выбросы продуктов неполного сгорания (CO , CH , C), так и удельный расход топлива. Однако в этом случае наблюдается рост выброса оксидов азота.

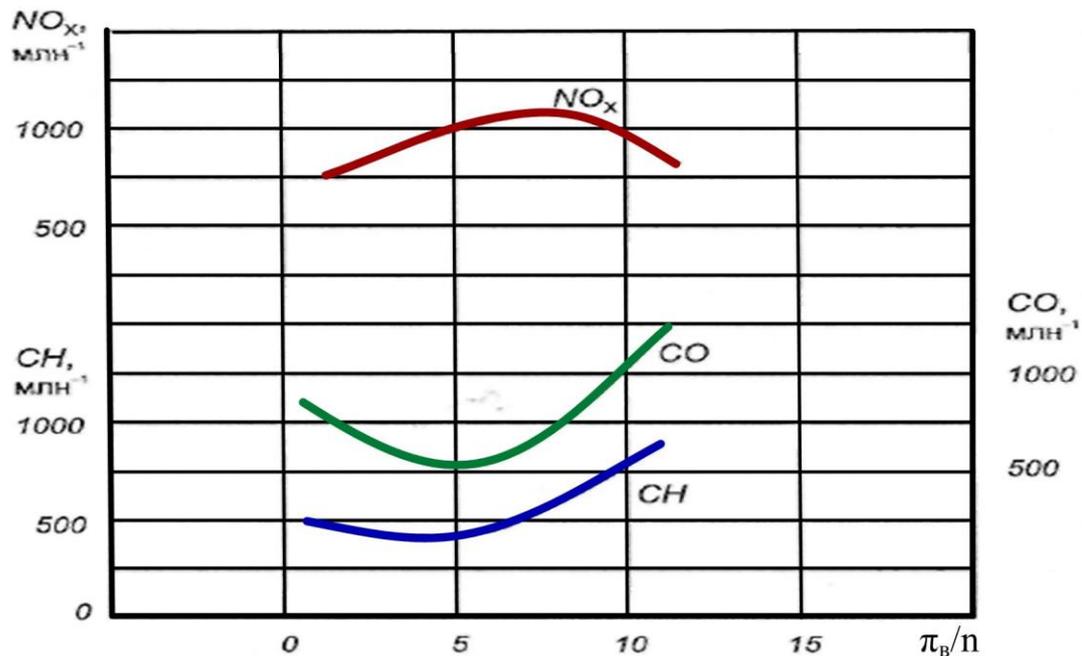


Рисунок 1.4 - Содержание вредных веществ в отработавших газах дизеля в зависимости от вихревого отношения π_v/n

Поэтому в последних моделях дизелей интенсивность вихревого движения заряда подбирается таким образом, чтобы добиться максимального снижения выбросов оксидов азота, даже при некотором повышении содержания в ОГ CO и CH .

Большое значение имеет рациональная организация вихревого движения заряда в двигателях, имеющих четыре клапана в каждом цилиндре. В этом варианте используются отдельные впускные каналы различной формы. Один канал за-

канчивается улиткообразной камерой, обеспечивающей закрутку потока и создающей в цилиндре вихревое движение заряда в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра. Второй канал выполняется прямым и инициирует вихревое движение в плоскости, параллельной оси цилиндра.

Совершенствование конструкции дизелей. Основными конструктивными приемами повышения экологической безопасности дизелей являются:

увеличение отношения хода поршня к диаметру цилиндра;

уменьшение надпоршневого объема;

заполнение зазора между гильзой и головкой прокладкой из термостойких синтетических материалов;

уменьшение жарового пояса поршня;

переход на четырехклапанные системы газораспределения.

Большие задачи по повышению экологической безопасности дизелей возлагаются на топливную аппаратуру. Применяются форсунки с минимальным подыгольным объемом и с электромагнитным управлением.

Впрыскивание воды во впускной трубопровод. Впрыскивание воды во впускную систему также оказывает положительное влияние на экологические показатели дизелей. Наличие воды в свежем заряде приводит к ее быстрому испарению и в конце сжатия топливо впрыскивается в практически гомогенную смесь воздуха с парами воды. При этом средняя и локальные температуры смеси мало отличаются от температуры заряда без добавки воды, так как объем паров составляет незначительную долю от объема воздуха. В этих условиях пары воды действуют как инертный балласт, незначительно влияющий на задержку воспламенения. Пониженная температура заряда и уменьшение концентрации свободного кислорода обуславливает снижение эмиссии NO_x . Установлено [72], что добавление 6 % (по массе) воды к поступающему в цилиндр воздуху позволяет уменьшить концентрацию NO_x в ОГ на 50 % (рисунок 1.5).

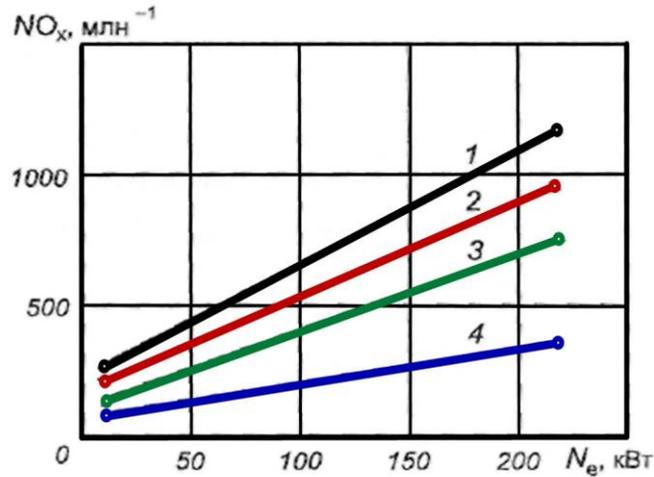


Рисунок 1.5 - Влияние впрыскивания воды на впуске в дизель на эмиссию оксидов азота:

1 – без впрыскивания воды; 2 – с впрыскиванием 1 % воды;
3 – с впрыскиванием 2 % воды; 4 – с впрыскиванием 6 % воды

Применение водотопливных эмульсий. Эмульсия – это система, состоящая из двух жидких фаз, одна из которых диспергирована в виде капелек размером 0,1–100 мкм (дисперсная фаза). Жидкость, в которой находятся капли, называется дисперсной средой. Водотопливные эмульсии могут быть прямыми (капли топлива в воде) и обратными (капли воды в топливе).

Существует несколько гипотез о механизме влияния водотопливных эмульсий на характер сгорания в дизеле [79, 80]. Одной из распространенных является гипотеза «микровзрывов» прогреваемых капелек воды в обратной эмульсии при впрыскивании ее в цилиндр. За счет интенсивного расширения пара, находящегося внутри капли топлива, обеспечивается вторичное распыливание топлива и смешивание его с воздухом. Результатом этого является уменьшение выбросов продуктов неполного сгорания.

В последнее время появились сведения о том, что улучшение полноты сгорания наблюдается и при использовании прямых эмульсий. На этом основании ряд исследователей считает, что при попадании в высокотемпературную среду происходит диссоциация молекул воды с последующим химическим взаимодействием

ствием радикалов – продуктов разложения углеводородов с водородом и гидроксильной группой (ОН).

Наиболее вероятным является существование обоих механизмов влияния воды в топливе. Кроме этого, испарение воды приводит к снижению локальной температуры в зонах воспламенения, что вызывает значительное увеличение задержки воспламенения. Отсюда возможно двойственное влияние воды в топливе на выброс NO_x : увеличение задержки воспламенения, интенсифицирует скорость нарастания давления и средней температуры, что увеличивает эмиссию NO_x , а снижение локальных температур за счет испарения воды – ее снижает. Поэтому в некоторых исследованиях наблюдалось либо слабое влияние добавки воды на эмиссию NO_x , либо даже увеличение последней.

Однако большинством исследований [21, 46, 58, 59, 81 и др.] установлено, что применение водотопливных эмульсий с высоким содержанием воды снижает концентрацию оксидов азота в ОГ. Так, при количестве воды в эмульсии, равном 20 %, содержание оксидов азота падает на 30–40 %, а при 40 % воды – на 100 %, составляя 6–8 тыс. чнм. Кроме того, при 20 % воды в эмульсии концентрация СО уменьшилась на 33 %, а при 40 % воды – на 66 % и находится на уровне 0,1 %. Установлено также, что наличие воды в топливе уменьшает образование сажи, препятствуя коагуляции ее молекул в крупные агломераты.

Тем не менее, перспективы впрыскивания воды и применения водотопливных эмульсий не бесспорны, поскольку влекут за собой многие проблемы. Для их реализации необходим запас воды (до 20–30 % от запаса топлива). Существуют сложности в приготовлении водотопливных эмульсий и обеспечении стабильности ее структуры во времени, поскольку вода со временем выделяется из топлива и оседает на дне топливного бака.

Работа системы топливопитания с водотопливной эмульсией становится проблемной при отрицательной температуре ОС.

Возникают также сложности с противокоррозионной защитой деталей топливной аппаратуры и самого двигателя.

Требуется достаточно сложная автоматика для дозирования воды, добавляемой в топливо.

Рециркуляция отработавших газов (РОГ) – это перепуск части ОГ во впускной коллектор (рисунок 1.6) [29, 31, 85 и др.]

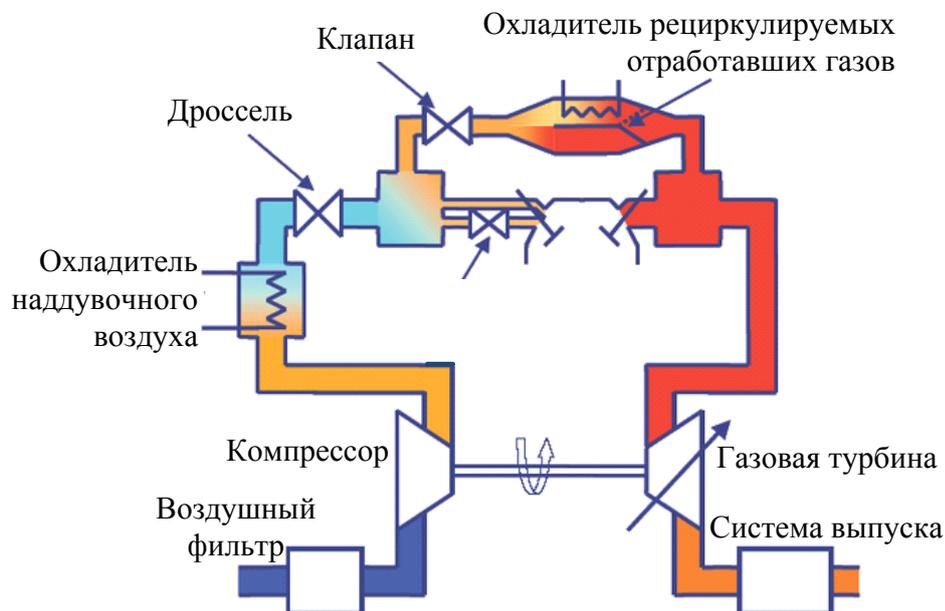


Рисунок 1.6 - Схема системы рециркуляции отработавших газов

Часть отработавших (условно инертных) газов попадает в цилиндры как балласт, что вызывает снижение максимальной температуры горения и, как следствие, уменьшение выбросов оксидов азота, образующихся при высоких температурах [31, 42, 62, 74]. Работа системы вызывает снижение мощности двигателя.

Механизм влияния разбавления свежего заряда ОГ заключается в том, что содержащийся в ОГ диоксид азота NO_2 , а также повышенная температура конца процесса сжатия ускоряют воспламенение (сокращают период задержки воспламенения), а также, являясь балластным компонентом, снижают теплоту сгорания, отнесенную к единице массы заряда, что уменьшает температурный уровень реакции, а также концентрацию несвязанного кислорода. В результате рециркуляции ОГ до уровня 25–45 % от массы циклового заряда содержание оксидов азота уменьшается более чем в два раза при средних нагрузках [13] (рисунок 1.7).

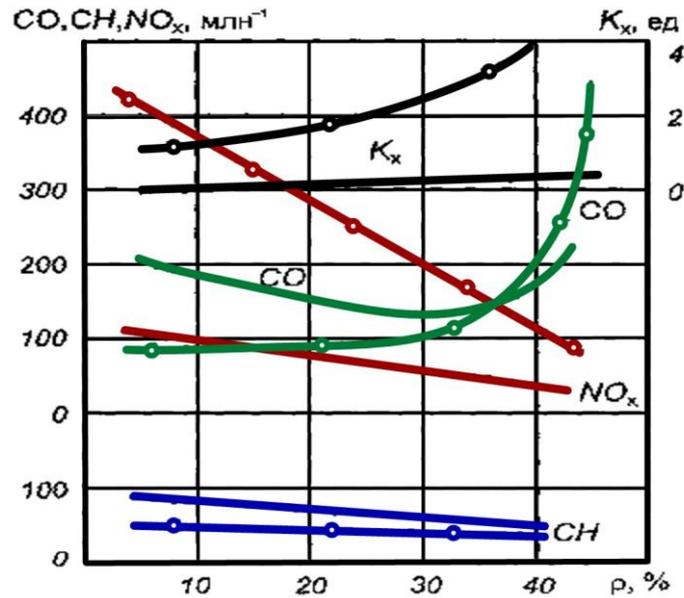


Рисунок 1.7 - Содержание вредных веществ в отработавших газах дизеля в зависимости от степени рециркуляции отработавших газов (ρ):

○—○ — при среднем эффективном давлении 0,364 МПа;
 — — холостой ход

Однако дальнейшее увеличение содержания ОГ в свежем заряде обычно приводит к увеличению выбросов продуктов неполного сгорания: оксида углерода (CO) и твердых частиц, а также к увеличению дымности ОГ. Что касается эмиссии суммарных углеводородов, то их изменение возможно как в сторону увеличения, так и уменьшения – в зависимости от особенностей организации как системы рециркуляции, так и самого рабочего процесса дизеля. Наряду со снижением NO_x рециркуляция ОГ обеспечивает также снижение выбросов альдегидов.

Практическое применение рециркуляции ОГ требует достаточно сложного автоматического управления, обеспечивающего оптимальное дозирование количества ОГ, направляемых во впускную систему.

Наиболее полно описанные выше способы обеспечения экологической безопасности использованы в дизеле ЭКОТЕК, разработанного в 90-х годах фирмой Opel совместно с фирмой GME, являющейся европейским отделением

ГМС. Следует подчеркнуть, что дизели с системами РОГ есть в производственных программах всех ведущих мировых производителей [31].

Для дизелей с турбонаддувом возможно применение различных схем системы рециркуляции:

1. Внешняя рециркуляция с отбором ОГ после турбины и их подводом во впускной коллектор перед компрессором (система низкого давления).

2. Внешняя рециркуляция с отбором ОГ перед турбиной и вводом их во впускной коллектор после компрессора перед ОНВ, либо после него (система высокого давления).

3. Внутренняя рециркуляция (на такте выпуска на некоторое время открываются впускные клапаны, через которые ОГ попадают во впускной коллектор). В современных конструкциях дизелей такая система РОГ реализуется управлением фазами газораспределения, что позволяет упростить конструкцию двигателя (не нужен специальный клапан) и повысить надёжность.

Применение для дизелей с турбонаддувом рециркуляции ОГ позволяет снизить выбросы оксидов азота в среднем на 60 %, при этом стоимость двигателя увеличивается примерно на 15 % [82].

Рециркуляция приводит к повышению температуры воздушного заряда, поэтому целесообразно применение первой схемы, а также охладителя ОГ в системе РОГ и/или ОНВ. На разных конструкциях двигателей система внешней рециркуляции имеет различное устройство. Вместе с тем, можно выделить общие конструктивные элементы данной системы: клапан рециркуляции; управляющий клапан; воздушные патрубки. Клапан рециркуляции непосредственно осуществляет перепускание ОГ из выпускной системы во впускной коллектор. Работа клапана основана на разряжении, возникающем во впускном коллекторе. За счет разряжения вакуумный преобразователь перемещает вал клапана. Величина открытия клапана определяет объем ОГ, поданных к впускному коллектору.

Управляющий клапан (активатор) регулирует величину разрежения, подающегося на клапан рециркуляции, работа которого осуществляется по команде

электронного блока управления в зависимости от режимов работы двигателя. На основании электрического сигнала от электронного блока управления открывается электромагнитный клапан. Разряжение из впускного коллектора подается на вакуумный преобразователь. Клапан рециркуляции открывается на определенную величину, и часть ОГ направляется во впускной коллектор.

На отдельных двигателях в системе РОГ, как было сказано, применяется охлаждение газов. Охлаждение ОГ дополнительно снижает температуру продуктов сгорания и, тем самым, уменьшает образование оксидов азота. Охлаждение производится путем прохождения охлаждающей жидкости через клапан рециркуляции. Реже в системе рециркуляции ОГ используется специальный радиатор, включенный в систему охлаждения.

Коэффициент рециркуляции обычно находится в пределах 8-12 % относительно суммарного расхода воздушного заряд. Однако некоторые производители, например «Cummins», «Detroit Diesel», «Volvo», доводят величину рециркуляции до 30-35 %. Применение рециркуляции ОГ приводит к падению мощности и ухудшению топливной экономичности.

Ниже приведены примеры реализации систем РОГ различными производителями.

Совместное применение систем рециркуляции и регулирования фаз газораспределения впервые было предложено фирмой John Deere для дизелей внедорожных машин.

Использование систем рециркуляции и регулирования фаз газораспределения совместно с сажевым фильтром DPF и нейтрализаторов окислительного типа обеспечивает выполнение норм Tier 4 Interim и, по мнению John Deere, является более целесообразным, чем впрыск мочевины по причинам недостаточно развитой инфраструктуры заправочных станций мочевины и низкой температуры замерзания раствора мочевины.

Фирма Caterpillar развивает технологию ACERT], в основе которой лежат: система подачи топлива с электронным управлением, система рециркуляции ОГ (рисунок 1.8).

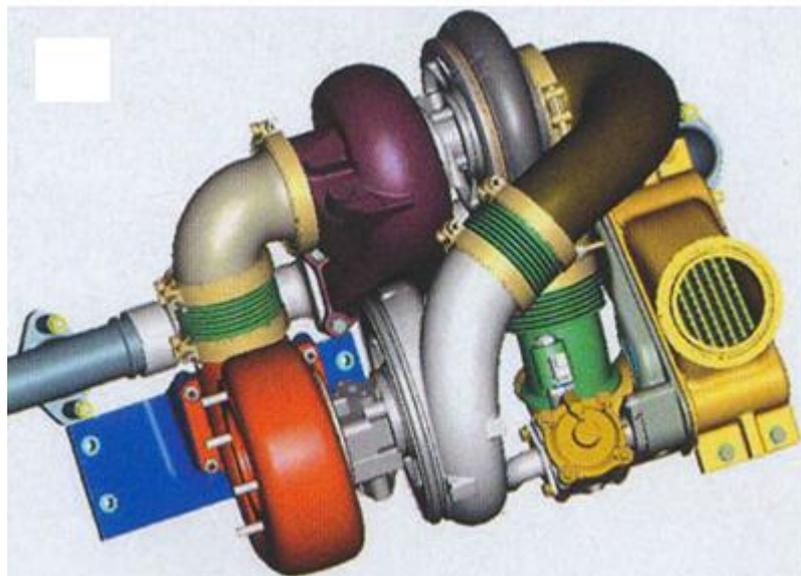


Рисунок 1.8 – Рециркуляция отработавших газов дизелей Caterpillar с технологией ACERT (система CGI)

В отличие от используемой в Европе системы SCR для очистки отработавших газов, технология ACERT не предусматривает применения мочевины или каких-либо других химических реагентов.

Нормы Euro 5 и Euro 6 потребовали внедрения системы подачи (рециркуляции) очищенных выхлопных газов CGI.

Основное отличие CGI от других известных систем РОГ состоит в качестве газа. В системе РОГ в цилиндры подаются охлажденные ОГ, а в CGI – очищенные. В обоих случаях газы с выгоревшим кислородом снижают температуру сгорания топливной смеси, но в CGI сажа в цилиндры не поступает. Система очистки ОГ CGI не требует применения расходных материалов, возвращаемые в цилиндры газы проходят двойную фильтрацию, не загрязняя сажей внутренние детали двигателя.

Технология ACERT используется также для дизелей Volvo Penta.

В двигателях Deutz объемом более 7 л наряду с обычной системой РОГ используется «внутренняя рециркуляция», т.е. кратковременное открытие впускного клапана на такте выпуска, а также РОГ с электронным управлением и охлаждением рециркулируемых газов. Последний вариант применяется на дизелях для мощных сельскохозяйственных и промышленных тракторов.

На перспективных моделях дизелей Scania не используется впрыск мочевины, тем не менее, они обеспечивают выполнение требований Евро 5. Это достигнуто использованием системы РОГ с двухступенчатым охлаждением до 50 °С (рисунок 1.9), турбокомпрессором с изменяемой геометрией и системы впрыска «Common Rail» (давление впрыскивания до 2400 бар, трехфазный впрыск).

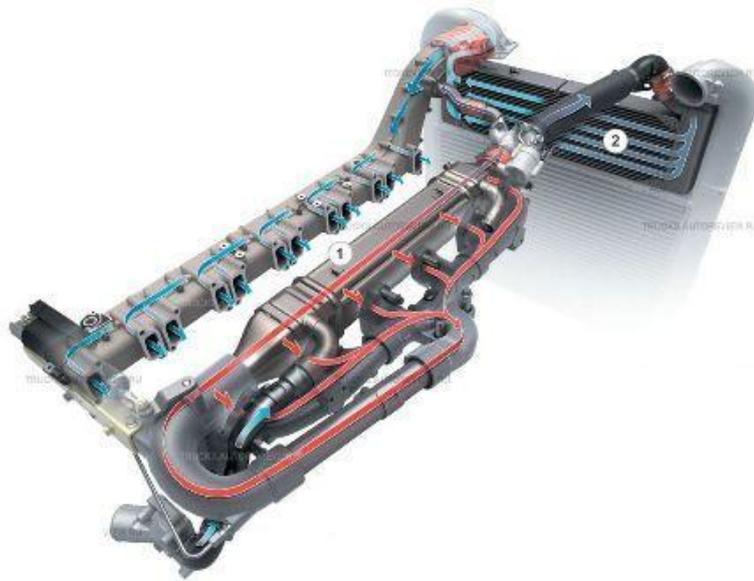


Рисунок 1.9 – Двухступенчатое охлаждение рециркулируемых газов в системе рециркуляции отработавших газов дизеля «Scania»:

1 – жидкостный охладитель, 2 – воздушный охладитель

Для охлаждения РГ, как правило, используют традиционные рекуперативные теплообменники [5, 18, 19, 45, 67, 70, 98, 118, 125, 130 и др.], характеризующиеся значительной массой, металлоемкостью (цветных металлов) и имеющие существенные гидравлические сопротивления.

Кроме того, следует отметить, что создание надежного и эффективного теплообменника для охлаждения РГ представляет собой сложную задачу из-за отложений и загрязнений, выделяющихся из ОГ дизеля.

С точки зрения снижения указанных негативных особенностей традиционных теплообменников в системе РОГ значительный интерес представляет использование для охлаждения РГ вихревой трубы (ВТ) [50, 51, 52, 54, 96]. Подробно этот вопрос будет рассмотрен во второй главе.

Применение систем нейтрализации и фильтрования отработавших газов. В эту группу систем входят:

жидкостные, термические, каталитические, термокаталитические, пламенные, селективные нейтрализаторы и нейтрализаторы с использованием низкотемпературной плазмы [10, 27, 35, 76, 82, 84, 86, 94, 107];

эжекционные дожигатели, устройства для подачи воздуха в выпускной трубопровод и дожигания продуктов неполного сгорания в выпускном коллекторе [4, 36, 88 и др.];

антидымные фильтры из синтетических материалов и электрофильтры [3, 4, 15, 36, 88];

- фильтрующие элементы из керамики с пропиткой или нанесением катализатора [1, 3, 36, 87, 88, 90, 108 и др.].

Наибольший эффект в плане комплексного снижения токсичности ОГ обеспечивают нейтрализаторы.

Различают три метода нейтрализации: жидкостную, термическую, каталитическую. Первые два метода целесообразно сочетать с фильтрацией твердых частиц (сажи) [88].

Жидкостная нейтрализация ОГ поршневых ДВС является достаточно разработанным и апробированным методом снижения вредных выбросов. Она основана на задержании сажи, твердых частиц и химической очистке ОГ путем пропускания их через воду или водные растворы химических реагентов.

При жидкостной нейтрализации поглощение оксидов азота может составить до 10–30 % от исходной концентрации. В зависимости от состава реагента может поглощаться до 80 % оксида углерода. Свежими реагентами альдегиды поглощаются на 50 %. Однако уже после восьми часов работы токсичные вещества перестают поглощаться из-за насыщения растворов [37].

Очистка газов от сажи осуществляется на 10–80 % в зависимости от режима эксплуатации двигателя. В жидкостных нейтрализаторах происходит значительное снижение уровней запаха ОГ и эффективное глушение шума выхлопа.

Сложность обслуживания жидкостных нейтрализаторов заключается в частой смене растворов в реакторах (как правило, каждые 8 часов работы); необходимости дозаправки водой через каждые 1,5–2 часа.

Кроме этого, недостатками рассматриваемых нейтрализаторов являются: большие масса и габариты, неэффективность очистки ОГ от CO и NO_x, невозможность применения в условиях отрицательных температур окружающего воздуха [32].

Термическая нейтрализация основана на принципе доокисления продуктов неполного сгорания при условии поддержания высоких температур и дополнительной подачи окислителя. Термические реакторы представляют собой реакционные камеры, встроенные в выпускную систему двигателя. Оптимальное протекание процесса окисления соответствует добавлению вторичного воздуха в количестве 15–40 % от расхода ОГ.

В пламенных дожигателях температура ОГ повышается вследствие сжигания дополнительного количества топлива, впрыскиваемого через дополнительную форсунку. Такие дожигатели в связи со сложностью конструкции необходимостью дополнительного расхода топлива высокой пожароопасностью, не нашли широкого применения [94].

Метод *каталитической нейтрализации* является одним из наиболее перспективных и распространенных [86]. Сущность этого способа заключается в беспламенном окислении горючих компонентов ОГ на поверхности катализатора. Дизели на всех режимах работают при избытке воздуха (при $\alpha > 1,0$), поэтому среда

ОГ является окислительной. В этой среде при достаточной температуре в присутствии катализатора обеспечивается дожигание СО и СН соответственно на уровне 85–90 % и 75–80 % (рисунок 1.10).

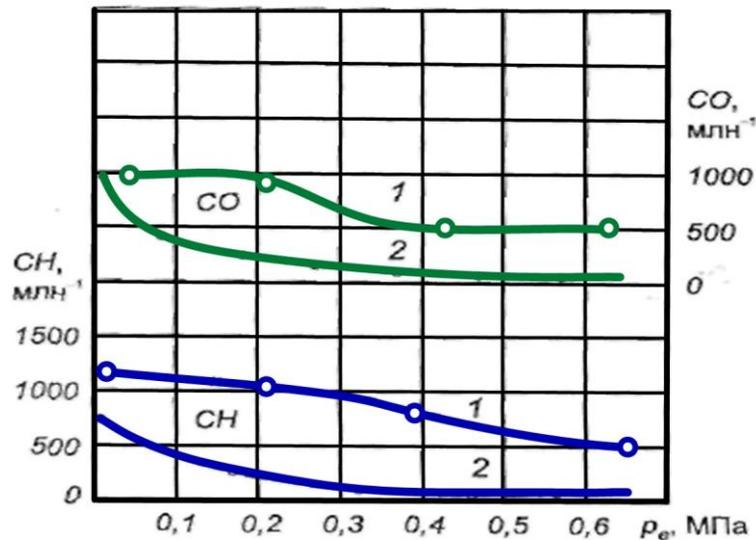


Рисунок 1.10 - Влияние нейтрализатора на содержание вредных веществ в отработавших газах дизеля [13]:

1 – без нейтрализатора; 2 – с нейтрализатором

В КН используют высокоактивные катализаторы, содержащие платину, палладий, никель, хром, медь, оксиды металлов, редкоземельные элементы и природные материалы, например, дуниты, цеолиты и другие.

Каталитические нейтрализаторы с платиновыми катализаторами, например П-7, обеспечивают снижение выбросов оксидов азота дизелей на 56 %, а алюмоплатиновыми – на 30 %, а с меднохромокислыми – на 80 %, с катализаторами ШПАК – в три раза [76, 103]. В присутствии платиновых и палладиевых катализаторов обеспечивается снижение содержания СО в ОГ на 50-80 %. Снижение содержания СН при этом происходит на 20-100 %, а при использовании меднохромокислых катализаторов на 80 % [76, 103].

При использовании всех названных выше катализаторов содержание сажи в ОГ снижается примерно в 1,1-2 раза, выбросов альдегидов в 3-10 раз, кроме этого отмечается снижение уровня запаха ОГ [68, 86, 120 и др.].

Особенностью процессов, протекающих в КН является то, что они связаны с рабочими процессами двигателей через целый ряд параметров, в частности, температуру, давление, скорость и влажность ОГ, их состав и др.

Кроме того, в нейтрализаторах имеют место явления конвективного и лучистого теплообмена, сопровождающие процессы доокисления продуктов неполного окисления и восстановления оксидов азота. Одновременно происходит образование кокса, осаждение соединений серы, приводящие к дезактивации катализаторов, и другие явления.

Продолжительность эксплуатации дизелей на режимах малых нагрузок в значительной мере влияет на срок службы КН [104, 119, 123 и др.] через образование коксовых отложений, осаждения смол и образование нагаров.

В работах сотрудников АлтГТУ [77, 86, 87 и др.] отмечалось, что срок службы и надежность КН тесно связан с режимами эксплуатации последних. Исследования [35, 76, 123 и др.] позволяют утверждать, что среди прочих причин весьма серьезными признаются: перегрев корпуса нейтрализатора; переохлаждение реактора, а также интенсивность образования коксовых отложений, осаждения смол и образование нагаров.

Необходимо отметить то, что существующие к настоящему времени катализаторы, имеют высокую эффективность лишь на режимах эксплуатации, обеспечивающих температуры ОГ на входе в нейтрализаторы порядка 520-750 К. При этих температурах нейтрализаторы окислительно-восстановительного типа снижают выбросы: оксидов азота на 40-60 %, углеводородов на 60-80 %, оксида углерода – на 70-90 % [76, 88, 124].

Весьма большая роль в формировании отмеченных негативных явлений играет температура ОГ.

Эффективный процесс доокисления углеводородов и оксида углерода происходит при температуре 400–500 °С, а сажи – более 500 °С (рисунок 1.11). Разложение оксидов азота производится на основе их взаимодействия с оксидом угле-

рода и водородом как активными восстановителями также требует достаточно высоких температур.

Если температура газов, попадающих в КН, составляет 150–200 °С, эффективность нейтрализатора снижается в два-три раза [76].

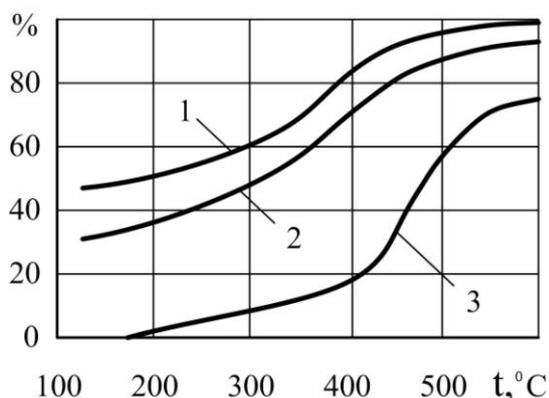


Рисунок 1.11 – Эффективность каталитического дожигания окиси углерода, альдегидов и сажи в присутствии платинового катализатора в зависимости от температуры [82]:

1 – CO; 2 – альдегиды; 3 – дымность

Разложение оксидов азота производится на основе их взаимодействия с окидом углерода и водородом как активными восстановителями также требует достаточно высоких температур. Если температура газов, попадающих в КН, составляет 150–200 °С, эффективность нейтрализатора снижается в два-три раза [76]. При температуре ОГ более 650 °С (что характерно для работы поршневых ДВС на больших нагрузках), эффект нейтрализации существенно замедляется и, что очень важно, возникает вероятность прогара корпуса нейтрализатора [86].

Известно также, что каталитическую активность в отношении реакций окисления или восстановления снижает накопление кокса в КН, что происходит как за счет хемосорбции некоторых его компонентов на активных центрах и их дезактивации, так за счет изменения макроструктуры катализатора, блокирования устьев пор и активной поверхности [14, 117]. Процессы же образования кокса на поверхности катализаторов также существенно зависят от температуры ОГ [14].

В работах И.Я. Тюрева показано, что скорость коксоотложения связана с температурой выражением $C_c = \exp^{(-15226/T)}$.

Приведенные примеры подтверждают наличие проблемы существенной зависимости эффекта работы КН от температуры ОГ. При этом вредны как малые, так и чрезмерно высокие ее значения. Между тем большую часть времени силовые установки мобильной техники работают на переменных скоростных и нагрузочных режимах. В результате этого температура ОГ колеблется в широких пределах (от 120 до 750 °С и выше), что создает проблему обеспечения оптимального температурного режима работы КН.

Селективные каталитические нейтрализаторы используются для снижения выбросов оксидов азота с ОГ (рисунок 1.12).

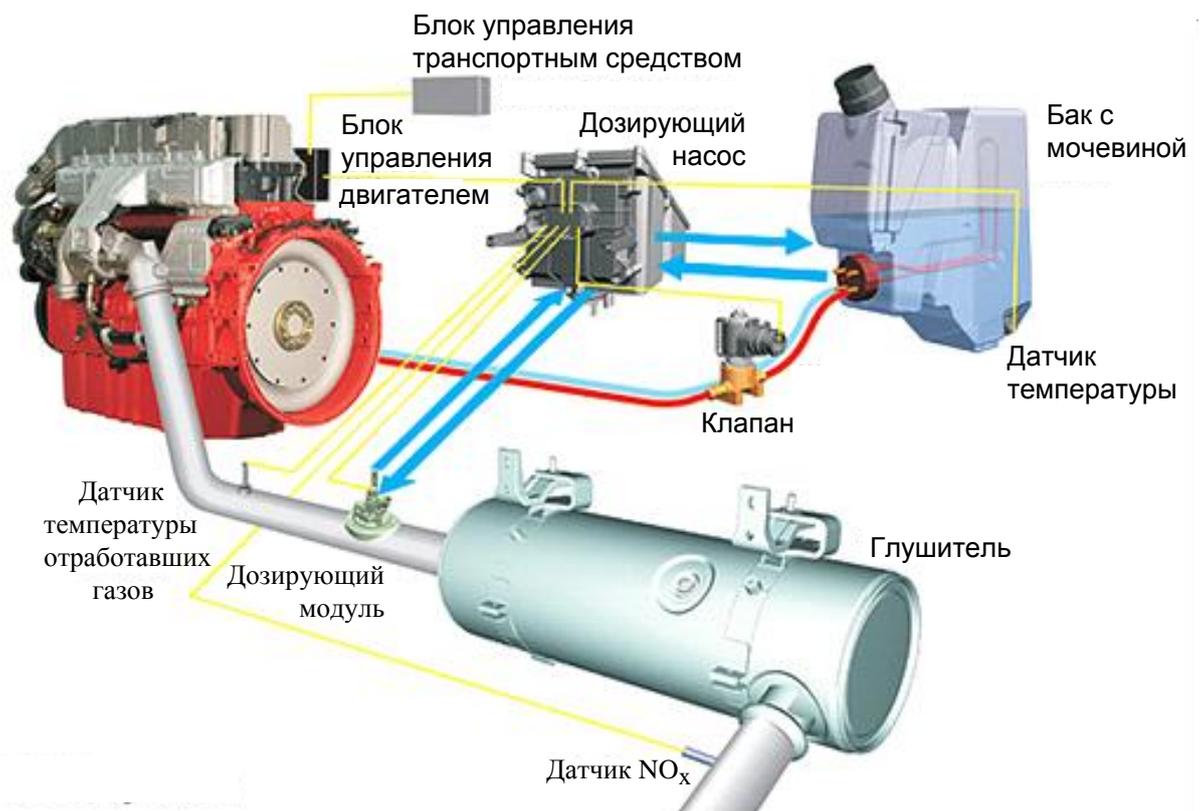


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема селективного каталитического нейтрализатора на основе впрыска мочевины (на примере дизеля «Deutz»)

Основой технологии является организация впрыска мочевины (или другого активного вещества) в ОГ перед их входом в каталитический конвертер на осно-

ве платины или ванадия. Мочевина, вступая в реакцию с NO_x , образует азот и воду. Селективное каталитическое восстановление известно как хорошо зарекомендовавшее себя решение, позволяющее обеспечить выполнение требований Евро 4 и Евро 5 к выбросам автотранспортных дизелей.

Один из перспективных методов нейтрализации ОГ – использование низкотемпературной плазмы. Такие нейтрализаторы включают узел подвода ОГ и масла, кварцевую стеклянную или керамическую трубку, используемую в качестве диэлектрического барьера, и два электрода – центральный и внешний – в виде металлической сетки из нержавеющей стали (рисунок 1.13).

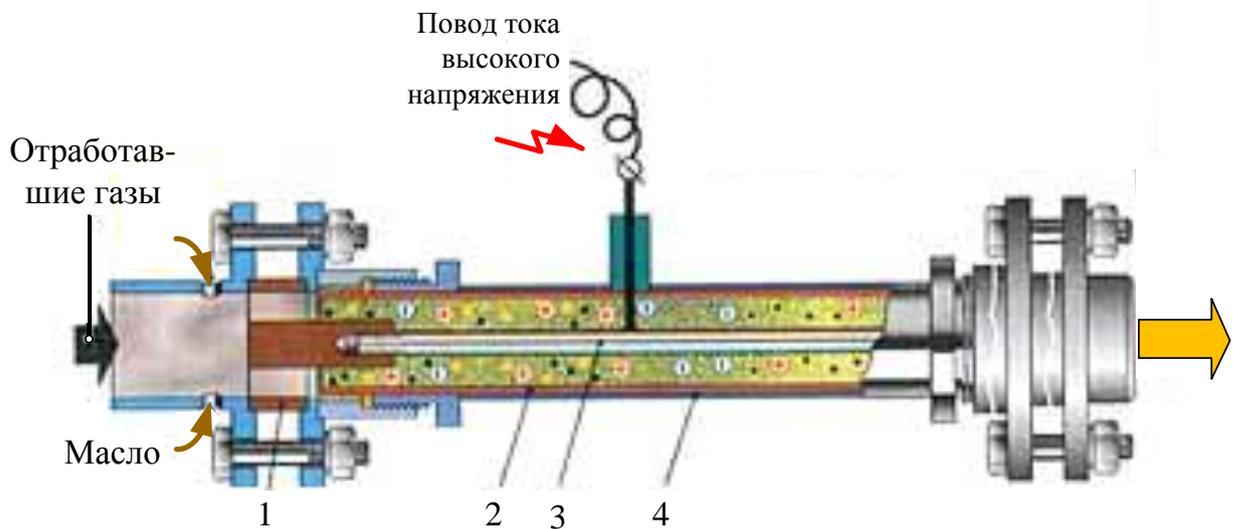


Рисунок 1.13 – Схема плазменного нейтрализатора:

*1 – узел подвода отработавших газов; 2 – кварцевая трубка (диэлектрик);
3 – центральный электрод; 4 – внешний электрод.*

В разрядное устройство подается ток от источника, формирующего импульс напряжения длительностью 250-350 мкс. Барьерный разряд возникает при электрическом напряжении 0,5-35 кВ и частоте следования импульсов 50-2000 Гц. Отработавшие газы дизеля направляются в плазмохимический реактор, предварительно пройдя сушку во влагоотделителе. В плазмохимическом реакторе к этим газам «подмешивают» масло. Под действием электрического разряда в трубках разрядного устройства частички сажи активно абсорбируют масло на своей по-

верхности. Для удаления сажи, частички которой находятся как бы в масляном коконе, используется маслоотделитель. Сажа собирается в специальный контейнер, а масло после дополнительной очистки в фильтре продолжает циркулировать по замкнутому контуру. Таким образом, удается обеспечить очень высокую эффективность поглощения частичек сажи – до 100 % во всем диапазоне оборотов дизеля.

Противосажевые фильтры фактически представляют собой нейтрализатор фильтрационного типа и используются не только для снижения выбросов сажистых частиц, но и вообще всех частиц, присутствующих в ОГ: сажи углеводородов, сульфатов, продуктов износа деталей двигателя. В настоящее время известны два основных типа фильтров: с навивкой и монолитный керамический. Другие типы фильтров являются производными от этих двух принципиальных схем.

Основная проблема для всех типов и конструкций фильтров – это их регенерация, т.е. восстановление функциональных свойств. Лучшие образцы зарубежных фильтров способны эффективно работать в течение 10–12 часов, после чего их сопротивление становится недопустимо высоким из-за большого скопления твердых частиц.

Регенерация обычно производится посредством выжигания частиц за счет разогрева фильтра, либо электроэнергией, либо пропускания горячих газов от автономной горелки. Температура фильтра при этом должна быть не менее 800 °С. Продолжительность регенерации 3–5 мин. Для гарантированного выгорания сажи поверхность каналов фильтра покрывают катализатором: обычно, благородными металлами или медью, что приводит к снижению температуры воспламенения сажи с 600–700 до 300–400 °С.

Система регенерации включает в себя топливную горелку с подачей дизельного топлива (хотя возможно использование бензина, газа и других топлив), устанавливаемую до фильтрующего блока по ходу движения ОГ.

* * * * *

Подводя итог рассмотрению способов повышения экологической безопасности дизелей можно констатировать, что в силу особенностей рабочего процесса этих двигателей, мероприятия, направленные на снижение выбросов продуктов неполного сгорания, оксида углерода, углеводородов и вредных частиц сопровождается ростом выбросов оксидов азота и наоборот, поэтому, для обеспечения соответствия дизеля действующим и перспективным нормам по токсичности необходимо использование методов снижения ВВ поршневыми ДВС, включающих сочетание систем РОГ с охлаждением РГ и нейтрализации ОГ.

Примером такого решения может служить дизель фирмы John Deere (рисунок 1.14).

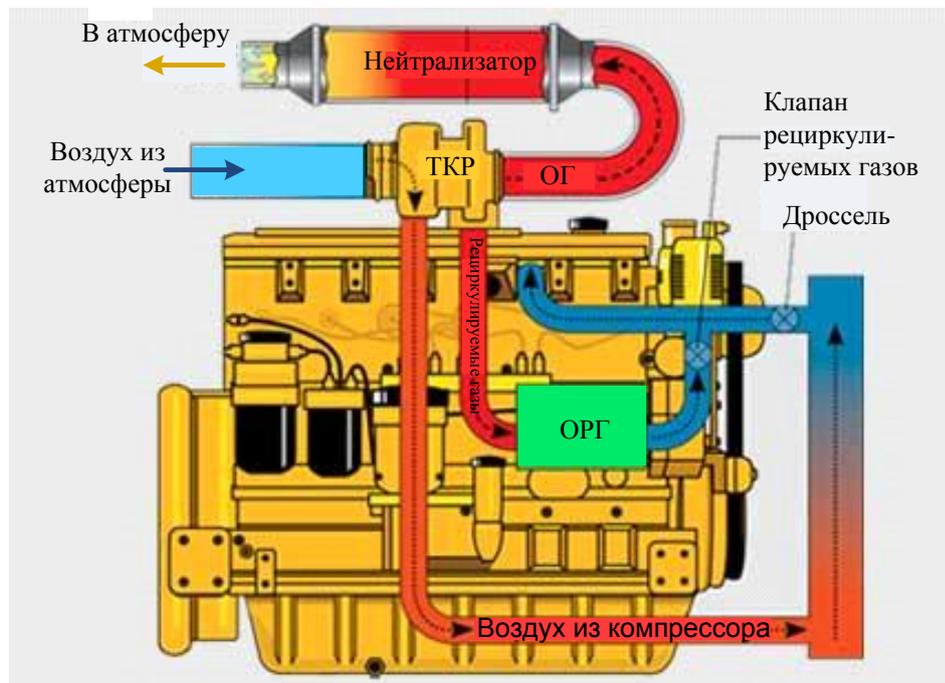


Рисунок 1.14 – Система рециркуляции отработавших газов дизелей John Deere

Принцип работы системы выпуска дизеля фирмы John Deere вполне понятен из рисунка и, на наш взгляд не требует пояснений.

1.4. Выводы, цель и задачи исследования

Обобщение рассмотренных выше материалов позволяет сделать следующие выводы.

1. Имеет место противоречие между безальтернативной в настоящее время и в ближайшем будущем потребностью человечества широко использовать ПДВС для своих нужд, с одной стороны, и необходимостью уменьшения вредного воздействия этих двигателей на человека и окружающую среду – с другой. Без, хотя бы частичного, разрешения этого противоречия существование человечества в сравнительно близком будущем станет проблематичным. Сказанное свидетельствует о том, что задача повышения экологической безопасности этих двигателей (и, в частности, дизелей) является одним из наиболее актуальных направлений современного двигателестроения.

2. Анализ основных факторов, влияющих на образование ВВ в дизелях показал, что в силу особенностей протекающего в них рабочего процесса, снижение выбросов продуктов неполного сгорания, оксида углерода, углеводородов и вредных частиц сопровождается ростом выбросов оксидов азота и наоборот. Поэтому для обеспечения соответствия дизеля действующим и перспективным нормам по вредным выбросам ведущие дизелестроительные фирмы для снижения эмиссии оксидов азота широко используют рециркуляцию ОГ (перепуск их части во впускной коллектор), а для уменьшения выброса продуктов неполного сгорания - нейтрализаторы.

3. Рассмотрение способов повышения экологической безопасности дизелей применением рециркуляции ОГ и их нейтрализации показало, что эффективность применения указанных способов зависит от температуры РГ и температуры ОГ (при этом вредны как малые, так и чрезмерно высокие ее значения). Однако большую часть времени силовые установки мобильной техники работают на переменных скоростных и нагрузочных режимах. В результате температура ОГ (а значит и

рециркулируемых газов) колеблется в широких пределах (от 120 до 750 °С и выше), что создает проблему обеспечения оптимальной работы указанных способов повышения экологической безопасности ПДВС.

Между тем, материалы работ [50, 51, 52, 54, 96] свидетельствуют о теоретической возможности использования ВТ для частичного решения отмеченной выше проблемы.

Цель настоящего исследования: повысить экологическую безопасность поршневых двигателей внутреннего сгорания за счет использованием вихревой трубы в системе рециркуляции отработавших газов.

Для достижения указанной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ проблем и перспектив снижения вредных выбросов с отработавшими газами ПДВС.

2. Рассмотреть возможные пути использования вихревых труб в системах снижения токсичности ПДВС.

3. Разработать программу, методику экспериментального исследования, создать экспериментальную установку для оценки возможности снижения вредных выбросов ПДВС (на примере дизеля 4ЧН13/15) за счет рециркуляции охлажденных с помощью вихревой трубы ОГ и регулирования с ее помощью их температуры перед КН.

4. Провести эксперимент, обработать и проанализировать его результаты с точки зрения возможности снижения ВВ, выбрасываемых ПДВС с ОГ (на примере дизеля 4ЧН13/15) за счет рециркуляции охлажденных ОГ с помощью ВТ и регулирования с ее помощью их температуры перед КН.

5. Провести расчетно-теоретическую оценку особенностей рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией ОГ и их охлаждением с использованием ВТ.

6. На основе полученных результатов сформулировать рекомендации по использованию вихревых труб с целью снижения вредных выбросов ПДВС и наметить перспективы развития этого направления.

Глава 2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТРУБ В СИСТЕМАХ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ПОРШНЕВЫХ ВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В технике достаточно хорошо известны вихревые холодильно-нагревательные установки. В 1933 г. французский инженер Ж. Ранк обнаружил, а 1946 г. немецкий физик Р. Хилш исследовал эффект перераспределения температуры сжатой жидкости (капельной или упругой) в поперечном сечении закрученного потока (эффект Ранка–Хилша) [49, 65, 78]. Устройство, в котором был реализован этот эффект, носит название трубы Ранка или вихревой трубы.

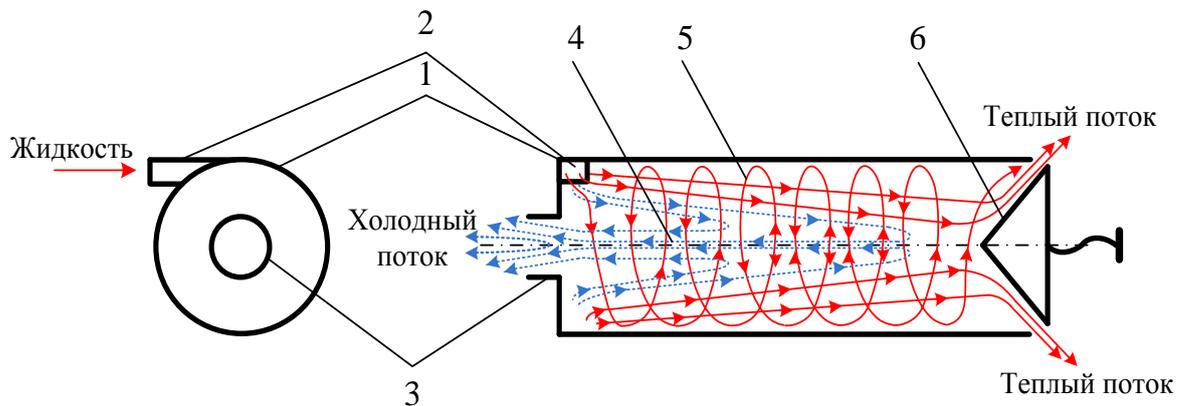


Рисунок 2.1 – Принципиальное устройство вихревой трубы:

- 1 – корпус; 2 – завихритель тангенциального типа для подачи жидкости;
3 – патрубок выхода холодного потока (диафрагма); 4 – центральная зона холодных течений; 5 – периферийное вихревое течение;
6 – дроссельный кран (вентиль)*

Важным здесь является то, что получение холодной и горячей жидкости (газа) осуществляется из одного источника, которым является закрученный поток этой жидкости.

Работает ВТ следующим образом. При втекании жидкости через завихритель образуется интенсивный круговой поток, осевые слои которого заметно ох-

лаждаются и отводятся через отверстие диафрагмы в виде холодного потока, а периферийные слои подогреваются и вытекают через дроссель в виде горячего потока. По мере прикрытия дросселя общий уровень давления в вихревой трубе повышается и расход холодного потока увеличивается при соответствующем уменьшении расхода горячего потока. При этом температуры холодного и горячего потоков также изменяются [78].

2.1. Возможные варианты использования вихревых труб для снижения токсичности поршневых двигателей внутреннего сгорания

Как отмечалось в разделе 1.3 (см. рисунок 1.6), в современном двигателе-строении, для снижения выбросов оксидов азота, широко используется рециркуляция ОГ. С целью повышения коэффициента наполнения цилиндров применяют промежуточное охлаждение РГ в специальных теплообменниках-охладителях.

Недостатками представленной на рисунке 1.6 системы являются:

- затраты энергии для охлаждения РГ (в случае использования жидкостных охладителей), что приводит к снижению мощности и экономичности двигателя;
- недостаточно эффективное (глубокое) охлаждение РГ, что снижает коэффициент наполнения ПДВС, а, следовательно, его мощность и экономичность;
- достаточно сложная и дорогая конструкции теплообменника, предназначенного для охлаждения РГ, снижающая надежность двигателя с рециркуляцией ОГ в целом;
- наличие специального клапана, регулирующего долю РГ, что также снижает надежность двигателя с рециркуляцией ОГ в целом.

В работах [50,51, 52 54, 55, 96, 97]. было предложено заменить охладитель ВТ. Простейший вариант такой замены показан на рис. 2.2 [96].

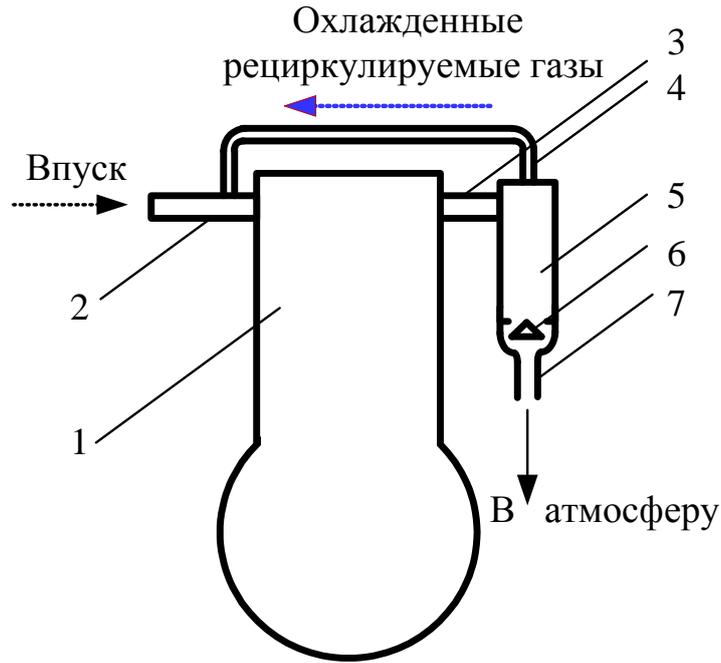


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема системы рециркуляции отработавших газов с использованием вихревой трубы:

1 – поршневой ДВС; 2 – впускной коллектор; 3 – входной патрубок; 4 – перепускной патрубок охлажденных отработавших газов; 5 – вихревая труба; 6 – дроссель вихревой трубы; 7 – патрубок выхода нагретых отработавших газов

Показанная система работает следующим образом. Отработавшие газы из цилиндра ПДВС по входному патрубку попадают в ВТ, где их поток разделяется на два – холодный, который направляется во впускной коллектор, и горячий, который выбрасывается в атмосферу через выпускной коллектор.

Доля холодных ОГ, направляющихся во впускной коллектор, регулируется дроссельным краном ВТ.

По сравнению с традиционной системой рециркуляции в рассмотренной обеспечивается: исключение затрат энергии для охлаждения РГ (в случае использования жидкостных охладителей); существенное повышение эффективности (глубины) охлаждения РГ, что увеличивает коэффициент наполнения ПДВС; повышение надежности двигателей с рециркуляцией ОГ в целом, так как упрощается устройство, обеспечивающее охлаждение РГ (в результате замены теплооб-

менника ВТ) и обеспечивается возможность регулирования доли РГ с помощью дроссельного крана ВТ, выполняющего роль клапана в обычной системе.

На рисунке 2.3 показан другой пример использования ВТ в системе РОГ поршневого ДВС [97].

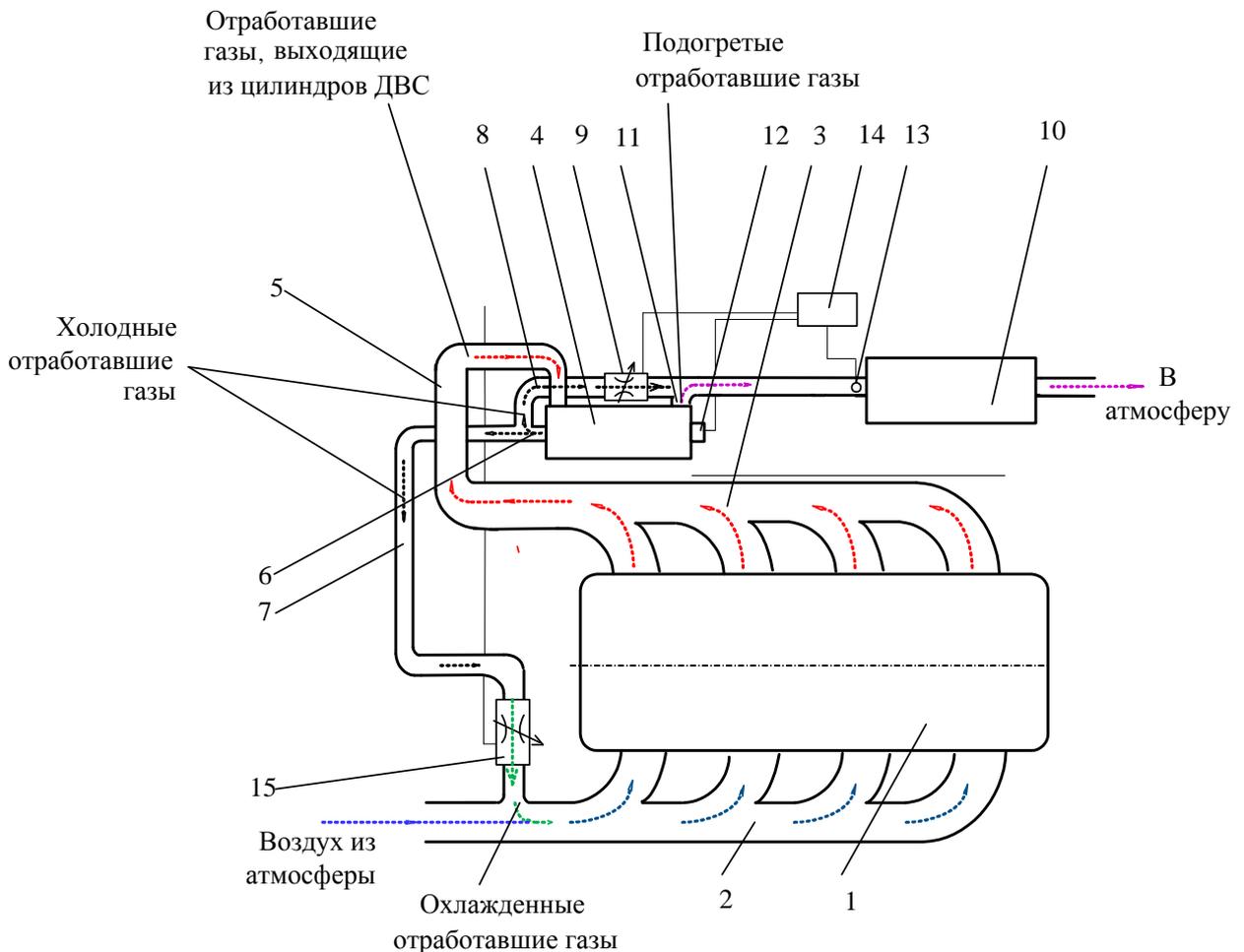


Рисунок. 2.3 – Использование вихревой трубы в системе рециркуляции отработавших газов:

1 - дизель; 2 - впускной коллектор; 3 - выпускной коллектор, 4 - вихревая труба; 5 - входные патрубки отработавших газов; 6 - выходные патрубки холодного потока отработавших газов; 7 - перепускной патрубков охлажденных рециркулируемых отработавших газов; 8 - подводящий патрубков отработавших газов; 9 - клапан регулирования количества холодных отработавших газов; 10 - каталитический нейтрализатор; 11 - выходной патрубков подогретого потока отработавших газов; 12 - дроссель; 13 - датчик температуры отработавших газов; 14 - электронный блок управления; 15 - клапан рециркуляции отработавших газов

Работает представленная на рисунке 2.3 система следующим образом. Отработавшие газы из цилиндра ПДВС по входному патрубку ОГ попадают в ВТ, где их поток разделяется на холодный и подогретый.

Холодный поток, выйдя из ВТ через выходной патрубок холодного потока 6, тоже разделяется на два, один из которых через перепускной патрубок охлажденных РГ направляется в перепускной патрубок ОГ, а другой через подводящий патрубок 8 – на вход в КН.

Подогретый поток ОГ после выхода из ВТ через выходной патрубок подогретого потока ОГ также направляется в КН.

На входе в КН холодный и подогретый потоки ОГ смешиваются. Температура смешанного потока регистрируется датчиком температуры, сигнал от которого поступает в электронный блок управления, который обеспечивает необходимую температуру ОГ на входе в КН при работе двигателя на различных режимах путем изменения доли холодных газов с помощью клапана регулирования количества холодных ОГ.

В то же время электронный блок управления обеспечивает целесообразную степень рециркуляции (долю РГ), воздействуя на клапан рециркуляции ОГ, и изменяя доли холодного и подогретого потоков ОГ на выходе из ВТ, воздействуя на дроссель.

По сравнению с традиционной системой РОГ в предложенном варианте сохраняются все достоинства предыдущего варианта и дополнительно обеспечивается целесообразная температура ОГ на входе в КН, что позволяет повысить эффективность и надежность его работы.

Аналогичная система может быть использована и в двигателях с наддувом, позволяющая расширить функциональные возможности ВТ.

На рисунке 2.4 показана принципиальная схема комбинированного двигателя с ОНВ, рециркуляцией и нейтрализацией ОГ, оборудованного ВТ, установленной на выпуске после газовой турбины [50].

Охлажденный поток ОГ направляется в ОНВ и охлаждает наддувочный воздух. После ОНВ этот поток поступает в трубопровод, по которому часть ОГ из выпускного коллектора направляется во впускной трубопровод. Количество РГ регулирует клапан рециркуляции ОГ, связанным с блоком управления.

Температура свежего заряда во впускном коллекторе регулируется клапаном 6, приводимым в действие блоком управления в зависимости от сигнала, поступающего от датчика температуры свежего заряда.

Подогретый поток ОГ на выходе из ВТ разделяется на два.

Первый направляется в КН, повышая в нем температуру, что обеспечивает высокоэффективную его работу на малых нагрузках и режимах холостого хода (известно, что использование КН при температурах ниже 350 °С является неэффективной, кроме того, продолжительная эксплуатации дизеля на режимах малых нагрузок в значительной мере влияет на срок службы нейтрализатора вследствие образования коксовых отложений, осаждения смол и нагаров [86]).

Однако при работе двигателя на режимах внешней скоростной характеристики КН испытывает высокие термические нагрузки, под действием которых возможны перегрев и прогар его корпуса, а также разрушение каталитических элементов.

Поэтому при необходимости снижения температуры ОГ, поступающих в КН, часть охлажденных в ВТ ОГ через клапан 10 поступает на вход в нейтрализатор.

Оптимальная температура смешенного потока ОГ регулируется блоком управления, в который поступают сигналы от датчика температуры 13.

Часть подогретых ОГ после ВТ направляется в подогреватель топлива, установленный после топливного насоса высокого давления, откуда топливо направляется к форсункам, что позволяет обеспечить качественное смесеобразование на режимах промежуточных нагрузок (особенно при пуске дизелей в условиях низких температур ОС).

Оптимальная температура подогрева обеспечивается регулированием количества проходящего через подогреватель потока ОГ с помощью клапана 15.

Управление этим клапаном осуществляется блоком 11 по сигналам, поступающим от датчика температуры топлива в трубопроводах высокого давления.

С учетом описанной работы комбинированного двигателя, оборудованного ВТ по рассмотренной схеме, можно сделать следующие выводы.

1. Исключение затрат энергии на охлаждение РГ (в случае использования жидкостных охладителей) позволяет несколько повысить экономические показатели двигателя. При этом существенно повышается эффективность (глубина) охлаждения РГ по сравнению с традиционными охладителями, что увеличивает коэффициент наполнения двигателя и также способствует улучшению экономических и экологических показателей двигателя.

2. Обеспечение оптимальной для эффективной работы КН температуры ОГ позволяет снизить выбросы ВВ в ОС, исключить вероятность образования коксовых отложений, осаждения смол и нагаров, а также исключить перегрев (прогар) корпуса нейтрализатора и разрушение его каталитических элементов.

3. Исключение затрат энергии на охлаждение наддувочного воздуха в ОНВ позволяет несколько повысить экономические показатели двигателя.

4. Подогрев топлива, поступающего в цилиндры, обеспечивает качественное смесеобразование на режимах промежуточных нагрузок, что способствует улучшению экономических, экологических и пусковых характеристик дизелей.

Несмотря на перечисленные положительные особенности, рассмотренная выше система может оказаться недостаточно эффективной из-за незначительного снижения температуры выходящего из ВТ потока охлажденных ОГ и недостаточного повышения температуры потока подогретых ОГ из-за низкого давления, поступающих в нее ОГ.

Задачу повышения эффективности работы ВТ можно решить, используя систему, аналогичную рассмотренной, но отличающуюся тем, что газовая турбина приводит в действие не только компрессор для сжатия наддувочного воздуха, но и дополнительный компрессор (позиция 13 на рисунке 2.5), через который проходят после турбины ОГ и сжимаются до повышенного давления.

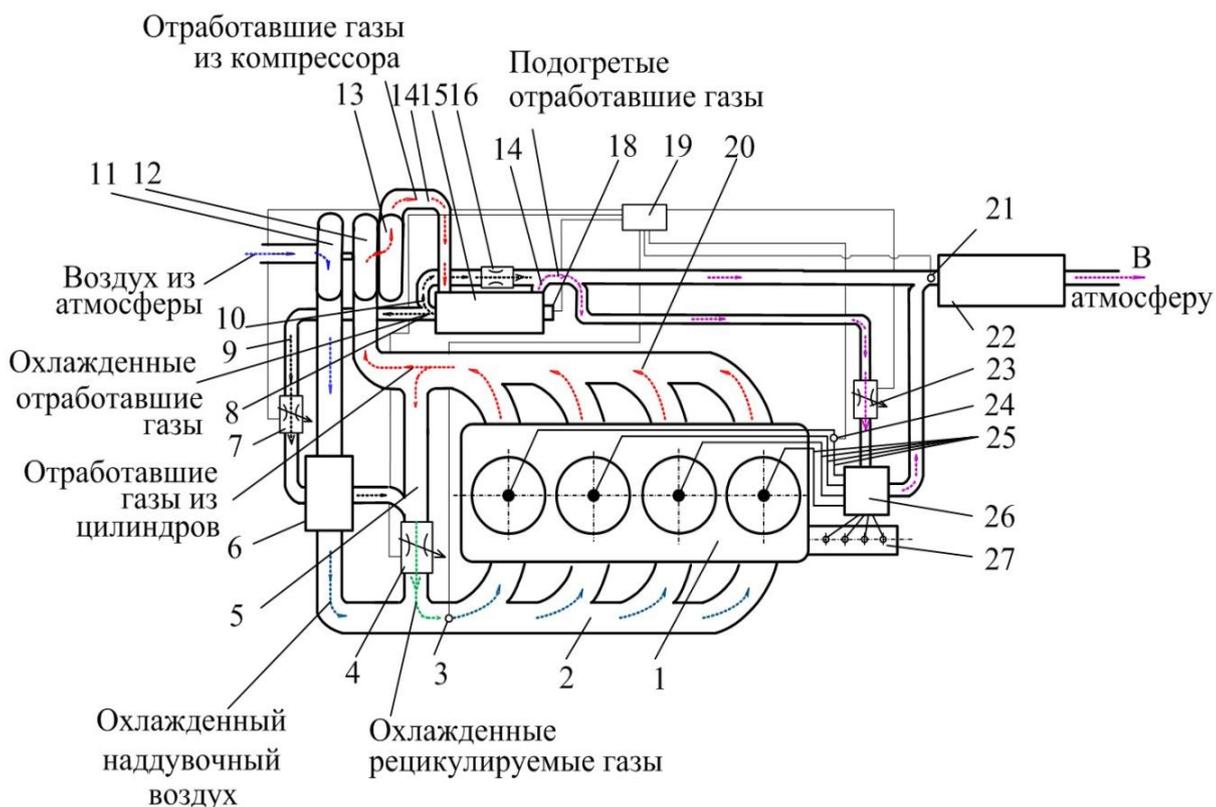


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема комбинированного ДВС с охладителем наддувочного воздуха, рециркуляцией и нейтрализацией отработавших газов (вариант 2)

В этом случае (по сравнению с предыдущей схемой) система снижения ВВ с ОГ обеспечивает более эффективную работу ВТ. Обусловлено это тем, что более высокое давление поступающих в нее после компрессора ОГ обеспечивает более существенное снижение температуры выходящего из ВТ потока охлажденных РГ и большее повышение температуры потока подогретых ОГ, поступающих в КН, при работе поршневого ДВС на режимах малых нагрузок и холостом ходу.

В остальном система с дополнительным компрессором работает аналогично той, которая была рассмотрена выше.

2.2. Математическая модель и теоретическое исследование вихревой трубы для системы рециркуляции отработавших газов

2.2.1. Математическая модель

Для проектирования и оптимизации параметров ВТ в диссертации выполнено моделирование с применением метода динамики частиц [51, 52, 53, 56]. Этот метод заключается в разбиении среды на большое количество (порядка 10^4) однотипных элементов ОГ шарообразной формы. Каждый элемент обладает основными физическими свойствами ОГ (плотность, модуль упругости, коэффициент внутреннего трения и др.), и способен двигаться в пространстве как отдельное тело по законам классической динамики.

При контакте элементов между собой или с рабочими поверхностями ВТ возникают силы, вызывающие как механическое ускорение элементов (и, соответственно, изменение их траектории движения), так и повышение давления внутри элемента, приводящее к изменению температуры и объема элемента (Рисунок 1).

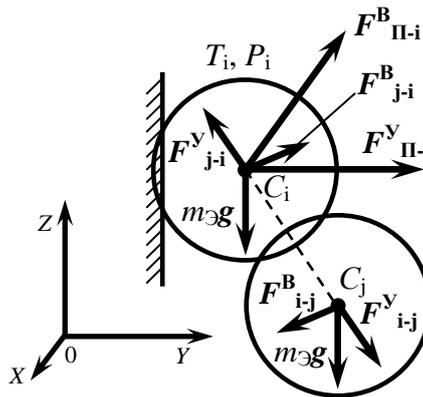


Рисунок 1 – Силы, действующие на элементы отработавших газов в вихревой трубе:

$m_{\text{Э}}g$ – сила тяжести; F_{j-i}^y и F_{j-i}^B – силы упругого и вязкого воздействия со стороны j -го элемента на i -й; $F_{\Pi-i}^y$ и $F_{\Pi-i}^B$ – силы упругого и вязкого воздействия со стороны рабочей поверхности на i -й элемент

Силовое взаимодействие принято упруго-вязким: упругие составляющие сил приводят к отталкиванию элементов друг от друга, вязкие – к внутреннему трению в среде рециркулируемых ОГ.

В указанных предположениях уравнения движения элементов ОГ составляются на основе второго закона Ньютона:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\mathcal{O}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \left\{ \begin{aligned} &c_{\Pi} \left(\frac{d_{\mathcal{O}}}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(x_i - x_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_{\mathcal{O}}}{2} \right) v_{xi}, \quad r_{i-\Pi} < \frac{d_{\mathcal{O}}}{2}; \\ &0, \quad r_{i-\Pi} \geq \frac{d_{\mathcal{O}}}{2}; \end{aligned} \right. + \\
 &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\mathcal{O}}} \left\{ \begin{aligned} &c(d_{\mathcal{O}} - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_{\mathcal{O}}) (v_{xi} - v_{xj}), \quad r_{ij} < d_{\mathcal{O}}; \\ &0, \quad r_{ij} \geq d_{\mathcal{O}}; \end{aligned} \right\}; \\
 m_{\mathcal{O}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \left\{ \begin{aligned} &c_{\Pi} \left(\frac{d_{\mathcal{O}}}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(y_i - y_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_{\mathcal{O}}}{2} \right) v_{yi}, \quad r_{i-\Pi} < \frac{d_{\mathcal{O}}}{2}; \\ &0, \quad r_{i-\Pi} \geq \frac{d_{\mathcal{O}}}{2}; \end{aligned} \right. + \\
 &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\mathcal{O}}} \left\{ \begin{aligned} &c(d_{\mathcal{O}} - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_{\mathcal{O}}) (v_{yi} - v_{yj}), \quad r_{ij} < d_{\mathcal{O}}; \\ &0, \quad r_{ij} \geq d_{\mathcal{O}}; \end{aligned} \right\}; \\
 m_{\mathcal{O}} \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \left\{ \begin{aligned} &c_{\Pi} \left(\frac{d_{\mathcal{O}}}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(z_i - z_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_{\mathcal{O}}}{2} \right) v_{zi}, \quad r_{i-\Pi} < \frac{d_{\mathcal{O}}}{2}; \\ &0, \quad r_{i-\Pi} \geq \frac{d_{\mathcal{O}}}{2}; \end{aligned} \right. + \\
 &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\mathcal{O}}} \left\{ \begin{aligned} &c(d_{\mathcal{O}} - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_{\mathcal{O}}) (v_{zi} - v_{zj}), \quad r_{ij} < d_{\mathcal{O}}; \\ &0, \quad r_{ij} \geq d_{\mathcal{O}}; \end{aligned} \right\} - m_{\mathcal{O}} g,
 \end{aligned} \right. \quad (2.1)$$

где i – номер элемента; $m_{\mathcal{O}}$ и $d_{\mathcal{O}}$ – масса и диаметр i -го элемента; x_i, y_i, z_i – декартовы координаты центра элемента; t – время; c_{Π} и k_{Π} – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия элементов с рабочей поверхностью вихревой трубы; $N_{\mathcal{O}}$ – количество элементов; j – номер элемента, возможно контактирующего с i -м элементом; c и k_e – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия элементов между собой; $r_{i-\Pi}$ – расстояние от центра i -го элемента до рабочей поверхности; $x_{i-\Pi}, y_{i-\Pi}, z_{i-\Pi}$ – декартовы координаты точки касания элемента рабочей поверхности; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j ; v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} – де-

картовы составляющие скорости i -го элемента; g – ускорение свободного падения.

Расстояние r_{ij} между центрами элементов рассчитывается на каждом шаге интегрирования через координаты центров по теореме Пифагора:

$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$. Расчет $r_{i-\Pi}$, $x_{i-\Pi}$, $y_{i-\Pi}$, $z_{i-\Pi}$ производится на основе аналитических выражений, задающих форму исследуемого фрагмента вихревой трубы (рисунок 2.7).

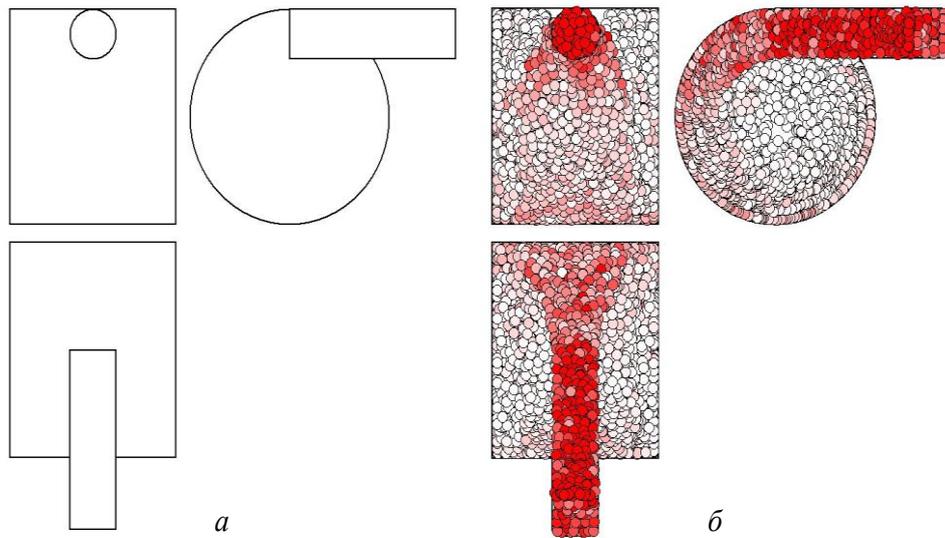


Рисунок 2 – Вихревая труба в модели (три проекции):

а – представление фрагмента вихревой трубы в модели в виде двух цилиндров;
б – результат моделирования – движение элементов рециркулируемых отработавших газов в вихревой трубе (уровень красного цвета элемента пропорционален давлению отработавших газов)

Уравнения (2.1) представляют собой дифференциальные уравнения второго порядка и решаются в процессе моделирования численным методом – методом Рунге-Кутты второго порядка [40]:

$$\left. \begin{aligned} x_i^{\tau+1} &= x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; & v_{xi}^{\tau+1} &= v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ y_i^{\tau+1} &= y_i^{\tau} + v_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{yi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; & v_{yi}^{\tau+1} &= v_{yi}^{\tau} + a_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ z_i^{\tau+1} &= z_i^{\tau} + v_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{zi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; & v_{zi}^{\tau+1} &= v_{zi}^{\tau} + a_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t, \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где i – номер элемента; τ и $\tau+1$ – индексы текущего и следующего временного шага; Δt – шаг интегрирования по времени; (x_i, y_i, z_i) , (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) и (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) – координаты положения, скорость и ускорение элемента.

Связь между объемом, давлением и температурой внутри элемента РГ задается уравнением состояния идеального газа. В рассматриваемой модификации модели объем всех элементов считается постоянным, поэтому температура рециркулируемых ОГ в элементе считается прямо пропорциональной внешнему давлению на элемент. На каждом шаге интегрирования τ производится расчет давления на элемент:

$$P_i^\tau = \frac{\sum_{j=1}^{N_\Omega} |\vec{F}_{ij}|}{k_\phi \cdot \pi \cdot d_\Omega^2}, \quad (2.3)$$

где k_ϕ – коэффициент формы, учитывающий несплошность заполнения пространства шарообразными элементами.

По известному давлению ОГ в элементе производится расчет температуры:

$$T_i^\tau = \frac{\nu R_g}{1/6\pi d_\Omega^3} P_i^\tau, \quad (2.4)$$

где ν – количество вещества в элементе; R_g – универсальная газовая постоянная.

Моделирование теплообмена между элементами производится на основе уравнения теплопроводности в конечных разностях на сетке, узлами которой являются центры элементов.

На каждом шаге интегрирования τ производится проверка: если элементы контактируют (расстояние r_{ij} меньше диаметра d_Ω), то в модели производится передача теплоты от одного элемента к другому и рассчитывается новое значение температуры элемента по итерационной формуле:

$$T_i^{\tau+1} = T_i^\tau + \chi \frac{T_j^\tau - T_i^\tau}{r_{ij}} \Delta t, \quad (2.5)$$

где χ – коэффициент температуропроводности ОГ.

Представленная модель с высокой детализацией описывает процессы, происходящие в ВТ, поэтому имеет большое число параметров, доступных к изменению. Среди них выбраны наиболее важные, влияющих на степень охлаждения рециркулируемых ОГ и холодопроизводительность (рисунок 2.8.).

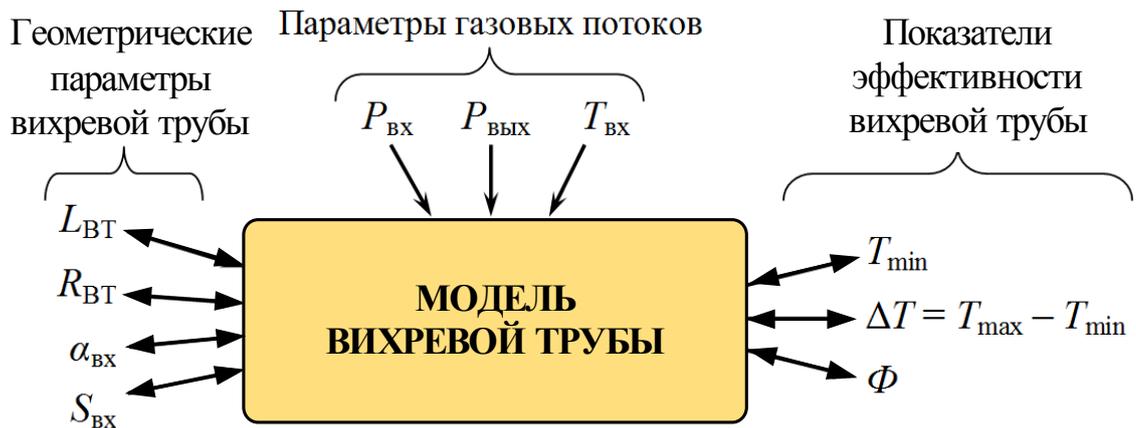


Рисунок 3 – Входные параметры и выходные характеристики математической модели

Входные параметры объединены в две группы.

Первая группа представляет собой геометрические параметры ВТ:

$L_{ВТ}$ – длина ВТ; $R_{ВТ}$ – радиус ВТ;

$\alpha_{ВХ}$ – угол входа потока рециркулируемых ОГ в ВТ относительно ее оси;

$S_{ВХ}$ – площадь входного отверстия.

Вторая группа параметров представляет собой физические параметры газовых потоков:

$P_{ВХ}$ – давление рециркулируемых ОГ на входе в ВТ;

$P_{ВЫХ}$ – давление рециркулируемых ОГ на выходе из ВТ;

$T_{ВХ}$ – температура рециркулируемых ОГ на входе в ВТ.

Наиболее важной выходной характеристикой модели является пространственное распределение температуры $T(x, y, z)$. Ее расчет производится путем усреднения по пространству и во времени температуры отдельных элементов T_i :

$$T(x, y, z) = \frac{1}{\left[\frac{t_y}{\Delta t} \right]_{\tau = \left[\frac{t-t_y}{\Delta t} \right]}} \frac{\sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} \begin{cases} T_i^{\tau}, & \sqrt{(x-x_i^{\tau})^2 + (y-y_i^{\tau})^2 + (z-z_i^{\tau})^2} \leq r_y; \\ 0, & \sqrt{(x-x_i^{\tau})^2 + (y-y_i^{\tau})^2 + (z-z_i^{\tau})^2} > r_y; \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} \begin{cases} 1, & \sqrt{(x-x_i^{\tau})^2 + (y-y_i^{\tau})^2 + (z-z_i^{\tau})^2} \leq r_y; \\ 0, & \sqrt{(x-x_i^{\tau})^2 + (y-y_i^{\tau})^2 + (z-z_i^{\tau})^2} > r_y; \end{cases}}, \quad (2.6)$$

где r_y и t_y – радиус усреднения по пространству и временной интервал усреднения по времени; t – текущий момент времени; [...] – операция выделения целой части числа.

По распределению $T(x, y, z)$ определяются выходные характеристики T_{\min} и $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ для выходного сечения вихревой трубы. Холодопроизводительность (Φ) определяется как количество элементов рециркулируемых ОГ, имеющих температуру, близкую к T_{\min} (отличающуюся от T_{\min} не более $0,2 \cdot \Delta T$), вышедших из ВТ за единицу времени.

Считаем, что в начальный момент времени модельная ВТ равномерно заполнена элементами рециркулируемых ОГ, а их начальная температура одинакова и составляет $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для создания входного потока рециркулируемых ОГ элементы появляются по одному во входной трубе через определенный промежуток времени и под действием образующегося давления движутся в сторону основного цилиндра ВТ.

Если элемент выходит через вершины основного цилиндра, он выводится из дальнейшего рассмотрения.

Для решения тепловой задачи температура рабочих поверхностей ВТ принимается постоянной и равной $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В модели приняты следующие допущения:

- в пределах одного элемента рециркулируемые ОГ представляют собой сплошную среду;
- элементы рециркулируемых ОГ движутся по законам классической динамики, механически взаимодействуя между собой и с поверхностями ВТ;
- каждый элемент рециркулируемых ОГ является однородным: объемная плотность, температура, давление одинаковы в пределах всего элемента;

–механическое взаимодействие между элементами носит линейный вязкоупругий характер;

– механические свойства элементов РГ зависят только от четырех параметров (диаметра, массы, коэффициента жесткости, вязкости);

– распространение теплоты описывается уравнением теплопроводности в общепринятой форме.

По общепринятой классификации моделей предлагаемая модель является не аналитической, а алгоритмической: выходные показатели рассчитываются по входным параметрам по определенному алгоритму (рисунок 2.9).

2.2.2. Программная реализация модели

Разработанная математическая модель представляет собой систему из нескольких тысяч дифференциальных и алгебраических уравнений. Для удобства исследования системы уравнений и проведения компьютерных экспериментов разработана компьютерная программа «Программа для моделирования вихревого охладителя рециркулируемых ОГ» на языке ObjectPascal в интегрированной среде программирования BorlandDelphi 7.0 (рисунок 2.10).

Программа предназначена для анализа движения рециркулируемых ОГ в ВТ. В тексте программы задаются геометрические параметры ВТ и физические свойства потока рециркулируемых ОГ. В ходе работы программы на экран компьютера регулярно выводятся три проекции ВТ с отображением состояния элементов рециркулируемых ОГ, текущие значения основных параметров, а также график или диаграмма распределения температуры. Программа позволяет на основе серий компьютерных экспериментов провести оптимизацию геометрических параметров трубы.

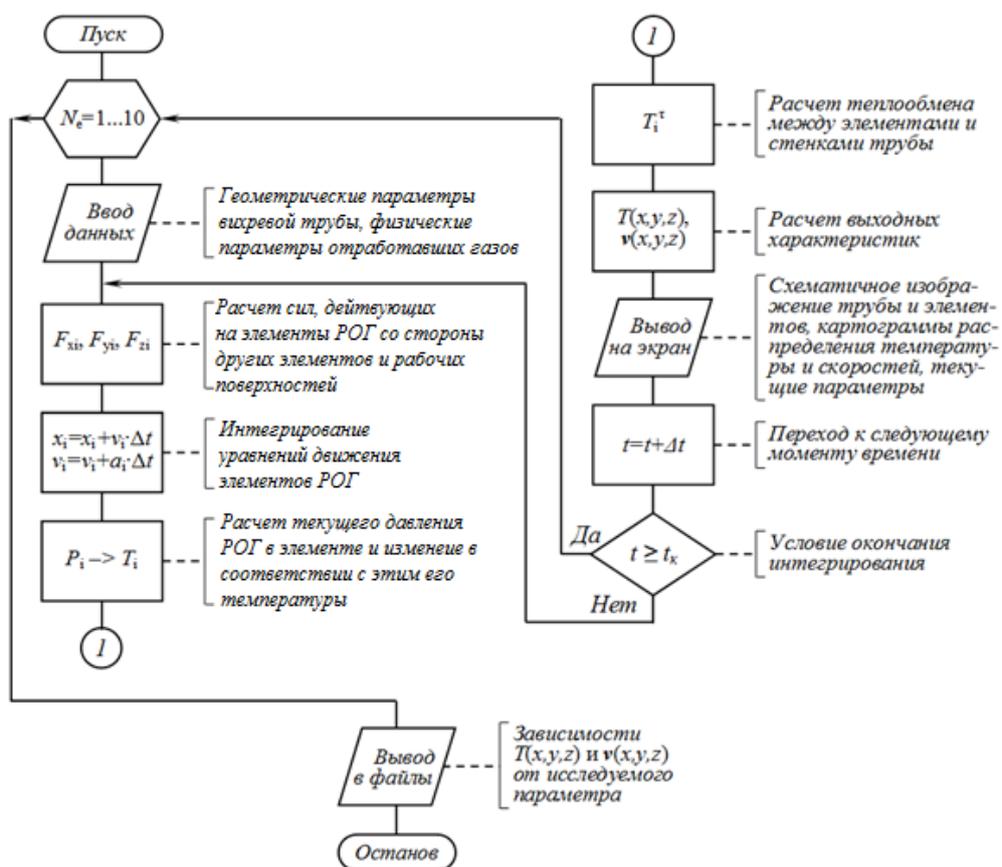


Рисунок 4 – Схема алгоритма моделирования движения отработавших газов в вихревой трубе

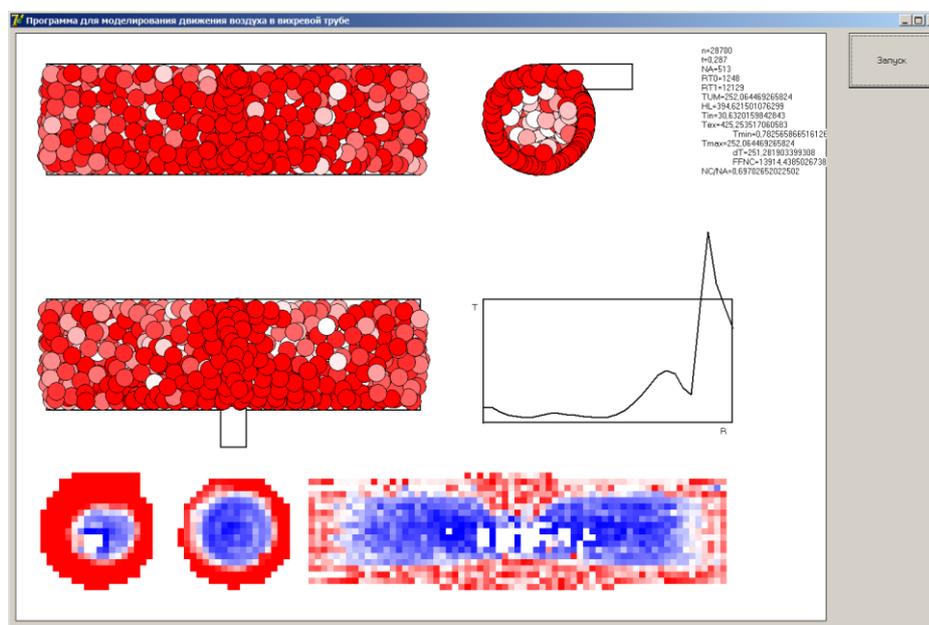


Рисунок 2.10 – Вывод результатов моделирования в «Программе для моделирования вихревого охладителя рециркулируемых отработавших газов»

Основные технические характеристики программы:

- количество элементов РГ от 200 до 10000;
- ориентировочное время проведения одного компьютерного эксперимента около 5 мин (при тактовой частоте процессора 3 ГГц).

Компьютерный эксперимент с моделью проводится следующим образом. Считается, что в начальный момент времени ВТ свободна от элементов рециркулируемых ОГ.

Во входной трубке через равные интервалы времени появляются элементы рециркулируемых ОГ, и поток элементов из входной трубы поступает в основную трубу.

В процессе движения в ВТ элементы могут покидать ее, если достигают вершин соответствующей цилиндрической области. Начальное заполнение трубы производится в течение 0,1 с модельного времени (около 1 минуты машинного времени), после чего ВТ переходит в установившийся режим. После этого начинается анализ распределения температуры в объеме ВТ.

В качестве примера на рисунке 2.11 показано протекание процессов в ВТ при начальной температуре рециркулируемых ОГ 450°C . Как видно разделение температуры происходит от 398°C в центре трубы и до 513°C у цилиндрической поверхности.

В рамках заложенных в модель предположений можно объяснить нагрев рециркулируемых ОГ тем, что элементы у цилиндрической стенки испытывают большие центробежные силы и вследствие этого находятся под высоким давлением и соответственно имеют высокую температуру.

Элементы же вблизи оси ВТ испытывают низкое давление со стороны окружающих элементов, так как поток рециркулируемых ОГ из входной трубы движется преимущественно по стенке, поэтому элементы вблизи оси приобретают температуру ниже начальной.

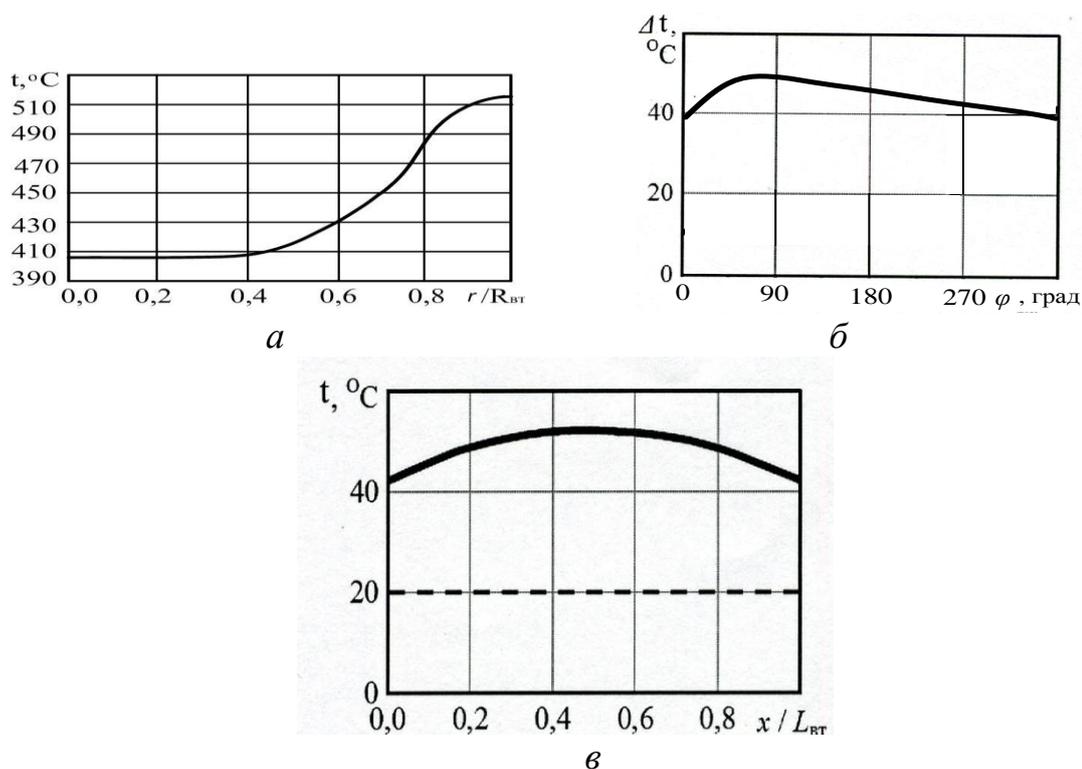


Рисунок 2.11 – Распределение температуры в модельной вихревой трубе:

а – радиальное (r – расстояние от оси трубы; $R_{\text{вт}}$ – радиус вихревой трубы);
б – окружное вблизи цилиндрической поверхности (φ – угол относительно оси вихревой трубы, отсчитываемый от окна входной трубы); *в* – в продольном направлении (x – координата вдоль оси трубы; $L_{\text{вт}}$ – длина вихревой трубы)

Анализ полученных распределений температуры в ВТ позволяет сделать выводы относительно ее оптимальной конструкции. Так, максимальную температуру рециркулируемых ОГ приобретают непосредственно вблизи окна входной трубы, когда режим движения рециркулируемых ОГ резко изменяется с прямолинейного на окружный (рисунок 2.11,б, диапазон углов $0-90^\circ$). По мере дальнейшего движения по окружности ОГ обменивается температурой с центральными областями и постепенно охлаждаются. В осевом направлении наиболее всего эффект разделения температур выражен также вблизи окна входной трубы и плавно уменьшается по мере удаления от окна (рисунок 2.11,в).

На рисунке 2.12 показано влияние скорости ОГ на входе в ВТ на разницу температур входящего газа и на выходе охлажденного потока, а также на холодопроизводительность ВТ.

Как видно, наибольшее снижение температуры и, соответственно, максимальная холодопроизводительность достигаются при входной скорости близкой к 50 м/с.

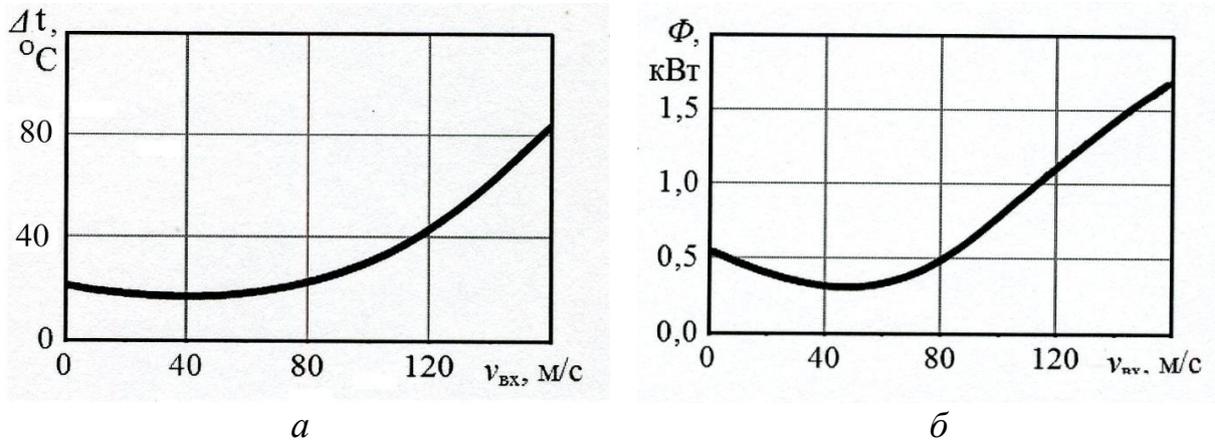


Рисунок 2.12 – Влияние скорости отработавших газов на входе в вихревую трубу на разницу температур входящего газа и на выходе охлажденного потока (а) и холодопроизводительность вихревой трубы (б)

Рисунок 2.13 иллюстрирует влияние угла $\alpha_{вх}$ входа ОГ в ВТ на разницу температур входящего газа и на выходе охлажденного потока (а), а также на холодопроизводительность ВТ (б).

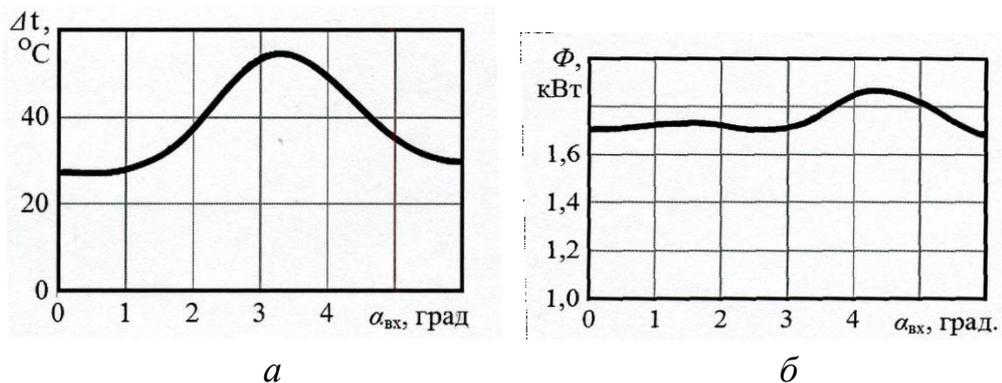


Рисунок 2.13 – Влияние угла $\alpha_{вх}$ входа отработавших газов в вихревую трубу на разницу температур входящего газа и на выходе охлажденного потока (а) и холодопроизводительность вихревой трубы (б)

Из рисунка очевидно, что угол входа РГ лежит между тремя и четырьмя градусами.

Если при оптимальных размерах одна ВТ обеспечивает холодопроизводительность, недостаточную для охлаждения всего объема рециркулируемых ОГ, целесообразно использовать комплект из нескольких вихревых труб. Вихревые трубы соединяются параллельно.

При параллельном соединении ВТ общая холодопроизводительность системы равна

$$\Phi_C = N_{\text{ВТ}} \cdot \Phi_1, \quad (2.7)$$

где Φ_C и Φ_1 – холодопроизводительности системы ВТ и одной ВТ; $N_{\text{ВТ}}$ – количество ВТ, соединенных параллельно.

В дальнейшем математическая модель ВТ была использована для расчета основных конструктивных размеров ВТ для системы РОГ.

2.3. Выводы

1. Рассмотрены возможные варианты схем использования ВТ для снижения токсичности атмосферных ПДВС и комбинированных двигателей.
2. Представлена математическая модель расчета ВТ, адаптированная для анализа процессов в системе РОГ поршневого ДВС.
3. Проведено теоретическое исследование ВТ для системы РОГ.

Глава 3

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

3.1. Программа и методика экспериментального исследования

Программа и методика проведения экспериментально исследования были составлены в соответствии с задачами, решению которых посвящена настоящая работа. Они были разработаны с учетом требований ГОСТ 18509-88 [25], ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН № 96) [26], ГОСТ 17.2.2.02-98 [24] и устанавливали порядок, объем и методику проведения испытаний дизеля 4ЧН13/15 с мероприятиями по снижению выбросов ВВ с ОГ. Программа включала пять этапов.

На *первом этапе* были проведены моторные испытания дизеля 4ЧН13/15, установленного на испытательном стенде. При этом были:

1). Определены показатели двигателя в исходной комплектации. Испытания проводились в следующей последовательности:

- Пуск и прогрев дизеля до температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения и масла в смазочной системе свыше 50 °С.

- Выход на режим максимальной частоты вращения холостого хода.

- Определение (внешней) скоростной характеристики дизеля по ГОСТ 18509-88 [25].

- Определение величины крутящего момента и частоты вращения, соответствующих: номинальной мощности; максимальному крутящему моменту и минимальной частоте вращения холостого хода.

- Определение показателей дизеля при работе на режимах, соответствующих ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН № 96).

2). Определены исходные данные, необходимые для расчета ВТ, предназначенной для установки в систему РОГ, выполнен расчет ее конструктивных характеристик и изготовлена ВТ.

На *втором этапе* были исследованы выбросы ВВ с ОГ дизеля 4ЧН13/15, установленного на испытательном стенде. При этом решалась задача определения влияния доли РГ в свежем заряде (0, 6, 12, 18 % от расхода воздуха), их температуры (температуру РГ на каждом из этих режимов устанавливали последовательно: $T_{ог}$; $(T_{ог} - 20)$; $(T_{ог} - 40)$; $(T_{ог} - 60)$), скоростного и нагрузочного режимов работы дизеля на содержание ВВ в выбрасываемых в атмосферу ОГ и удельный эффективный расход топлива. Целесообразность оценки последнего показателя обусловлена тем, что, как известно, рециркуляция ОГ ведет к его ухудшению.

Определение выбросов ВВ с ОГ проводилось по методике, соответствующей ГОСТ Р 41.96-2011 [26], дымности ОГ – по методике, соответствующей ГОСТ 17.2.2.02-98 [24].

В заключение моторных испытаний на втором этапе были определены численные значения варьируемых параметров (цикловой подачи топлива, давления наддува, момента начала впрыскивания топлива) в соответствии с режимами испытаний по ГОСТ Р 41.96-2011, необходимых для проведения численного эксперимента, проведенного на пятом этапе.

Перед началом стендовых испытаний на каждом из этапов проводилась проверка работоспособности всех приборов, систем и измерительной аппаратуры стенда. Все испытания проводились по методикам ГОСТ 18509-88 [25].

Обработка результатов испытаний осуществлялась в соответствии с ГОСТ 18509-88, ГОСТ Р 41.96-2011 и ГОСТ 17.2.2.02-98.

Третий этап был посвящен оценке влияния регулирования температуры ОГ на эффективность работы КН. Определение целесообразного уровня температуры ОГ перед их попаданием в КН проводили следующим образом [111].

Для каждого вредного компонента с использованием математической модели каталитической нейтрализации ОГ, разработанной учеными Алтайского государственного технического университета [76, 84], рассчитывали индивидуальные степени превращения вредных компонентов при различных режимах работы дизеля:

$$\Delta\bar{C}_{ni} = \frac{C_i - C_i^H}{C_i} = 1 - \frac{C_i^H}{C_i} = 1 - \Delta C_{ni}; \quad (3.1)$$

где C_i и C_i^H - концентрации i -го вредного компонента в ОГ двигателя перед и после КН.

Затем складывали степени превращения вредных компонентов на каждом режиме работы дизеля и строили график $\sum \Delta\bar{C}_{ni} = f(T_{ог})$.

По характеру кривой делали вывод о значении температуры ОГ, позволяющей обеспечить наиболее эффективную работу КН на рассматриваемом режиме работы двигателя.

Совместный анализ указанных кривых на всех исследованных режимах позволил сделать вывод о целесообразном значении температуры ОГ на входе в КН.

Четвертый этап был посвящен построению математической модели и получение уравнений регрессии, связывающих доли РГ в свежем заряде, их температуру, скоростной и нагрузочный режимы работы дизеля с содержанием ВВ в выбрасываемых в атмосферу ОГ.

Для оценки влияния указанных факторов на названные выходные функции был использован статистический метод планирования эксперимента, в основе которого лежала идея «черного ящика» [33, 38,43, 109]. Под «черным ящиком» понимается принцип изображения процессов в виде кибернетической модели с входными управляемыми, контролируруемыми и неконтролируемыми факторами (рисунок. 3.1).

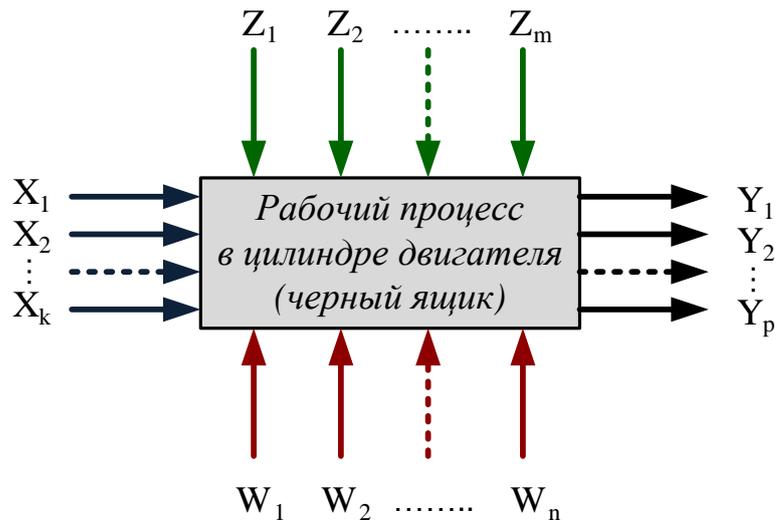


Рисунок 3.1 – Кибернетическая модель рабочего процесса в цилиндре двигателя в общем виде

Входы обозначены стрелками, направленными к «черному ящику», выходы – стрелками, направленными из него.

X_1, X_2, \dots, X_k - управляемые факторы, которые можно фиксировать на определенном уровне или варьировать в процессе эксперимента;

Z_1, Z_2, \dots, Z_m - контролируемые факторы, значение которых можно контролировать или поддерживать на определенных уровнях;

W_1, W_2, \dots, W_n - неконтролируемые факторы;

Y_1, Y_2, \dots, Y_p - функции отклика (наблюдаемые переменные, зависящие от факторов).

Такой кибернетический подход позволяет на основании экспериментальных данных не только построить математическую модель процесса, связывающую функции отклика с варьируемыми факторами, но и управлять им при недостаточном знании самого происходящего явления. Очевидно, что такая математическая модель, являясь особой формой абстрагирования, естественно, не тождественна изучаемому процессу, а лишь аналогична ему.

В качестве функций отклика в настоящей работе должны служить ВВ, выбрасываемые с ОГ в ОС. Исходя из того, что индекс токсичности твердых частиц в два раза выше, чем оксидов азота, в 10 раз – чем углеводородов и в 20 раз – чем

оксида углерода [100], а коэффициенты агрессивности оксидов азота (49,0) и твердых частиц (41,5) намного превосходят коэффициенты агрессивности углеводородов и оксида углерода (1,26 и 1,0 соответственно) [28] при выборе функций отклика мы ограничились именно этими компонентами.

Таким образом, в экспериментах устанавливалась зависимость содержания твердых частиц (PM) и оксидов азота (NO_x) от четырех факторов:

1. Доли рециркулируемых ОГ в свежем заряде.
2. Температуры рециркулируемых ОГ.
3. Частоты вращения коленчатого вала двигателя.
4. Нагрузки на двигатель.

Для возможности последующего обобщения экспериментального материала, перечисленные факторы рассматривались в относительной форме:

1. Объемная доля РГ в свежем заряде - $\bar{V}_{\text{ОГ пер}} = V_{\text{ОГ пер}}/V_{\text{св.з.}}$ (X_1), где $V_{\text{ОГ пер}}$ - объемный расход РОГ, $\text{м}^3/\text{ч}$; $V_{\text{св.з.}}$ - объемный расход свежего заряда, $\text{м}^3/\text{ч}$.

2. Степень снижения температуры РГ в ВТ - $\Delta \bar{t}_{\text{ОГ пер}} = (t_{\text{ОГ}} - t_{\text{ОГ пер}})/t_{\text{ОГ}}$ (X_2), где $t_{\text{ОГ пер}}$ - температура охлажденных РГ после ВТ, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ОГ}}$ - температура ОГ перед ВТ на режиме номинальной мощности, $^{\circ}\text{C}$.

3. Относительная частота вращения коленчатого вала двигателя ($\bar{n} = n_i/n_{\text{ном}}$) (X_3), где n_i - текущая частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} , $n_{\text{ном}}$ - частота вращения коленчатого вала, соответствующая номинальной мощности мин^{-1} .

4. Относительная нагрузка на двигатель - $\bar{M}_{\text{кр}} = M_{\text{кр } i}/M_{\text{Не}}$ (X_4), где $M_{\text{кр } i}$ - текущий крутящий момент, $\text{Н}\cdot\text{м}$; $M_{\text{Не}}$ - крутящий момент, измеренный при номинальной мощности, $\text{Н}\cdot\text{м}$.

В результате кибернетическая модель рабочего процесса в цилиндре двигателя, приведенная на рисунке 3.1, конкретизируется (рисунок 3.2).

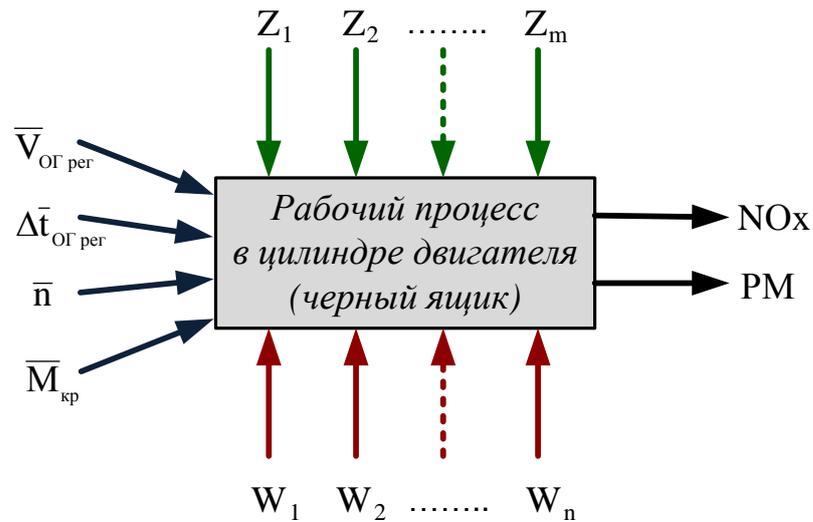


Рисунок 3.2 –Кибернетическая модель рабочего процесса в цилиндре двигателя в конкретизированном виде

В качестве математической модели использовались уравнения регрессии первого порядка вида [43, 112]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} X_i X_j + \dots, \quad (3.2)$$

где X – кодовое значение фактора; $i, j = 1, 2, \dots, k$ – порядковые номера факторов; b_0, b_i, b_{ij} – коэффициенты уравнений, которые вычисляются по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_u; \quad b_i = \frac{1}{N} \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N X_{iu}^2}, \quad (3.3)$$

где y_u – значение исследуемого вредного компонента в u -м опыте; X_{iu} – кодовое значение i -го фактора в u -м опыте; N – число опытов в плане за исключением опытов в нулевых точках.

Кодовые значения факторов получали по формуле [43]:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3.3),$$

где X_i - кодовое значение i -го фактора;

x_i - натуральное текущее значение i -го фактора;

x_{i0} - начальный (нулевой) уровень i -го фактора;

Δx_i - интервал варьирования i -го фактора.

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}. \quad (3.4)$$

После расчета коэффициентов проверяли их на статистическую значимость с помощью t -критерия Стьюдента. При исключении статистически незначимых коэффициентов b_{ii} проводили последовательный регрессионный анализ [43], то есть коэффициент b_0 и оставшиеся коэффициенты b_{ii} пересчитывали по соответствующим формулам [34].

Адекватность модели проверяли с использованием критерия Фишера [11]. Для проверки гипотезы адекватности модели задавали уровень значимости $q=5\%$, число степеней свободы $\nu=N-1$. Гипотеза адекватности полученной математической модели принималась в случае $F < F_{кр}$.

Для выполнения описанных выше действий в диссертации был использован программный комплекс «Планирование эксперимента» [106].

На *пятом этапе* исследования была выполнена расчетно-теоретическая оценка особенностей рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией ОГ и их охлаждением на различных нагрузочных и скоростных режимах работы двигателя.

Выбор расчетных режимов (таблица 3.1) был обусловлен их близостью к стандартным режимам при испытаниях по определению выбросов ВВ с ОГ по ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН № 96). Основными варьируемыми параметрами служили: скоростной, нагрузочный режимы, массовая доля РГ и их температура.

В отличие от ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН № 96) на режимах частоты вращения, соответствующей номинальной мощности (крутящий момент – 10 % от измеренного крутящего момента при номинальной мощности) и минимальной частоты вращения холостого хода расчеты не проводились, так как на этих режимах клапан рециркуляции рекомендуется полностью закрывать.

Таблица 3.1 – План численного эксперимента

№ п.п.	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагруз- ка, %	Массовая доля рециркули- руемых газов в свежем заряде			
			0	0,06*	0,12*	0,18*
1	1850 (режим номинальной мощности)	100	*	*	*	*
2		75	*	*	*	*
3		50	*	*	*	*
4	1250 (режим максимального крутящего момента)	100	*	*	*	*
5		75	*	*	*	*
6		50	*	*	*	*
7		25	*	*	*	*
8		10	*	*	*	*
9	700 (режим минимальной час- тоты вращения холостого хода)	-	*	*	*	*

*На каждом из этих режимов температура рециркулируемых отработавших газов составляла последовательно: $T_{ог}$; $(T_{ог} - 20)$; $(T_{ог} - 40)$; $(T_{ог} - 60)$.

3.2. Экспериментальная установка

Объект испытаний – дизель 4ЧН13/15 - четырехтактный дизель с непосредственным впрыскиванием топлива, с жидкостным охлаждением и с газотурбинным наддувом, оснащенный системами рециркуляции и нейтрализации ОГ в различных вариантах комплектации. В таблице 3.2 приведены его основные характеристики.

Таблица 3.2 – Основные характеристики дизеля 4ЧН13/15

<i>Наименование параметра</i>	<i>Значения</i>
Диаметр поршня, мм	130
Ход поршня, мм	150
Степень сжатия	16
Тип камеры сгорания	Гиссельман
Рабочий объем, л	7,96
Номинальная мощность дизеля при стандартных условиях, кВт	150
Частота вращения коленчатого вала при номинальной мощности, мин ⁻¹	1850
Номинальный момент начала впрыскивания топлива, град ПКВ до ВМТ	24
Максимальный крутящий момент, Н·м	973
Частота вращения коленчатого вала при максимальном крутящем моменте, мин ⁻¹	1250

Испытания дизеля проводились на стенде НП «Сертификационный центр автотракторной техники» (г. Челябинск) (рисунок 3.3), аттестованном в установленном порядке.

*а**б*

Рисунок 3.3 – Установка дизеля 4ЧН13/15 на стенде

При проведении испытаний использовались приборы и оборудование, прошедшие поверку в установленном порядке. В таблице 3.3 приведен перечень измеряемых параметров и средств измерения.

Таблица 3.3 – Перечень измеряемых параметров и средств измерения

<i>Измеряемый параметр</i>	<i>Наименование системы измерения, тип</i>	<i>Пределы измерения</i>	<i>Погрешность (класс точности)</i>
Крутящий момент, Н·м	Стенд	0-1000	ПГ ± 4
Частота вращения, мин ⁻¹		1000-4000	ПГ ± 2
Расход топлива, кг/ч	AVL 703 DS	0-80	ПГ ± 0,5%
Расход воздуха, м ³ /ч	Сопло Вентури, микроманометр ММН-240	150-1000	ПГ ± 2%
Расход газов в системе рециркуляции, м ³ /ч	Расходомер газа (авиационный), тахометр 7ТЗ	0-150	ПГ ± 2% КТ 0,02
Атмосферное давление воздуха, кПа	Метеометр МЭС 202	80-110	ПГ ± 0,3
Температура воздуха в операторской, °С	Термогигрометр ИВА-6Б	0-50	ПГ ± 1
Влажность воздуха, %	Термогигрометр ИВА-6Б	0-98	ПГ ± 3%
Температура топлива на входе в дизель, °С	Прибор ДТСО 065	0-50	КТ 0,2
Температура газов (смеси воздуха и ОГ), °С: - на входе в компрессор, - после компрессора, - после ОНВ	Прибор ДТСО 065	0-180	КТ 0,2
Температура масла в поддоне дизеля, °С	Прибор ДТСО 065	-50-180	КТ 0,2
Температура охлаждающей жидкости на выходе из дизеля, °С	Прибор ДТСО 065	0-200	КТ 0,2

<i>Измеряемый параметр</i>	<i>Наименование системы измерения, тип</i>	<i>Пределы измерения</i>	<i>Погрешность (класс точности)</i>
Температура ОГ, °С: - на выходе из турбины (перед местом отбора рециркулируемых газов), - перед смесителем воздуха и рециркулируемых газов, - после нейтрализатора*	Прибор ДТПК 065	40-800	КТ 0,1
Давление масла в ГММ, МПа	Манометр МТИ	0-0,1	КТ 0,6
Разряжение на впуске дизеля, кПа	Датчик Метран-100-ДИВ	0-15	КТ 0,15
Давление воздуха после компрессора, кПа	Датчик Метран-100-ДД	0-200	КТ 0,15
Соппротивление ОНВ, кПа	Датчик Метран-100-ДД	0=16	КТ 0,15
Давление ОГ, кПа: - на выходе из турбины (перед местом отбора рециркулируемых газов), - после нейтрализатора	Датчик Метран-100-ДВ	0-150	КТ 0,15
Выбросы вредных веществ с ОГ, ppm: - CO - CH - NO _x	Газоаналитическая система ЭТЭК ГАС ЕТ-01	0-7500 0-1000 0-5000	ПГ ± 3,5% ПГ ± 3,5% ПГ ± 0,1W _{NOx}
Выбросы вредных частиц с ОГ, мг	Минитуннель МТ-120, весы Mettler Toledo АХ26DR	0-6	ПГ ± 2 мкг
Дымность ОГ, %	Дымомер Инфракар-Д	0-100	ПГ ± 1%

В системе выпуска ОГ был использован КН типа «КНД-Рила» (рисунок 3.4).

Рабочим веществом нейтрализатора является катализатор типа «РИЛА», который представляет собой нанесенные на гранулированный носитель (оксид алюминия) металлы и окиси металлов.



Рисунок 3.4 – Нейтрализатор отработавших газов типа «КНД-Рила»

Не содержит драгоценных металлов (золото, платина). Катализатор нечувствителен к каталитическим ядам, включая диоксид серы, что позволяет использовать стандартное, а не специальное дизельное топливо с низким (менее 50 ppm) содержанием серы. Катализатор начинает действовать при температуре отработавших газов выше 220 °С, эффективно и устойчиво работает при температуре газов выше 280 °С и объемных скоростях газов до 100000 ч⁻¹.

Нейтрализатор предназначен для обезвреживания основных вредных компонентов ОГ. Из-за высокого содержания кислорода в ОГ дизелей степень восстановления NO_x зависит от содержания СО, СН и твердых частиц в ОГ, что не вызывает необходимость дополнительной подачи воздуха. Достижимая степень нейтрализации составляет: до 80 % – для оксида углерода, до 70 % – для углеводородов, до 30 % – для оксидов азота и до 70 % – для твердых частиц. Комплексная эффективность нейтрализации ОГ, с учетом относительной токсичности вредных компонентов, при использовании «КНД-Рила», может достигать 40 % и более.

Катализатор не является фильтром для сокращения дымности, а действует как химически активный катализатор, который «дожигает» органические вещества и самую вредную часть ОГ, в которой содержатся тяжелые нефтяные фракции с высокой канцерогенностью.

Для измерения расхода РГ была изготовлена и смонтирована на дизеле специальная система, в которой в качестве первичного прибора использовался авиационный расходомер (рисунок 3.5), а в качестве вторичного прибора – тахометр 7ТЗ по ГОСТ 21339-82 [22].



Рисунок 3.5 – Расходомер рециркулируемых газов

Была проведена тарировка измерительной системы, результаты которой приведены на рисунке 3.6.

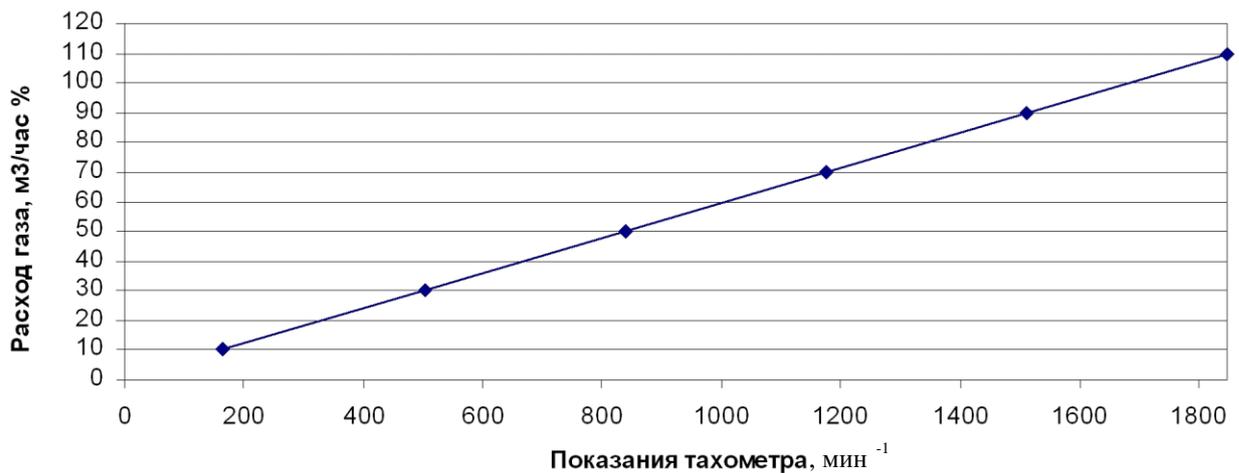


Рисунок 3.6 – График тарировки системы для измерения расхода рециркулируемых газов

Отбор ОГ из выпускного тракта в систему рециркуляции осуществлялся после турбины (перед нейтрализатором). Перед смесителем рециркулируемых ОГ и воздуха на впуске, который размещался перед компрессором, была установлена ВТ (рисунок 3.7, таблица 3.4), расчет конструктивных размеров которой был выполнен с использованием математической модели, рассмотренной в подразделе 2.2.1. Система РОГ с ВТ обеспечивала возможность регулировки объёмного расхода РГ в диапазоне не менее 0–20 % от объёмного расхода воздуха и предельное снижение температуры РГ на 60 К относительно температуры ОГ, входящих в ВТ.

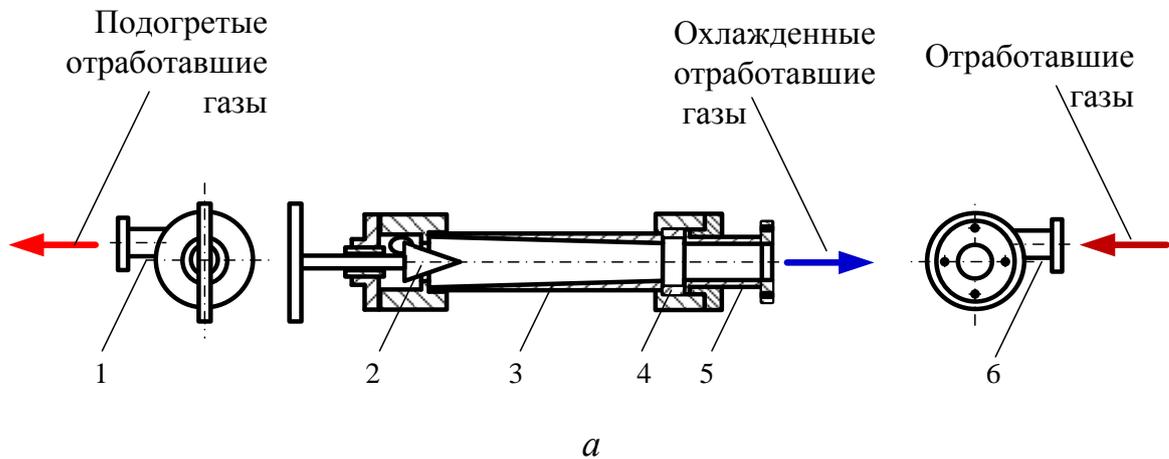


Рисунок 3.7 – Вихревая труба:

a – схема вихревой трубы: (1 – патрубок выхода потока подогретых отработавших газов; 2 – дроссельный клапан (вентиль); 3 – корпус; 4 – завихритель; 5 – патрубок выхода потока охлажденных отработавших газов; 6 – патрубок входа отработавших газов в завихритель); *б* – внешний вид

Таблица 3.4 – Основные конструктивные характеристики вихревой трубы

<i>Конструктивная характеристика</i>	<i>Единица измерения</i>	<i>Величина</i>
Длина корпуса вихревой трубы	м	0,5
Внутренний диаметр патрубка выхода потока охлажденных отработавших газов	м	0,037
Наружный диаметр канала для выхода потока подогретых отработавших газов	м	0,1
Внутренний диаметр канала для выхода потока подогретых отработавших газов при снижении температуры на 60 К	м	0,097
Площадь входного патрубка отработавших газов в завихритель	м ²	0,11 · 10 ⁻²
Сужение внутреннего диаметра корпуса в сторону патрубка выхода потока охлажденных отработавших газов	град	7

Схема системы рециркуляции и нейтрализации ОГ с местами установки датчиков приведена на рисунке 3.8.

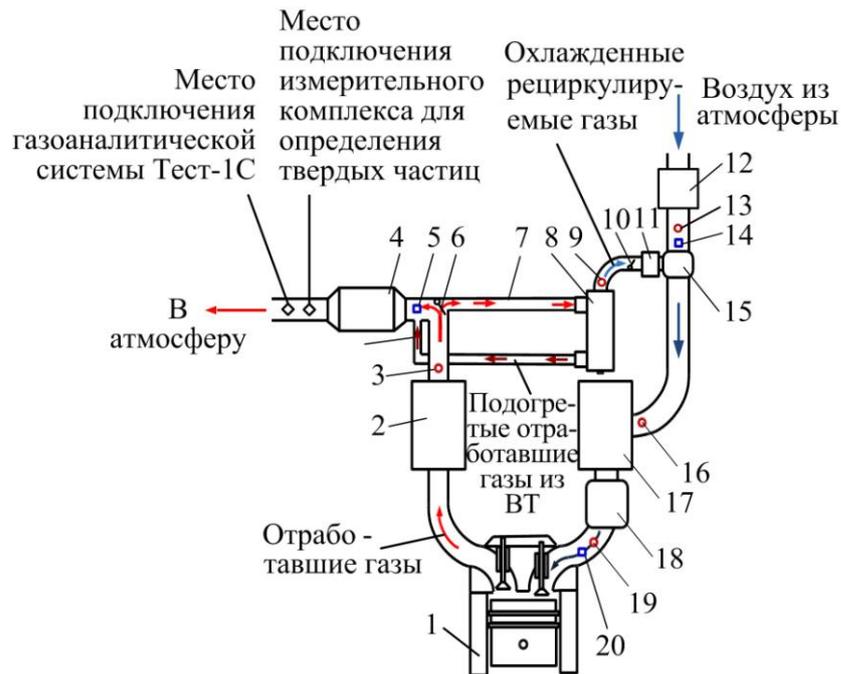
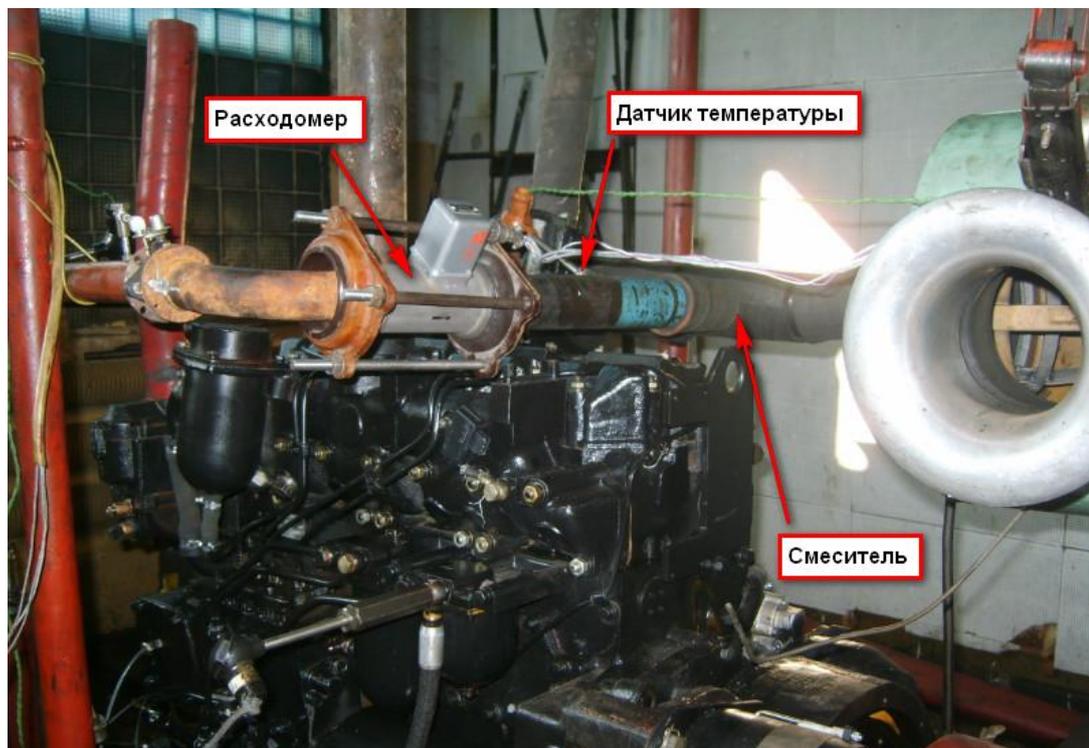


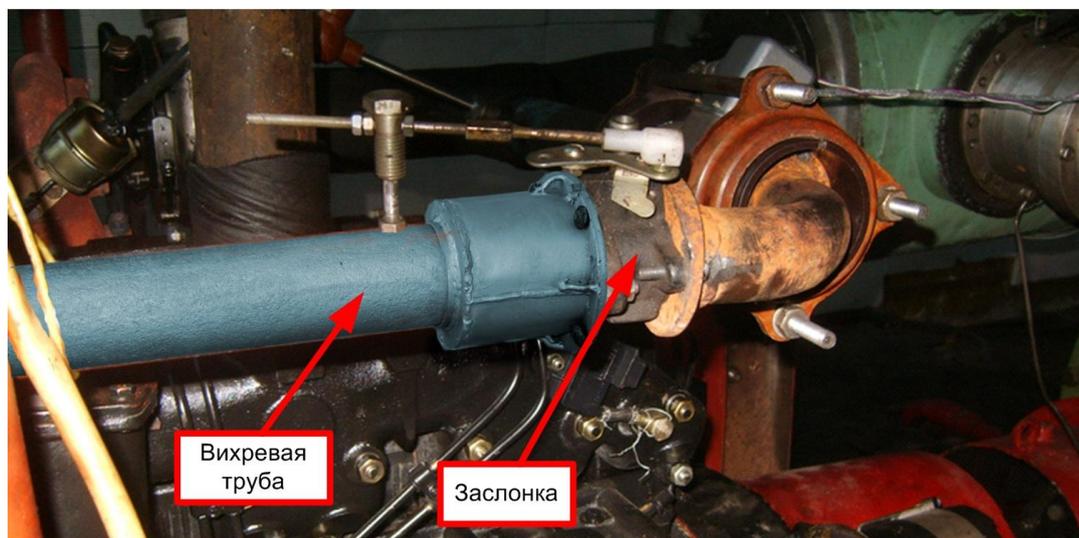
Рисунок 3.8 – Схема системы рециркуляции и нейтрализации отработавших газов:

1 – дизель; 2 – газовая турбина; 3, 9, 13, 16, 19 – точки замера температуры; 4 – каталитический нейтрализатор, 5, 14, 20 – точки замера давления; 6 – заслонка; 7 – патрубок подвода ОГ к вихревой трубе; 8 – вихревая труба; 10 – заслонка, регулирующая объём РГ; 11 – расходомер РГ; 12 – расходомер воздуха; 15 – смеситель газов; 17 – компрессор, 18 – охладитель наддувочного воздуха

Фотографии системы рециркуляции показаны на рисунке 3.9.



а



б

Рисунок 3.9 – Система рециркуляции отработавших газов на стенде:

а - установка расходомера, датчика температуры рециркулируемых газов и смесителя; б – установка вихревой трубы и заслонки, регулирующей объём рециркулируемого газа

Для определения выбросов оксидов азота, оксида углерода и углеводородов использовалась газоаналитическая система Тест-1С (рисунок 3.10), производства ООО «НПФ Экология», включающая комплект газоанализаторов, системы пробоотбора, пробоподготовки и управления.



Рисунок 3.10 – Газоаналитическая система Тест-1С

Для определения содержания твердых частиц в ОГ использовался гравиметрический метод. Это вызвано тем, что косвенные методы, основанные на аппроксимационной зависимости концентрации твердых частиц от дымности и выбросов других токсичных веществ, имеют низкую точность. Суть метода заключается в пропускании разбавленных в определенной пропорции отработавших газов через стекловолокнистый фильтр с фторуглеродным покрытием или фильтр с фторуглеродной основой мембранного типа, который взвешивается до и после эксперимента. Фильтр должен иметь покрытие диоктилфтолат толщиной 0,3 мм, степень улавливания не менее 95 % при скорости потока газа от 35 до 80 см/с).

Испытательный комплекс для определения выбросов твердых частиц с ОГ дизелей различных типов включает в себя разбавительный туннель МТ-120 разработанный институтом TUV-UVMV (Чехия) (рисунок 3.11,*a*), систему пробоотбора на нагрузочном стенде, весы «Mettler Toledo» AX26DR для взвешивания фильтров

(в климатической камере на виброизолирующем фундаменте, имеющие точность – 2 мкг) (рисунок 3.11,б), фильтры – «Pall Flex».

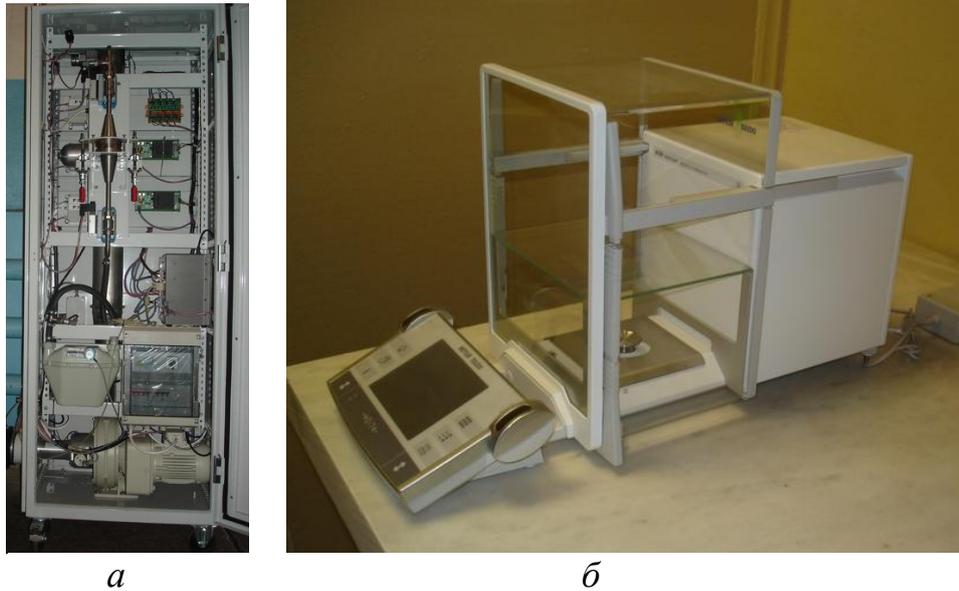


Рисунок 3.11 – Система для измерения выбросов твердых частиц:
*а- туннель MT-120, б - весы «Mettler Toledo» для взвешивания фильтров
 (в климатической камере на виброизолирующем фундаменте)*

Общая схема комплекса приведена на рисунок 3.12.

Пробоотборник является изокINETической системой, в которой скорость и давление потока в отводящем патрубке должны совпадать с соответствующими параметрами основного потока ОГ. Для этого требуется обеспечить наличие невозмущенного и однородного потока у входа в пробоотборник, что достигается использованием у входа резонатора и трубы с прямым участком.

Условие равенства скоростей и давлений обеспечивается регулятором расхода FC1, который считывает сигнал датчика давления DPT и управляет вытяжным насосом SB.

Коэффициент разделения потока пропорционален отношению площадей поперечных сечений труб EP и ISP. Разбавляющий воздух проходит через фильтр DAF, его температура поддерживается в диапазоне 25 ± 5 °C. Температура стенок туннеля DT не должна превышать 52 °C, для обеспечения этого условия использована система терморегулирования с микропроцессорным управлением.

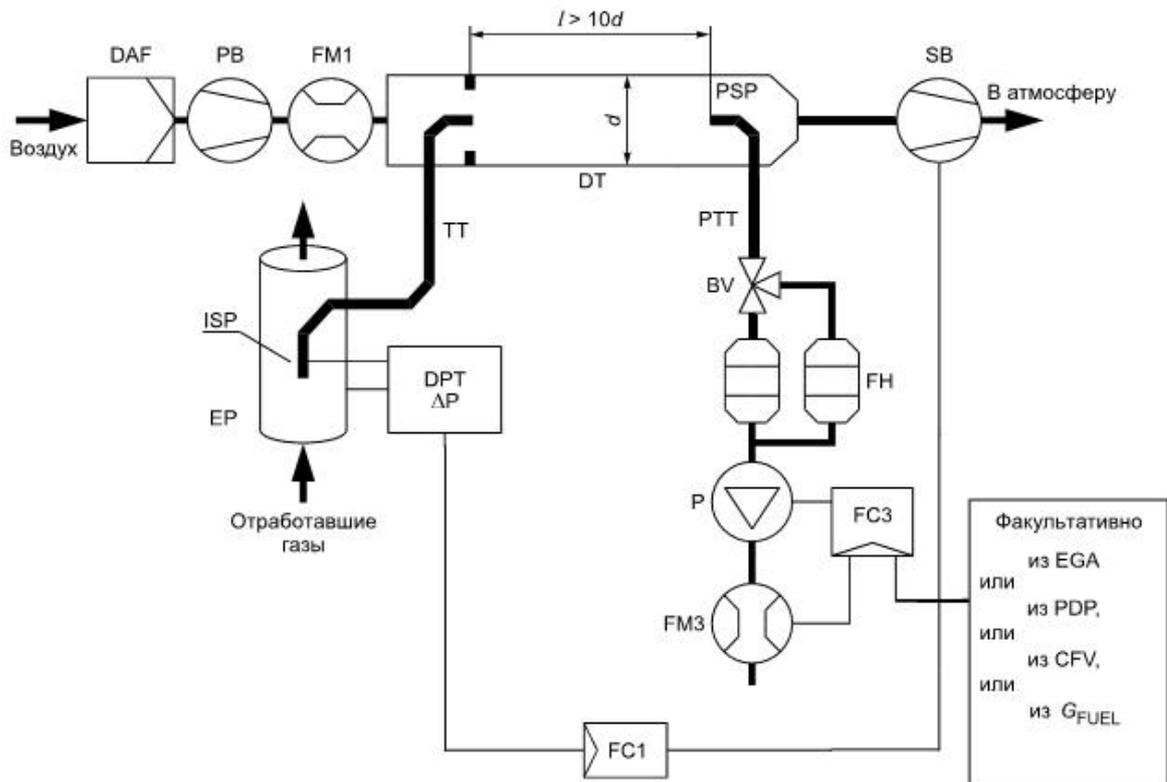


Рисунок 3.12 – Схема системы отбора проб с разбавлением потока
изокINETическим пробоотборником и частичным отбором проб:

EP – выпускная труба, DT – туннель для разбавления, ISP – изокINETический пробоотборник, TT – подводящий патрубкок, DPT – датчик давления, FC1 – регулятор расхода, PB – нагнетательный насос, DAF – воздушный фильтр, FM1 – расходомер воздуха, PSP – пробоотборник, PTT – патрубкок, SB – вытяжной насос, BV – шаровый затвор, FH – фильтродержатель, FC3 – регулятор, P – насос для перекачки пробы, FM3 – расходомер

Система отбора проб необходима для осаждения на фильтре для отбора вредных частиц. Расход пробы контролируется регулятором FC3, работа которого аналогична регулятору FC1.

Испытательный комплекс управляется с помощью компьютера, на котором установлено специальное программное обеспечение для автоматического управления, обработки сигналов датчиков и вывода на дисплей промежуточных результатов испытаний.

Обработка результатов испытаний проводилась в соответствии с ГОСТ 18509-88 и ГОСТ Р 41.96-2011 и ГОСТ 17.2.2.02 .

3.3. Выводы

1. Разработана программа исследования выбросов ВВ с ОГ дизеля 4ЧН13/15, оборудованного системой РОГ, их нейтрализацией и охлаждением РГ с помощью ВТ. Программа включает пять этапов. *Цель первого этапа* – оценка показателей дизеля 4ЧН13/15 в исходной комплектации и определение исходных данных, необходимых для расчета ВТ, предназначенной для установки в систему РОГ, определение ее конструктивных характеристик и ее изготовление. *Цель второго этапа* – исследование выбросов ВВ с ОГ дизеля 4ЧН13/15, установленного на испытательном стенде, оборудованного системой РОГ с использованием ВТ, а также определение численных значений варьируемых параметров, необходимых для проведения численного эксперимента, проведенного на пятом этапе. *Цель третьего этапа* – оценка влияния регулирования температуры ОГ на эффективность работы КН и определение целесообразного уровня температуры ОГ перед их попаданием в КН. *Цель четвертого этапа* – построение математической модели и получение уравнений регрессии, связывающих доли РГ в свежем заряде, их температуру, скоростной и нагрузочный режимы работы дизеля с содержанием ВВ в выбрасываемых в атмосферу ОГ. *Цель пятого этапа* – расчетно-теоретическая оценка особенностей рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией ОГ и их охлаждением на различных нагрузочных и скоростных режимах работы двигателя.

2. Разработана методика проведения каждого этапа экспериментального исследования.

3. Изготовлена оригинальная ВТ, позволяющая понижать температуру РГ максимально на 60 °С. Создана экспериментальная установка для проведения стендовых испытаний дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией ОГ, охлаждаемых с помощью ВТ, и регулирования с ее помощью их температуры перед КН.

Глава 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЯ 4ЧН13/15 С ИХ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ И ОХЛАЖДЕНИЕМ

4.1. Определение показателей двигателя в исходной комплектации

В соответствии с программой исследования на первом этапе были проведены моторные испытания дизеля 4ЧН13/15, установленного на испытательном стенде, в исходной комплектации.

Обработка результатов определения скоростной (внешней) характеристики дизеля (рисунок 4.1) показал, что номинальная эффективная мощность двигателя в исходной комплектации при частоте вращения коленчатого вала 1850 мин^{-1} составила 151,6 кВт, максимальный крутящий момент - 976 Н·м при частоте вращения 1250 мин^{-1} , минимальный удельный эффективный расход топлива - 225 г/(кВт·ч).

Содержание ВВ соответствует требованиям ГОСТ Р 41.96-2011 и составляет:

- для оксидов азота – 5,91 г/(кВт·ч) при норме 6 г/(кВт·ч);
- для оксида углерода – 0,97 г/(кВт·ч) при норме 3,5 г/(кВт·ч);
- для углеводородов – 0,24 г/(кВт·ч) при норме 1 г/(кВт·ч);
- для твердых частиц – 0,19 г/(кВт·ч) при норме 0,2 г/(кВт·ч).

Дымность ОГ на установившихся режимах, определенная по методике ГОСТ 17.2.2.02-98 [24], составила 38,1 % при норме 54 %.

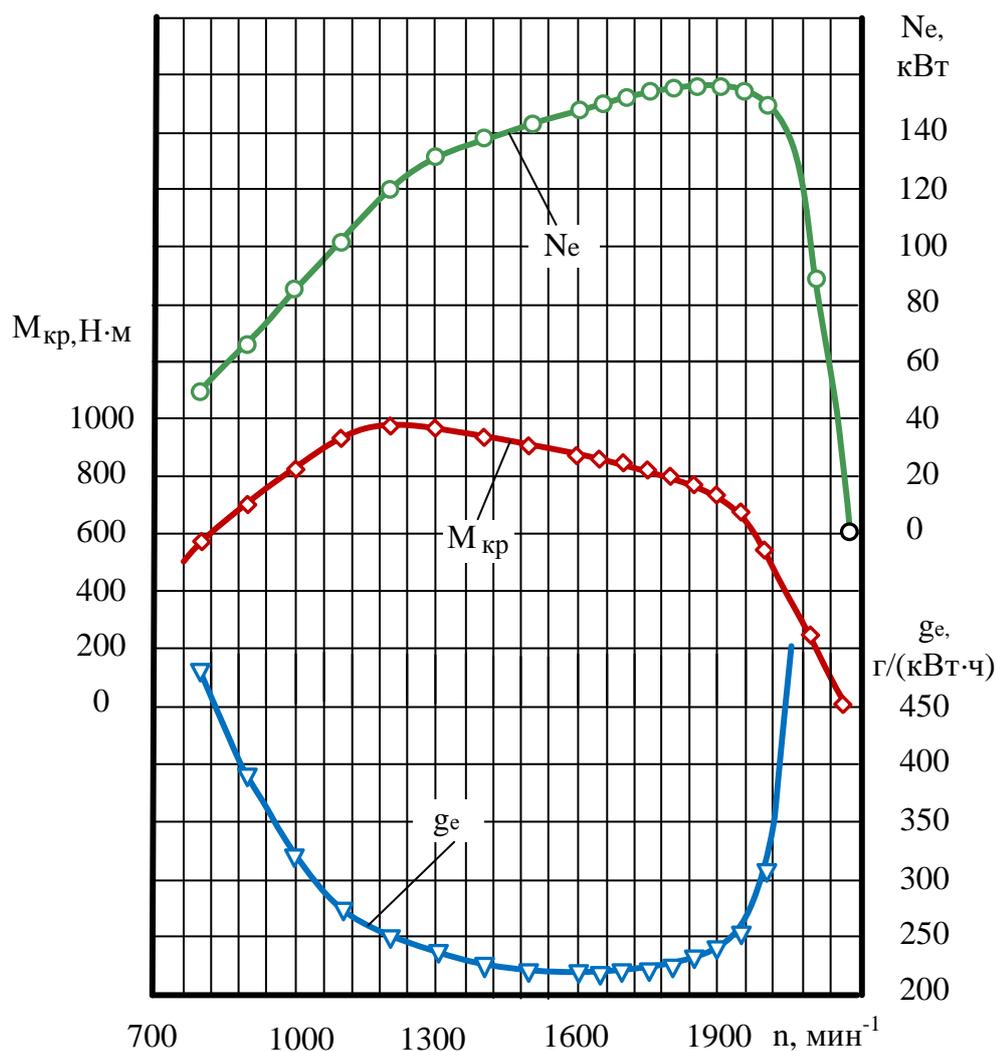


Рисунок 4.1 – Скоростная (внешняя) характеристика дизеля 4ЧН13/15
в исходной комплектации

Для последующей оценки влияния доли и температуры РГ на выбросы ВВ дизеля 4ЧН13/15, прежде всего, были определены его соответствующие показатели в исходной комплектации при работе на режимах, соответствующих ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН № 96). Результаты испытаний представлены на рисунках 4.2 и 4.3.

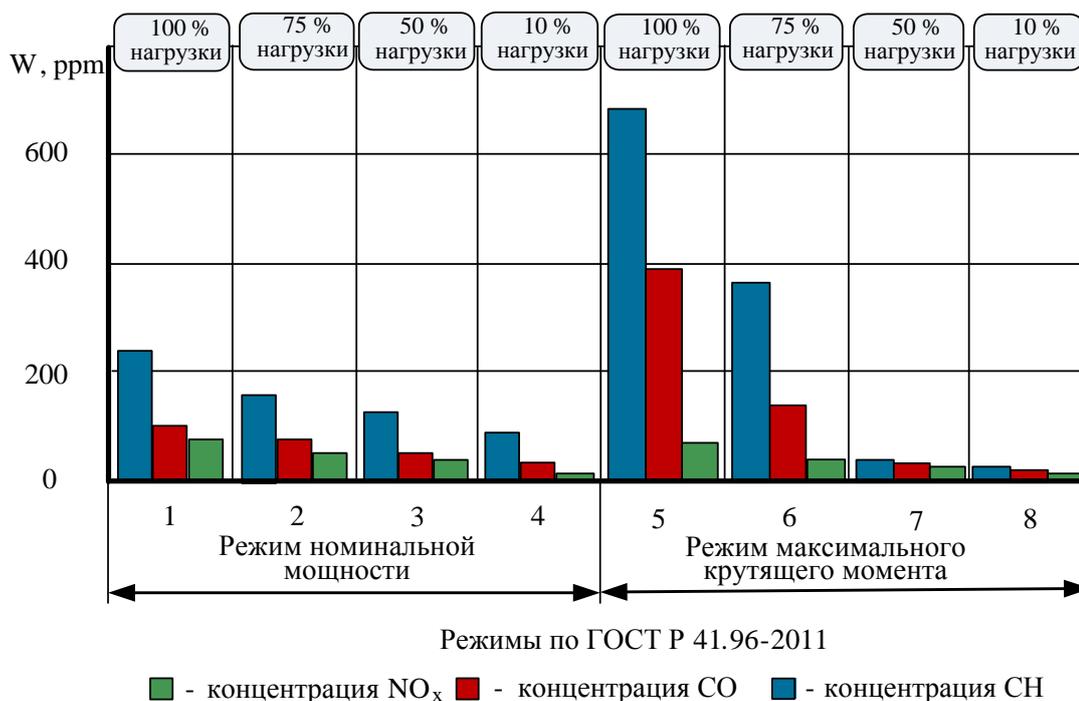


Рисунок 4.2 – Концентрация оксидов азота, оксида углерода и углеводородов в отработавших газах дизеля 4ЧН13/15 в исходной комплектации (по ГОСТ Р 41.96-2011)

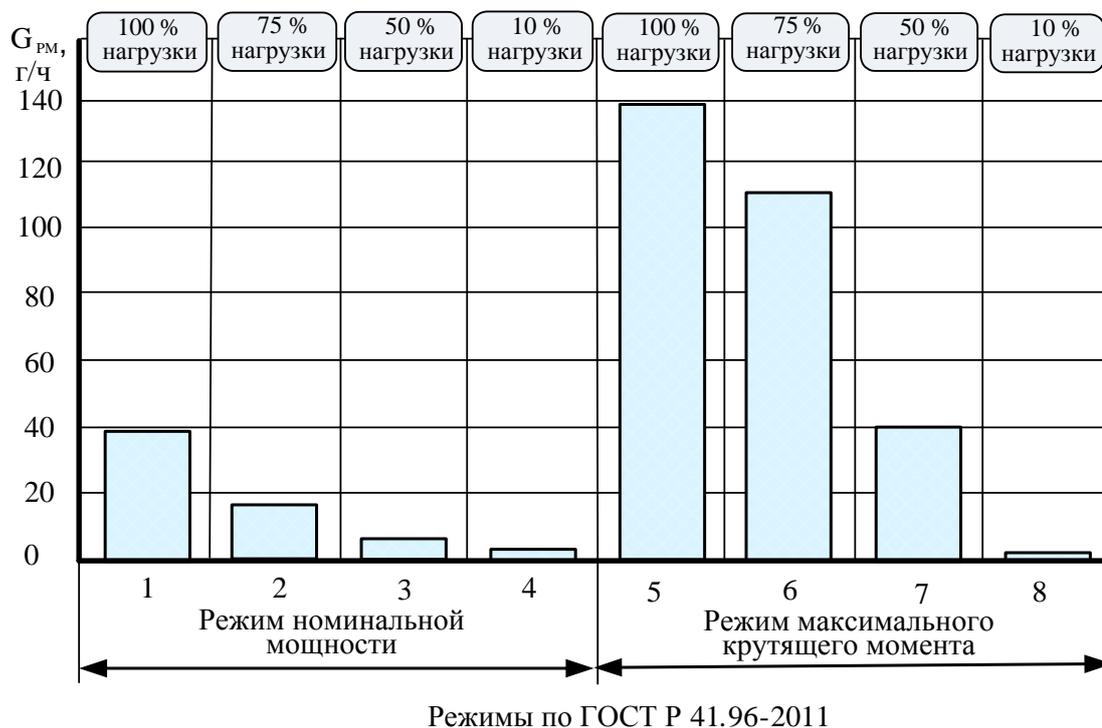


Рисунок 4.3 – Массовый расход потока твердых частиц с отработавшими газами дизеля 4ЧН13/15 в исходной комплектации (по ГОСТ Р 41.96-2011)

Полученные материалы полностью соответствуют всем представлениям о влиянии режимов работы двигателя на содержание ВВ в его ОГ. Так снижение нагрузки, сопровождающееся уменьшением цикловой подачи топлива, приводит к падению максимальных давлений, температуры и увеличению коэффициента избытка воздуха, и, соответственно, к уменьшению концентрации оксидов азота, оксида углерода, углеводородов и твердых частиц.

Большие же абсолютные значения выбросов обсуждаемых компонентов при скоростном режиме, соответствующем максимальному крутящему моменту, связаны с большими цикловыми подачами топлива на соответствующих нагрузочных режимах, чем при частоте вращения коленчатого вала, соответствующей номинальной мощности (см. таблицу 4.1).

На рисунке 4.4 показаны значения удельного эффективного расхода топлива при работе дизеля 4ЧН13/15 в исходной комплектации на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 при нагрузках 100, 75 и 50 %.

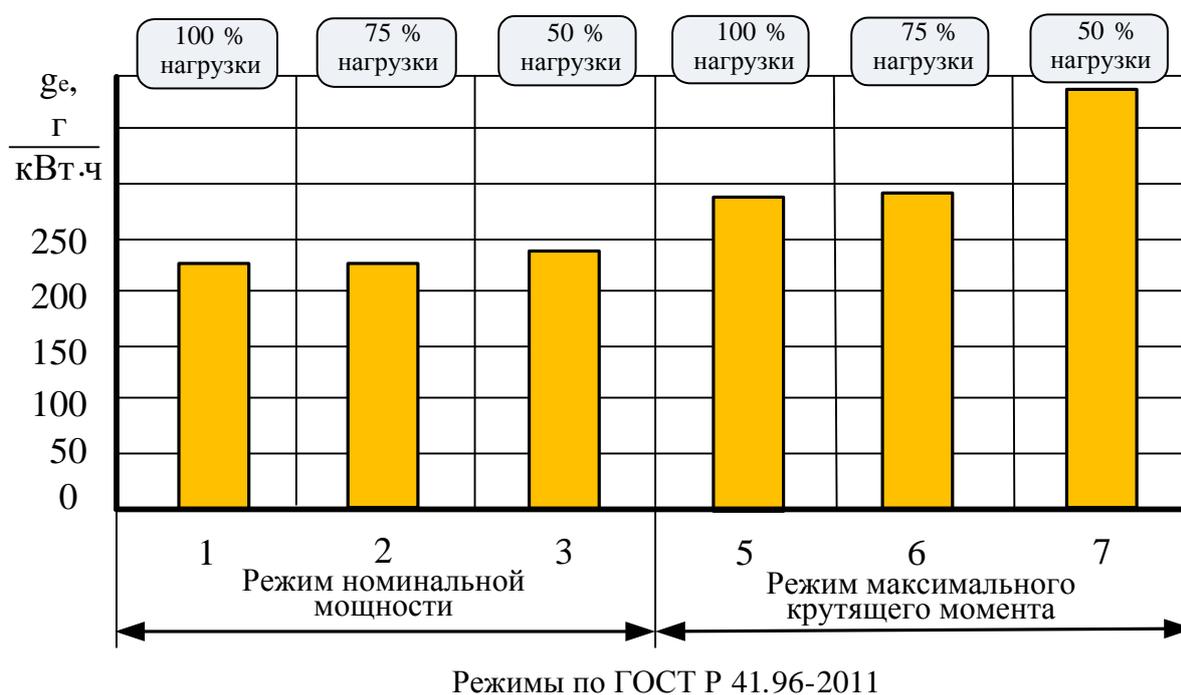


Рисунок 4.4 – Удельный эффективный расход топлива

при работе дизеля 4ЧН13/15 на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011

в исходной комплектации

Связано это с тем, что меньшие нагрузки не являются характерными для двигателей сельскохозяйственных и дорожно-строительных машин (рисунок 4.5), каковым и является дизель 4ЧН13/15.

Кроме того, известно, что максимум выбросов NO_x дизелями с объемным смесеобразованием (к которым относится исследуемый двигатель) приходится, как правило, на нагрузки от 62,5 до 87,5 % [75].

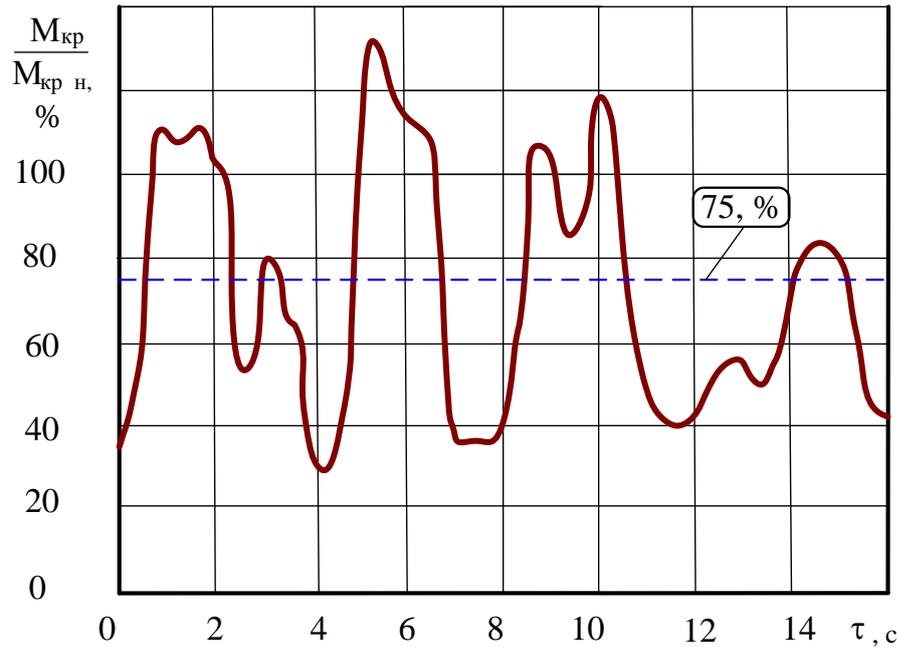


Рисунок 4.5. – Типовая диаграмма нагрузки двигателей дорожно-строительных машин [48]

После оценки показателей 4ЧН13/15 в исходной комплектации были определены численные значения варьируемых параметров (цикловой подачи топлива, давления наддува, момента начала впрыскивания топлива), необходимые для проведения численного эксперимента, результаты которого приведены в пятой главе, в соответствии с режимами испытаний по ГОСТ Р 41.96-2011 и планом его проведения (см. таблицу 3.1), а также параметры ОГ на входе в ВТ, необходимые для расчета ее конструктивных параметров (таблица 4.2).

Таблица 4.1 – Параметры, необходимые для проведения расчетного эксперимента

На- груз ка, %	Цикловая по- дача топлива, мг (на одно рас- пыливающее отверстие форсунки)	Параметр				
		Давление наддува, кПа	Угол на- чала впрыски- вания топлива, град ПКВ	Температу- ра отрабо- тавших га- зов, °С	Давле- ние от- рабо- тавших газов, кПа	Расход свежего заряда, кг/ч
Режим номинальной мощности						
100	16	205	700	432	6,7	893
75	12	180	702	368	5,1	893
50	8	145	704	316	3,8	893
Режим максимального крутящего момента						
100	20	150	700	508	4,0	660
75	18	140	704	452	2,5	660
50	16	130	706	382	1,5	660
25	12	120	708	289	0,5	660
10	8	110	710	228	0,2	660
Режим минимальной частоты вращения холостого хода						
-	8	100	706	167	0,05	458

Таблица 4.2 – Параметры, необходимые для расчета конструктивных параметров вихревой трубы

Параметр	Единицы	Значение
Характеристики рабочего тела		
Вещество, агрегатное состояние	Отработавшие газы ДВС	
Параметры рабочего тела на выходе (охлажденный поток)		
Температура	К	720
Давление	МПа	0,25
Расход рабочего тела	кг/с	0,046
Параметры рабочего тела на входе		
Температура	К	780
Давление	МПа	0,15
Относительная влажность	%	90
Конструктивные ограничения		
Тип вихревой трубы	Противоточная	
Диаметр	мм	100
Длина	мм	500
Количество входных штуцеров	шт	Один

4.2. Определение влияния доли и температуры рециркулируемых газов на параметры двигателя

Результаты определения выбросов ВВ в ОГ дизеля 4ЧН13/15 (см. раздел 4.1) показывают их соответствие требованиям ГОСТ Р 41.96-2011. При этом содержание:

- оксида углерода на 27,7% ниже нормированной величины;
- углеводородов на 24,0 %;
- твердых частиц – на 5,0 %;
- оксидов азота на – на 1,5 %.

Дымность ОГ составляет 70,6 % от нормы.

Как было отмечено в третьей главе, в ходе экспериментального исследования выбросов ВВ с ОГ дизеля 4ЧН13/15 с их рециркуляцией и охлаждением мы исходили из того, что индекс токсичности твердых частиц в два раза выше, чем оксидов азота, в 10 раз – чем углеводородов и в 20 раз – чем оксида углерода [100], а коэффициенты агрессивности оксидов азота (49) и твердых частиц (41,5) намного превосходят коэффициенты агрессивности углеводородов и оксида углерода (1,26 и 1,0 соответственно) [28]. Учитывая сказанное и то обстоятельство, что содержание оксида углерода и углеводородов в ОГ дизеля 4ЧН13/15 значительно ниже нормированных величин в дальнейших исследованиях мы ограничились оценкой выбросов твердых частиц и оксидов азота.

При определении влияния работы системы РОГ на содержание в ОГ дизеля 4ЧН13/15 твердых частиц и оксидов азота, прежде всего, было оценено влияние доли и температуры РГ при его работе на режимах, соответствующих ГОСТ Р 41.96-2011.

На рисунках 4.6–4.11 показано влияние доли РГ (без снижения их температуры) на концентрации оксидов азота в ОГ дизеля 4ЧН13/15 и массовый поток твердых частиц в них на указанных режимах работы двигателя.

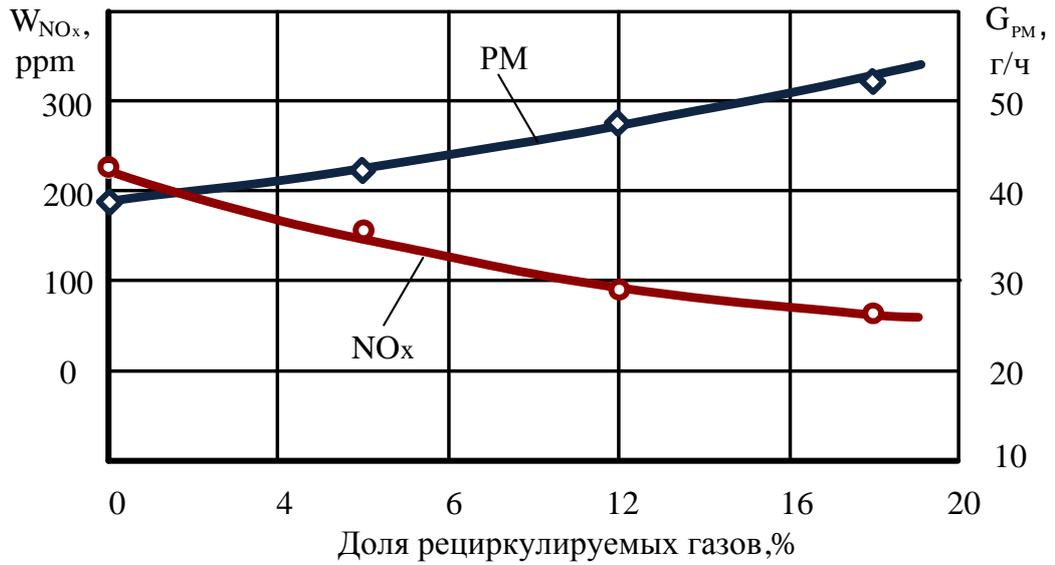


Рисунок 4.6 – Зависимость концентрации оксидов азота и массового потока твердых частиц с отработавшими газами дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от доли рециркулируемых газов ($n = 1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 100 %)

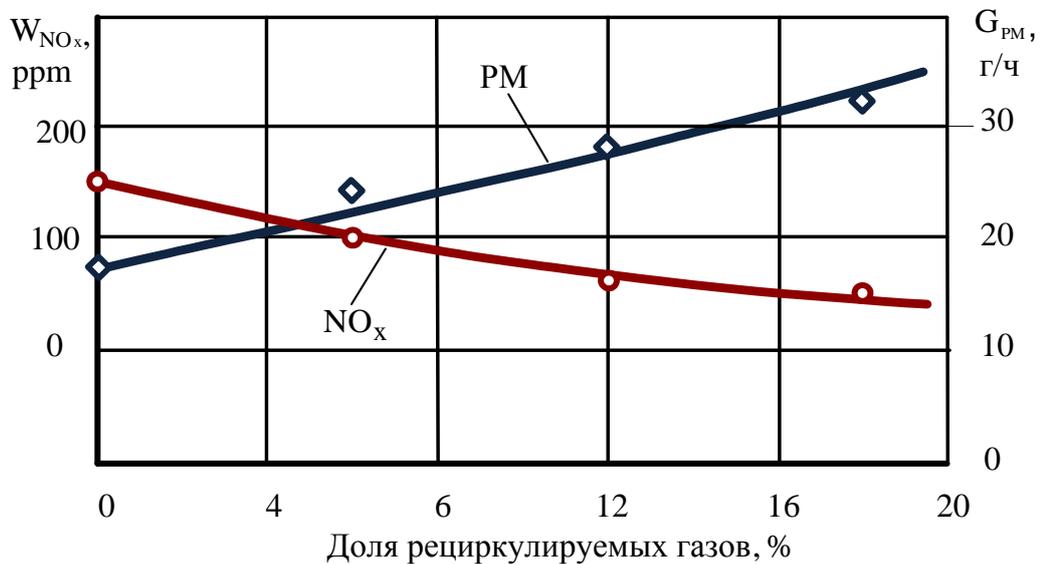


Рисунок 4.7 – Зависимость концентрации оксидов азота и массового потока твердых частиц с отработавшими газами дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от доли рециркулируемых газов ($n = 1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

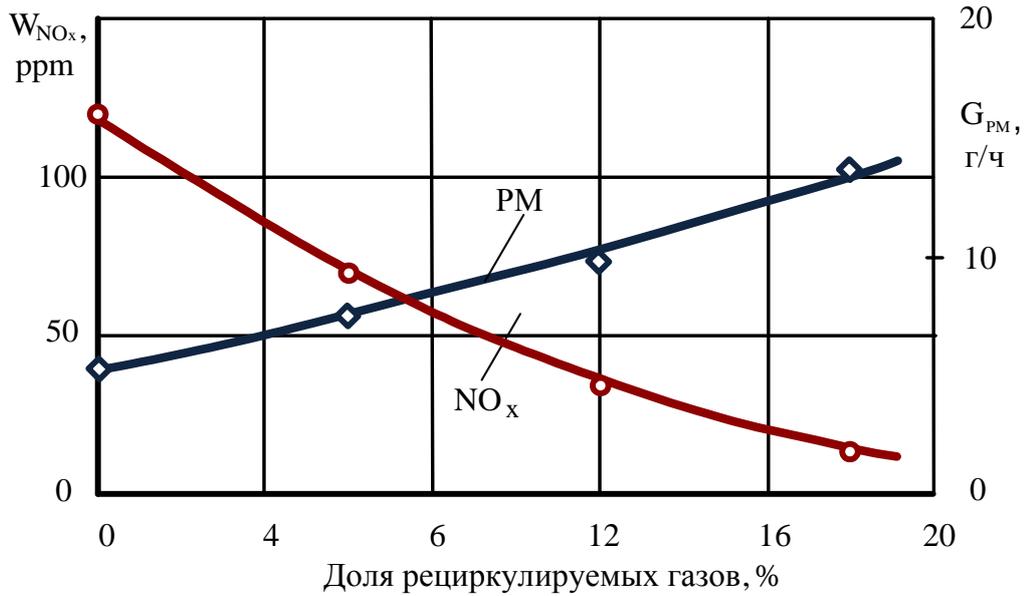


Рисунок 4.8 – Зависимость концентрации оксидов азота и массового потока твердых частиц с отработавшими газами дизеля 4ЧН 13/15 в зависимости от доли рециркулируемых газов ($n = 1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 50 %)

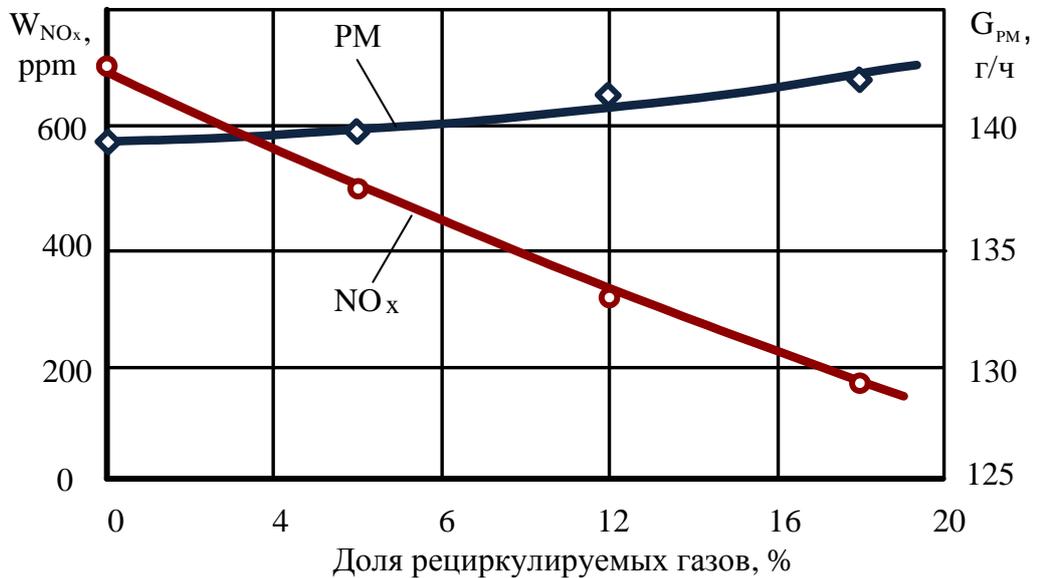


Рисунок 4.9 – Зависимость концентрации оксидов азота и массового потока твердых частиц с отработавшими газами дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от доли рециркулируемых газов ($n = 1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 100 %)

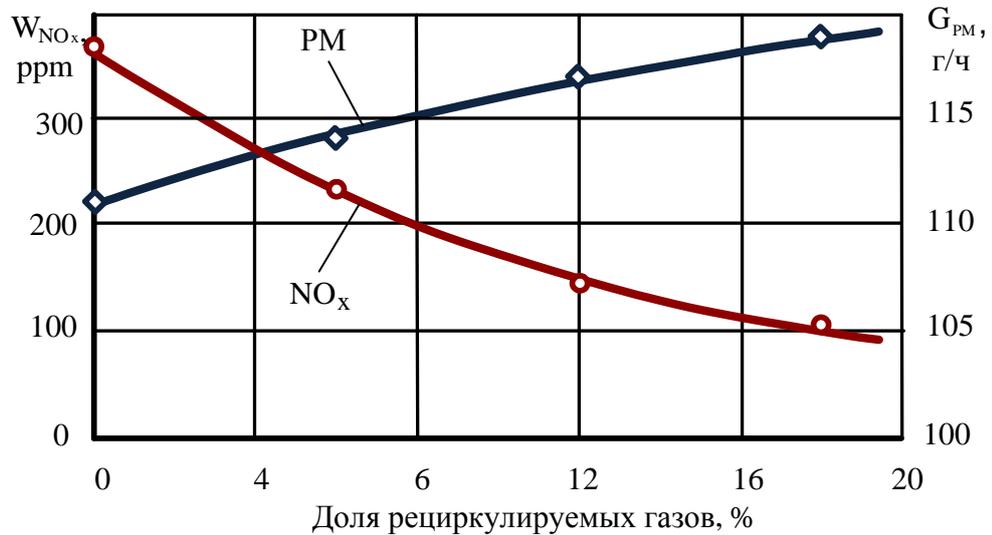


Рисунок 4.10 – Зависимость концентрации оксидов азота и массового потока твердых частиц с отработавшими газами дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от доли рециркулируемых газов ($n = 1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

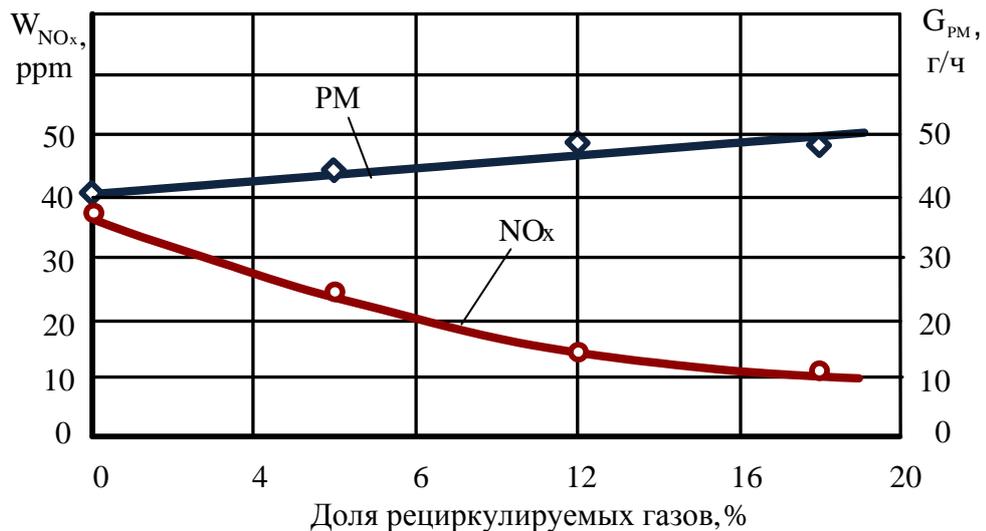


Рисунок 4.11 – Зависимость концентрации оксидов азота и массового потока твердых частиц с отработавшими газами дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от доли рециркулируемых газов ($n = 1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 50 %)

Как видно, качественно это влияние на всех режимах одинаково – увеличение доли РГ в ОГ положительно влияет на содержание в них оксидов азота (оно уменьшается), а количество твердых частиц, наоборот, увеличивается. При этом все зависимости достаточно близки к линейным.

Установленный характер изменения обсуждаемых компонентов полностью укладывается в теоретические представления о характере протекания химических реакций процесса сгорания в дизелях.

Первый факт (уменьшение концентрации оксидов азота в ОГ с ростом доли в них РГ) обусловлен сокращением наличия окислителя в цилиндре (уменьшением коэффициента избытка воздуха). Следствием этой же причины явилось увеличение количество твердых частиц с ростом доли РГ в ОГ.

Количественно же влияние доли РГ (без снижения их температуры) на концентрацию оксидов азота в ОГ и массовый поток твердых частиц в них (в отличие от качественного) на указанных режимах работы двигателя различается существенно. В таблице 4.3 показано во сколько раз отличаются значения концентрации оксидов азота и твердых частиц при добавлении в свежий заряд 18 % ОГ от соответствующих показателей при отсутствии рециркуляции.

Таблица 4.3 – Соотношение концентрации оксидов азота и твердых частиц при добавлении в свежий заряд 18 % отработавших газов и соответствующих показателей при отсутствии рециркуляции

		<i>Режим</i>	<i>Уменьшение содержания NO_x</i>	<i>Увеличение содержания РМ</i>
<i>n = 1850 мин⁻¹</i>	нагрузка 100 %		3,87	1,30
	нагрузка 75 %		6,44	1,88
	нагрузка 50 %		9,52	2,17
<i>n = 1250 мин⁻¹</i>	нагрузка 100 %		3,71	1,02
	нагрузка 75 %		3,78	1,08
	нагрузка 50 %		3,85	1,22

Из материалов таблицы хорошо видно, что рециркуляция ОГ (без снижения температуры РГ) оказывает более существенное влияние на снижение концентрации оксидов азота, чем на рост содержания выбросах твердых частиц. Причем более заметны отмеченные тенденции на режимах, соответствующих номинальной частоте вращения коленчатого вала. Возможно, это объясняется интенсификацией процессов впрыскивания и распыливания топлива, а также усилением вихревого движения рабочего тела в цилиндре при более высоких частотах вращения коленчатого вала.

Поскольку известно, что рециркуляция ОГ влечет за собой ухудшение экономических показателей двигателя, представляла интерес оценка ее влияния на удельный эффективный расхода топлива. Соответствующие результаты представлены на рисунке 4.12.

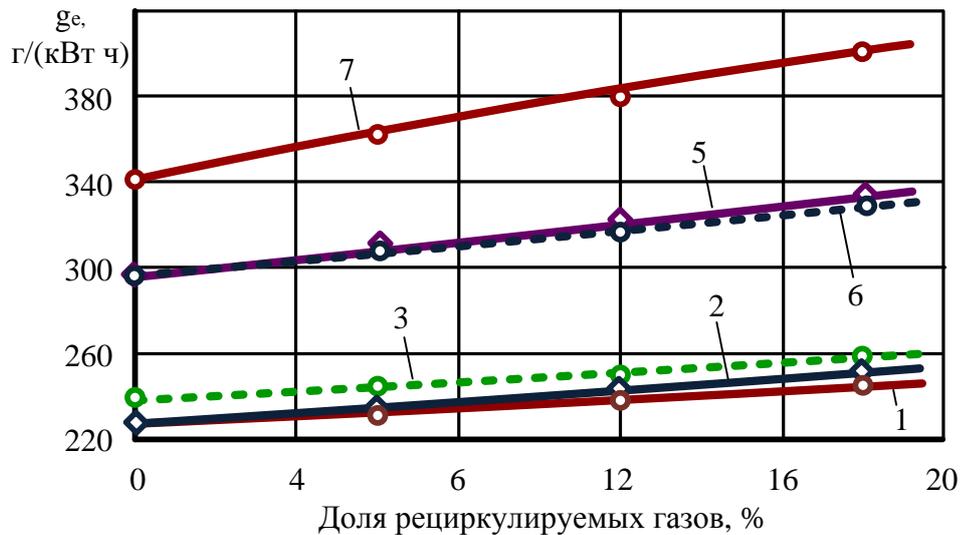


Рисунок 4.12 – Зависимость удельного эффективного расхода топлива дизеля 4ЧН13/15 от доли рециркулируемых газов (без снижения их температуры)

на режимах ГОСТ Р 41.96-2011:

1 – $n = 1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 100 %; 2 – $n = 1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %;
 3 – $n = 1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 50 %; 5 – $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 100 %;
 6 – $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %; 7 – $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 50 %

Реализация охлаждения РГ привела к определенному изменению температуры свежего заряда на входе в цилиндры двигателя.

На рисунке 4.13 показана зависимость температуры свежего заряда от степени охлаждения РГ для наиболее эффективного с точки зрения снижения выбросов оксидов азота (учитывая более существенное влияние доли рециркулируемых газов на снижение концентрации оксидов азота, чем на рост содержания выбросах твердых частиц) варианта рециркуляции, при котором доля РГ составляет 18 %.

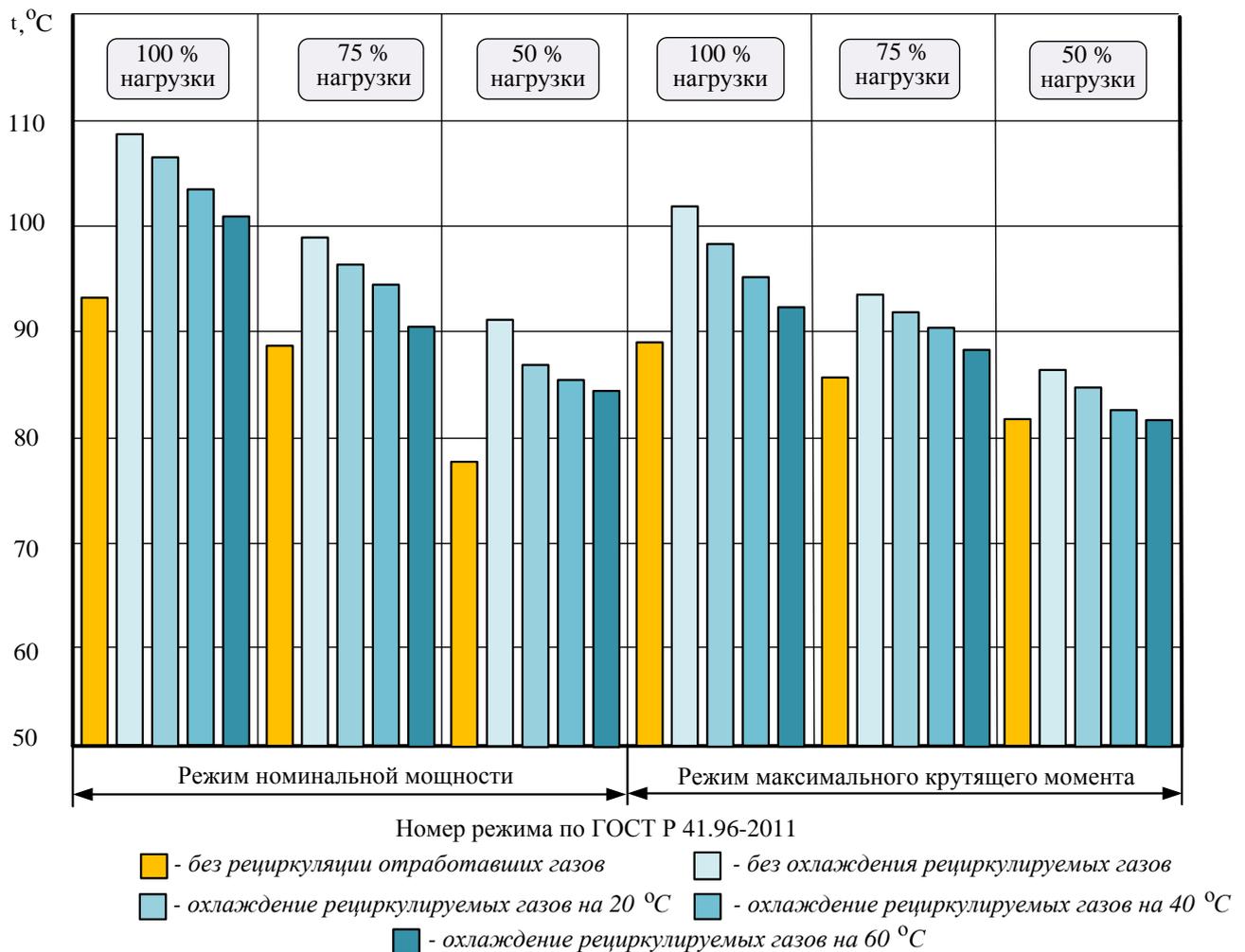


Рисунок 4.13 – Зависимость температуры свежего заряда от степени охлаждения рециркулируемых газов (доля рециркулируемых газов 18 %)

Как и следовало ожидать, чем сильнее охлаждаются РГ, тем ниже температура свежего заряда. Причем при работе на полной нагрузке это снижение почти одинаково на различных скоростных режимах ($9\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $n = 1850\text{ мин}^{-1}$ и $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $n = 1250\text{ мин}^{-1}$), а при снижении нагрузок на меньших частотах вращения коленчатого вала проявляется некоторая разница ($8\text{ }^{\circ}\text{C}$ в случае $n = 1850\text{ мин}^{-1}$ и $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $n = 1250\text{ мин}^{-1}$; в случае 75% -ной нагрузки $6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $n = 1850\text{ мин}^{-1}$ и $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $n = 1250\text{ мин}^{-1}$).

Полученный эффект снижения температуры свежего заряда, обеспеченного работой ВТ, привел к соответствующим изменениям содержания оксидов азота и твердых частиц в ОГ дизеля ЧН13/15.

На рисунке 4.14 показан эффект влияния максимального охлаждения РГ (на $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) на уменьшение концентрации оксидов азота при различных долях содержания в свежем заряде этих газов.

Из рисунка видно, что:

- снижение температуры свежего заряда обеспечивает уменьшение содержания оксидов азота в ОГ;

- с увеличением доли РГ в свежем заряде эффект снижения оксидов азота в ОГ становится все более очевидным, что обусловлено поступлением в цилиндр все большего количества охлажденных газов;

- с уменьшением нагрузки эффект снижения содержания оксидов азота в ОГ усиливается, что, видимо, связано со снижением температуры заряда в цилиндре за счет увеличения коэффициента избытка воздуха, т.е. с дополнительным понижением температуры в надпоршневом пространстве;

На рисунке 4.15 показан эффект влияния охлаждения РГ на $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ на уменьшение массового потока твердых частиц при различных долях содержания РГ в свежем заряде.

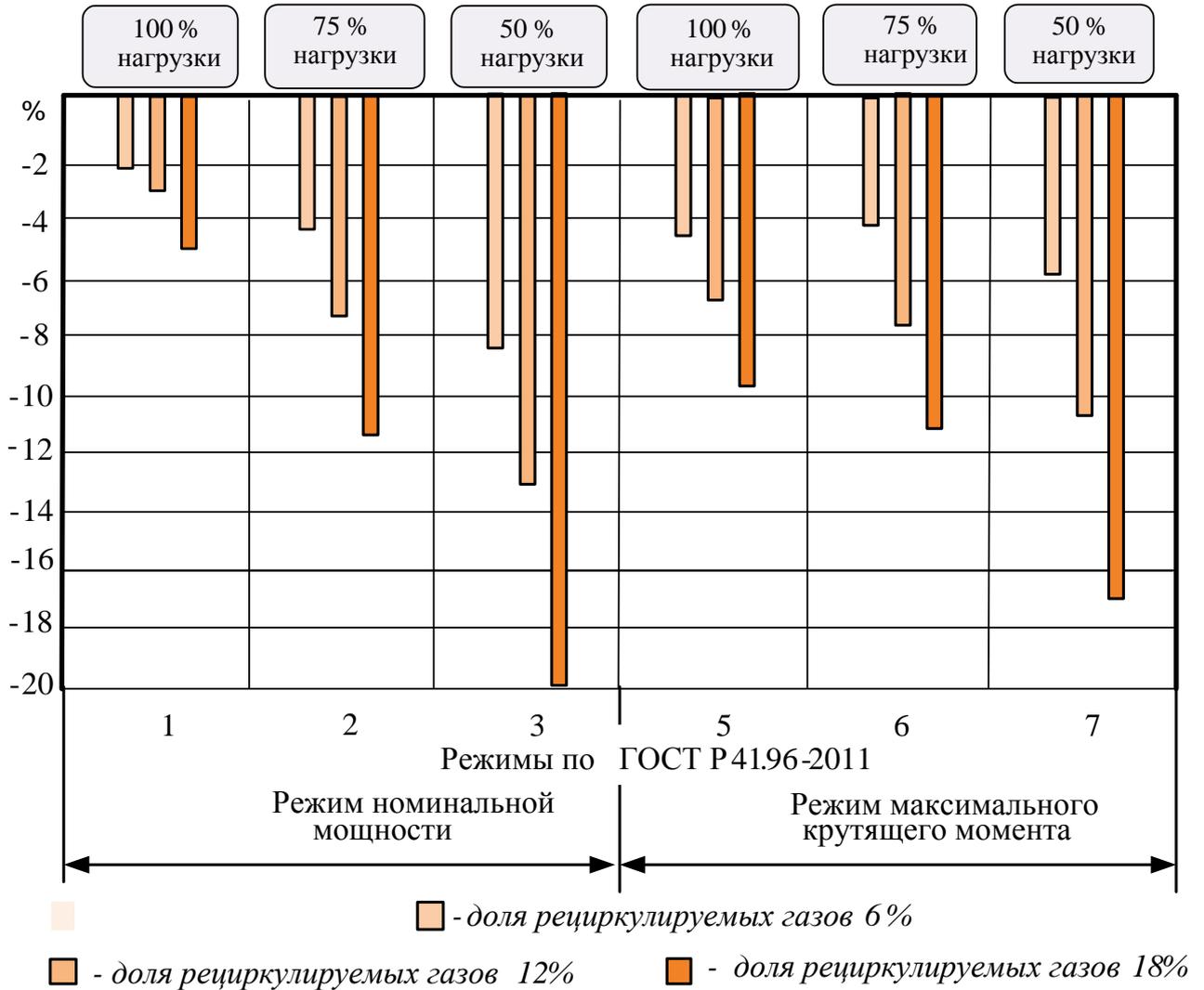


Рисунок 4.14 – Уменьшение концентрации оксидов азота в отработавших газах дизеля 4CH13/15 в зависимости от доли рециркулируемых газов (охлаждение рециркулируемых газов на 60 °С)

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- снижение температуры свежего заряда обеспечивает уменьшение массового потока твердых частиц с ОГ, что, в первую очередь, объясняется изменением структурного состава этих частиц (происходит увеличение относительного количества мелких частиц (0–2 мкм) при уменьшении количества крупных частиц (10 мкм и более), что хорошо согласуется с исследованиями [75];

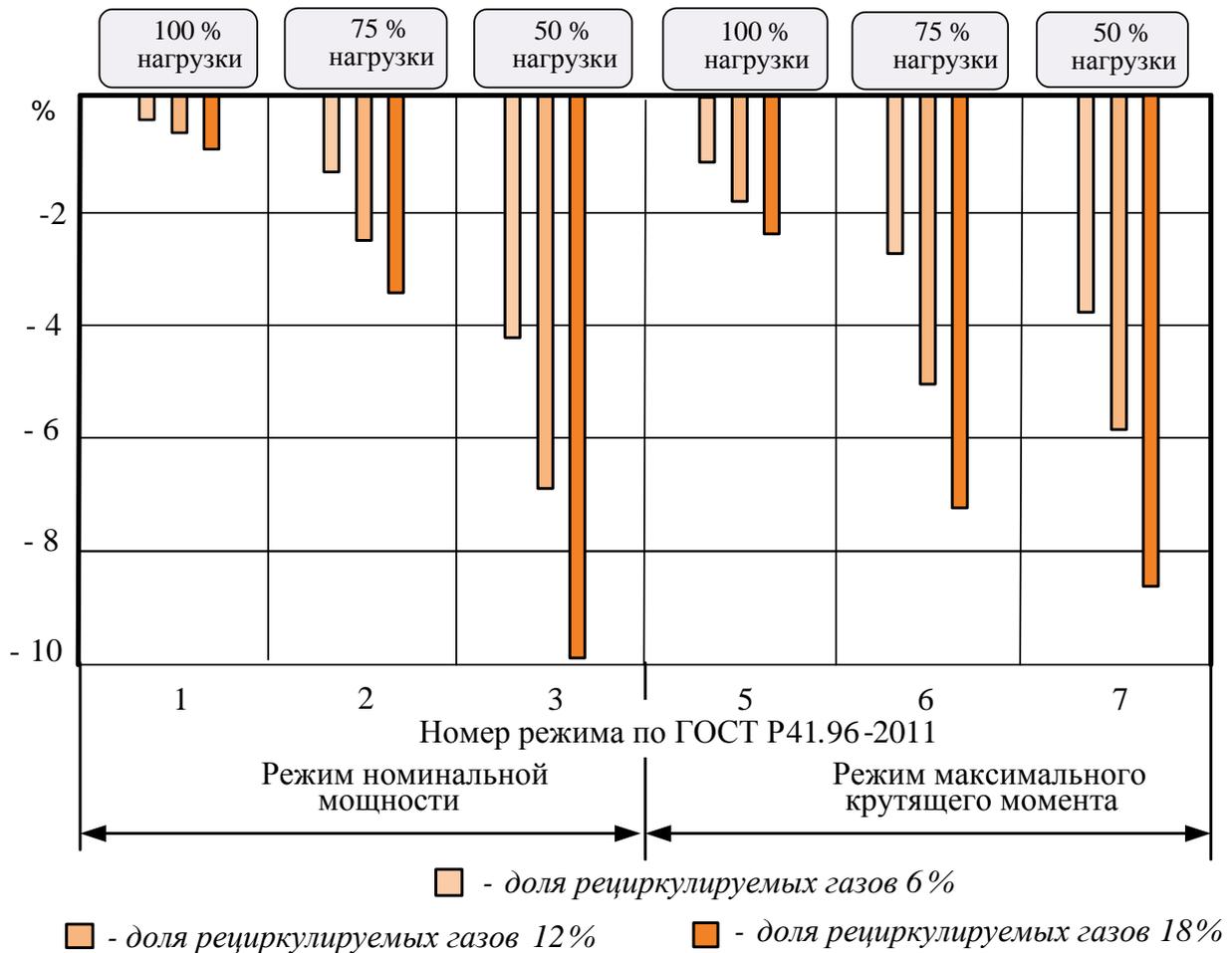


Рисунок 4.15 – Уменьшение массового потока твердых частиц с отработавшими газами дизеля 4CH13/15 в зависимости от доли рециркулируемых газов (охлаждение рециркулируемых газов на 60 °С)

- с увеличением доли РГ в свежем заряде эффект снижения массового потока твердых частиц с ОГ становится все более очевидным, что обусловлено поступлением в цилиндр все большего количества охлажденных газов;

- с уменьшением нагрузки эффект снижения массового потока твердых частиц с ОГ усиливается, что, видимо, связано со снижением температуры заряда в цилиндре за счет увеличения коэффициента избытка воздуха, т.е. с дополнительным понижением температуры в надпоршневом пространстве.

Установленные эффекты влияние снижения содержания в ОГ оксидов азота и твердых частиц в результате охлаждения РГ в ВТ привели к соответствующему уменьшению выбросов этих ВВ в количественном выражении. Комплексное

влияние рециркуляции ОГ и снижения температуры РГ на выбросы обсуждаемых ВВ показано на рисунках 4.16 и 4.17. На них в качестве референтного (базового) значения выбран режим номинальной мощности ($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 100 %) без рециркуляции ОГ. Подчеркнем, что такой вид представления результатов придает им обобщенную форму и открывает возможность распространять их на дизели с объемным способом смесеобразования для предварительной (ориентировочной) оценки влияния рециркуляции ОГ с охлаждением РГ на характер изменения соответствующих экологических показателей.

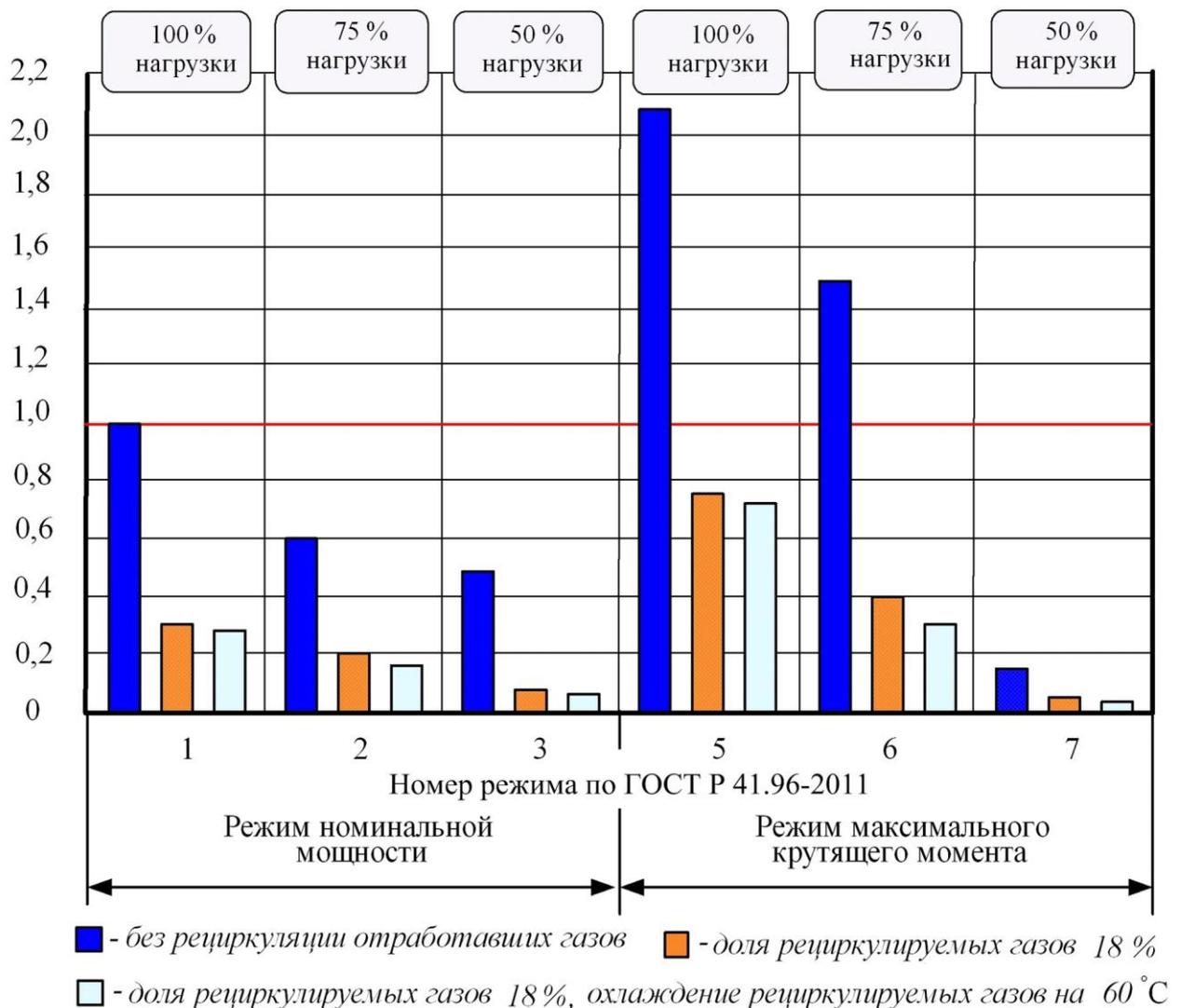


Рисунок 4.16 – Влияние рециркуляции отработавших газов и их охлаждения на концентрацию оксидов азота

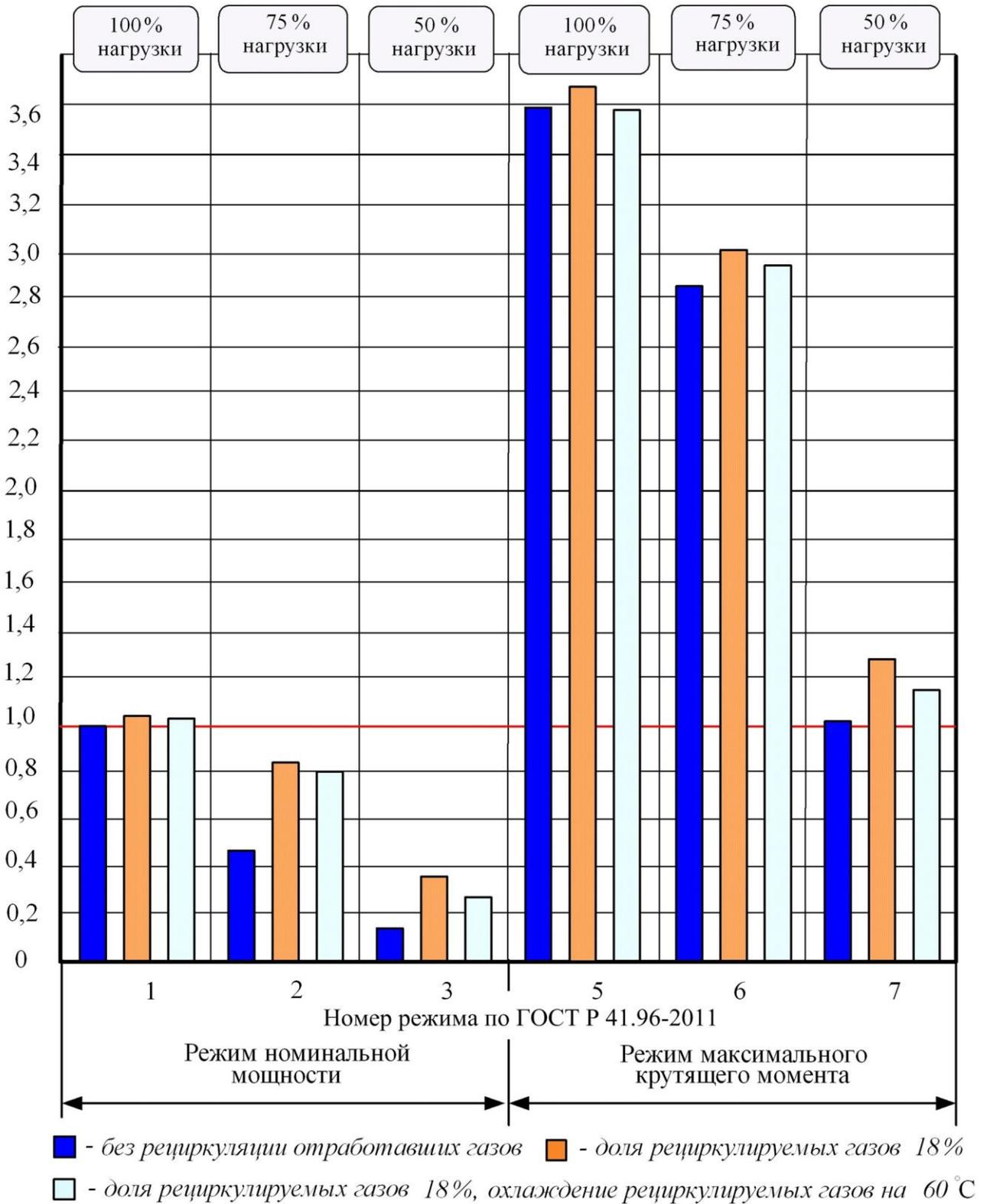


Рисунок 4.17 – Влияние рециркуляции отработавших газов и их охлаждения на величину массового потока твердых частиц

Интерпретация результатов, представленных на рисунках 4.16 и 4.17 в абсолютных значениях выбросов ВВ представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Содержание оксидов азота и твердых частиц в отработавших газах дизеля 4ЧН13/15 при его работе на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 (доля рециркулируемых газов 18 %; охлаждение рециркулируемых газов на 60 °С)

Режим		Содержание NO_x , ppm			Содержание РМ, г/м ³		
		Исходное	С рециркуляцией	С рециркуляцией и охлаждением	Исходное	С рециркуляцией	С рециркуляцией и охлаждением
n = 1850 мин ⁻¹	нагрузка 100 %	250,2	75,5	71,7	39,1	51,9	51,5
	нагрузка 75 %	149,8	50,1	44,3	17,5	32,3	31,1
	нагрузка 50 %	121,1	18,0	14,6	5,6	13,8	10,5
n = 1250 мин ⁻¹	нагрузка 100 %	712,4	190,1	173,8	139,4	142,4	139,1
	нагрузка 75 %	370,8	100,7	88,8	111,0	119,1	114,8
	нагрузка 50 %	38,2	10,4	8,7	40,3	49,5	45,3

Из материалов таблицы видно, что организация рециркуляции ОГ оказала весьма существенное положительное влияние на уменьшение содержания в ОГ оксидов азота, но при этом привела и к некоторому (не столь ощутимому) росту массового потока твердых частиц.

Введение охлаждения РГ обеспечило дополнительное снижение выбросов NO_x и определенное уменьшение выбросов твердых частиц, что в количественном выражении иллюстрируют материалы таблицы 4.5.

Таблица 4.5 – Снижение содержания оксидов азота и твердых частиц в отработавших газах дизеля 4ЧН13/15 за счет охлаждения рециркулируемых газов на 60 °С при его работе на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011, %

<i>Режим</i>					
<i>n = 1850 мин⁻¹</i>			<i>n = 1250 мин⁻¹</i>		
<i>нагрузка 100 %</i>	<i>нагрузка 75 %</i>	<i>нагрузка 50 %</i>	<i>нагрузка 100 %</i>	<i>нагрузка 75 %</i>	<i>нагрузка 50 %</i>
Оксиды азота					
5,1	11,6	18,0	8,5	11,8	16,3
Твердые частицы					
0,08	3,7	16,3	2,3	3,6	8,5

На рисунке 4.18 показано влияние рециркуляции отработавших газов и их охлаждения на удельный эффективный расход топлива дизеля 4ЧН13/15 при его работе на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011. Как и следовало ожидать, реализация рециркуляции ОГ привела к ухудшению экономичности, которое было несколько компенсировано охлаждением РГ (таблица 4.6)

Таблица 4.6 – Снижение удельного эффективного расхода топлива дизеля 4ЧН13/15 за счет охлаждения рециркулируемых газов на 60 °С при его работе на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011

<i>Режим</i>					
<i>n = 1850 мин⁻¹</i>			<i>n = 1250 мин⁻¹</i>		
<i>нагрузка 100 %</i>	<i>нагрузка 75 %</i>	<i>нагрузка 50 %</i>	<i>нагрузка 100 %</i>	<i>нагрузка 75 %</i>	<i>нагрузка 50 %</i>
г/(кВт·ч)					
7	7	6	14	7	8
%					
2,93	2,80	2,31	4,18	2,11	1,98

Из рисунка 4.18 и материалов таблицы очевиден вывод о том, что абсолютное снижение удельного эффективного расхода топлива произошло практически на всех режимах на 6–8 г/(кВт·ч). Это, безусловно, связано с тем, что охлаждение РГ производилось на одну и ту же величину (60 °С). В процентном же выражении эффект улучшения расхода топлива с уменьшением нагрузки снижался, так как его ухудшение в связи с рециркуляцией ОГ становилось все более заметным.

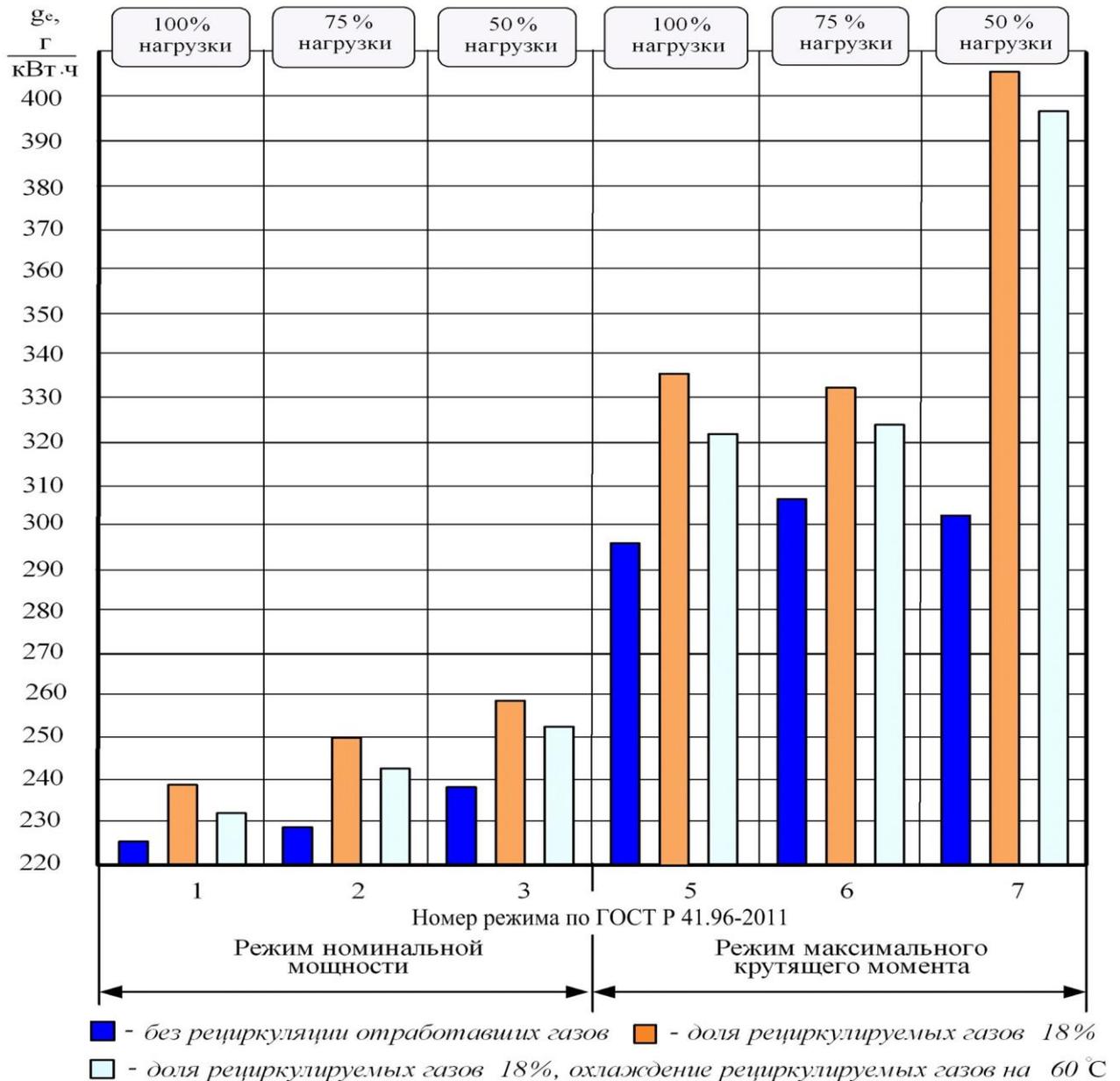


Рисунок 4.18 – Влияние рециркуляции отработавших газов и их охлаждения на удельный эффективный расход топлива дизеля 4ЧН 13/15

4.3. Влияние регулирования температуры отработавших газов на эффективность работы каталитического нейтрализатора

Определение целесообразного уровня температуры ОГ на входе в КН производилось для режимов, соответствующих работе дизеля 4ЧН13/15 по внешней скоростной характеристике (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Характеристика режимов, использованных для определения целесообразного уровня температуры отработавших газов на входе в каталитический нейтрализатор

<i>Частота вращения коленчатого вала, мин^{-1}</i>	<i>Температура в нейтрализаторе (процессов нейтрализации), T, K</i>
850	300, 400, 500, 600, 700, 800, 880
1100	300, 400, 500, 600, 700, 800, 880
1350	300, 400, 500, 600, 700, 800, 880
1600	300, 400, 500, 600, 700, 800, 880
1850	300, 400, 500, 600, 700, 800, 880

На рисунках 4.19–4.21, в качестве примера, показано изменение степеней превращения токсичных компонентов ОГ при их прохождении через КН на режимах, соответствующих частотам вращения коленчатого вала дизеля $n = 850 \text{ мин}^{-1}$; $n = 1350 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1850 \text{ мин}^{-1}$.

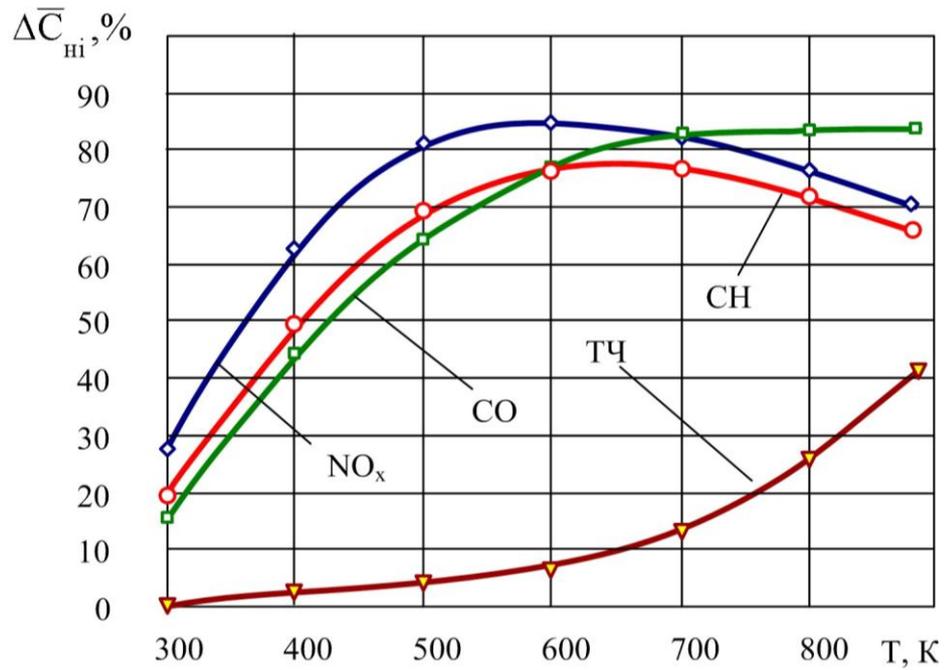


Рисунок 4.19 – Изменение степеней превращения вредных веществ в выбросах дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от температуры отработавших газов ($n = 850 \text{ мин}^{-1}$)

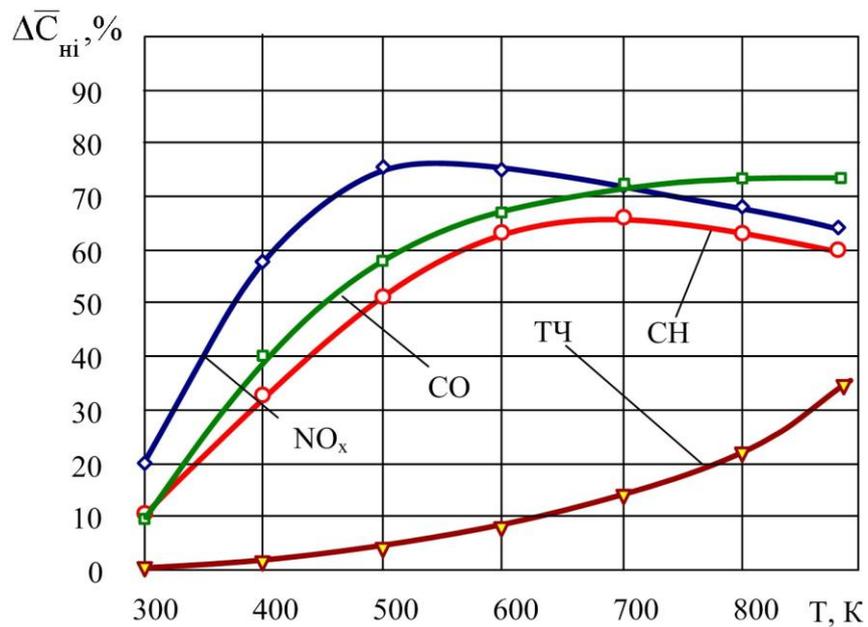


Рисунок 4.20 – Изменение степеней превращения вредных веществ в выбросах дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от температуры отработавших газов ($n = 1350 \text{ мин}^{-1}$)

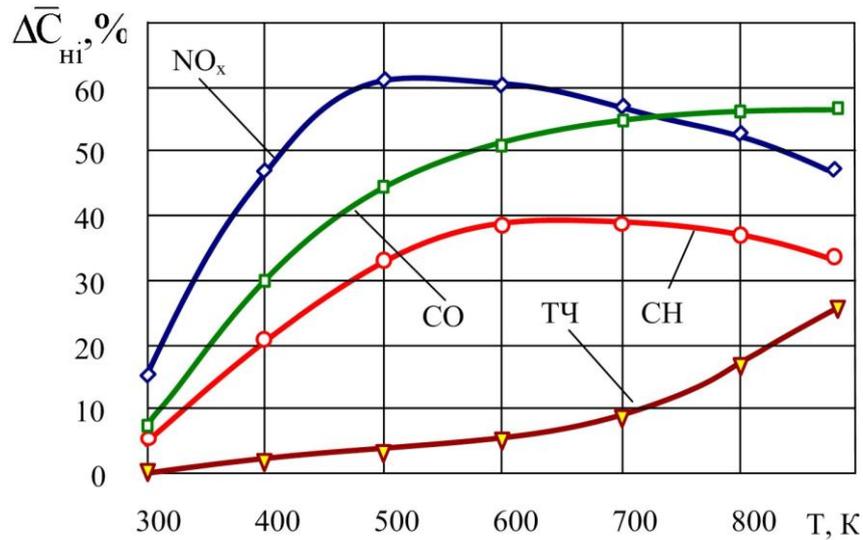


Рисунок 4.21 – Изменение степеней превращения вредных веществ в выбросах дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от температуры отработавших газов ($n = 1850 \text{ мин}^{-1}$)

Анализ характера полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

С повышением частоты вращения коленчатого вала и соответствующего увеличения расходов воздуха и топлива (а, следовательно, и ОГ, проходящих через КН) степени превращения ВВ снижаются. Так, максимальное значение степени превращения оксидов азота при изменении частоты вращения коленчатого вала с 850 до 1850 мин^{-1} снизилось на 27,4 %, углеводородов – на 49,4 %, оксида углерода – на 32,6 % и твердых частиц – на 37,5 %. Причина указанных изменений обусловлена уменьшением времени нахождения ОГ в КН (т.е. времени контакта ВВ с катализатором).

Рисунки 4.19–4.21 свидетельствуют о некоторых общих закономерностях изменения степеней превращения каждого отдельного компонента при любых расходах отработавших газов.

Так, эффективность нейтрализации оксидов азота интенсивно нарастает с увеличением температуры до 500–550 К, после чего плавно снижается. Имеет максимум при температура 600–700 К и кривая степени превращения углеводоро-

дов. Эффективность нейтрализации оксида углерода непрерывно повышается с ростом температуры в зоне реакции доокисления, хотя при более высоких значениях температуры интенсивность этого роста замедляется. Степень превращения твердых частиц, наоборот, имеет четкую тенденцию к росту с повышением температуры.

Для определения целесообразного уровня температуры ОГ на входе в КН были просуммированы степени превращения рассмотренных ВВ при одинаковых температурах ОГ на каждом их рассмотренных скоростных режимах. Результаты изменения суммы степеней превращения, представленные на рисунке 4.22, позволяют сделать следующие выводы.

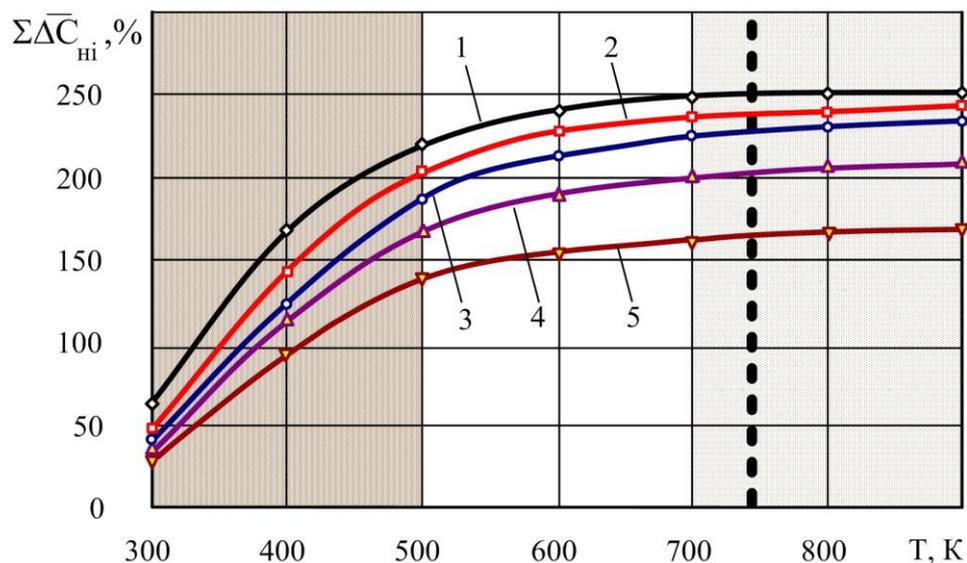


Рисунок 4.22 – Суммарное изменение степеней превращения токсичных компонентов в выбросах дизеля 4ЧН13/15 в зависимости от температуры отработавших газов:

$$1 - n = 850 \text{ мин}^{-1}; 2 - n = 1100 \text{ мин}^{-1}; 3 - n = 1350 \text{ мин}^{-1}; 4 - n = 1600 \text{ мин}^{-1}; \\ 5 - n = 1850 \text{ мин}^{-1}.$$

1. До температуры в зоне реакций нейтрализации, равной 500 К, имеет место весьма интенсивное повышение интегральной эффективности процессов (усредненное повышение значения суммарных степеней превращения исследованных ВВ составляет примерно 70 % на каждые 100 К).

2. В диапазоне температур 500–700 К повышение интегральной эффективности процессов нейтрализации заметно снижается и составляет примерно 11 % на каждые 100 К.

3. После температуры, равной 700 К, повышение интегральной эффективности нейтрализации практически прекращается.

Полученные выводы свидетельствуют о том, что целесообразным уровнем температуры ОГ дизеля 4ЧН13/15 на входе в КН является диапазон 700–800 К, так как меньшие температуры будут снижать эффективность процессов нейтрализации, а более высокие могут вести к перегреву реактора и корпуса КН.

На рисунке 4.23 показана температура ОГ перед КН при работе двигателя на режимах, соответствующих ГОСТ Р 41.96-2011.

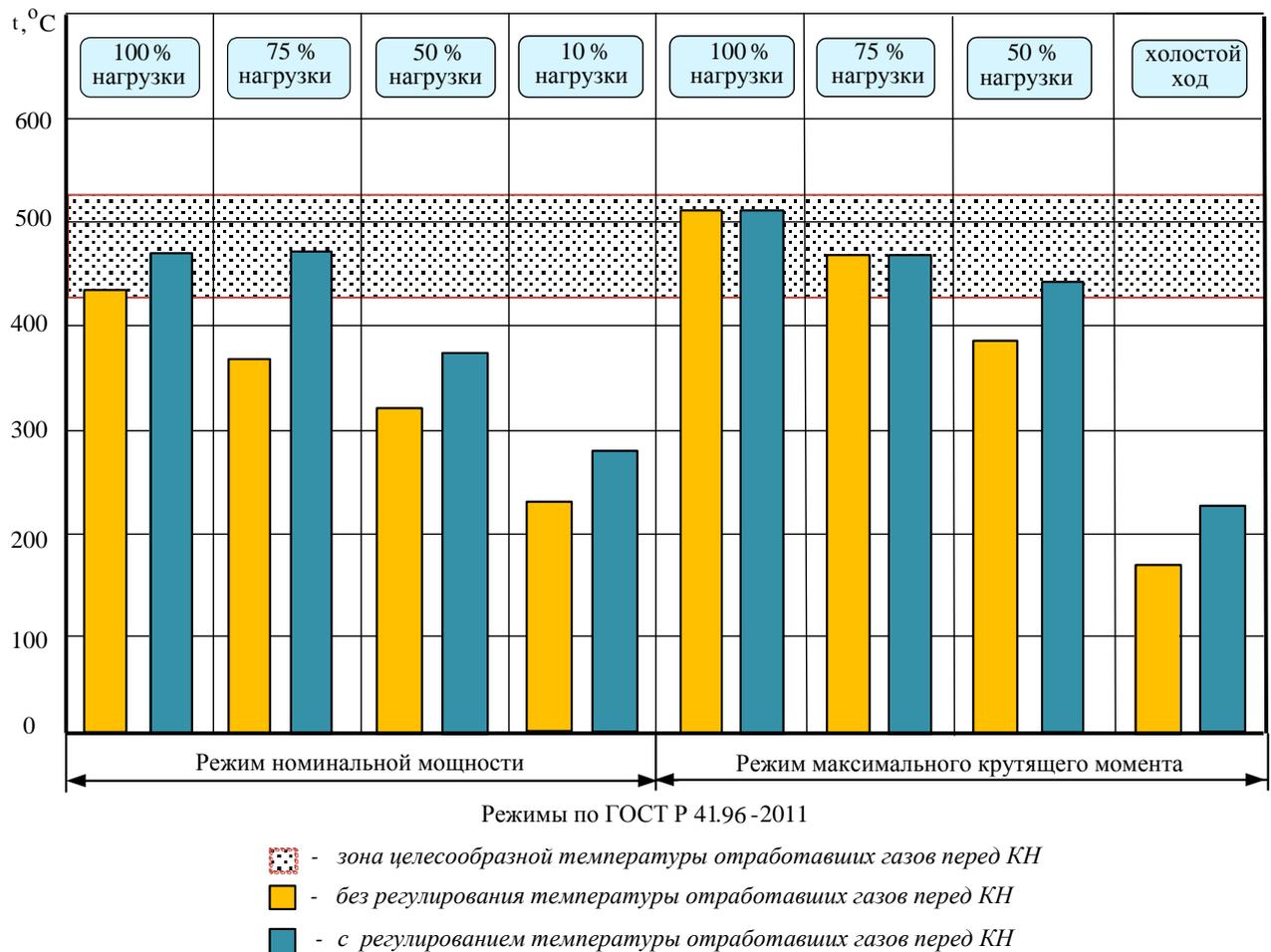


Рисунок 4.23 – Температура отработавших газов перед каталитическим нейтрализатором

В таблице 4.8 показано какое влияние оказало регулирование температуры ОГ перед КН на индивидуальные и интегральные степени превращения токсичных компонентов при работе дизеля 4ЧН13/15 на режимах, соответствующих ГОСТ Р 41.96-2011.

Таблица 4.8 – Влияние регулирования температуры отработавших газов перед каталитическим нейтрализатором с помощью вихревой трубы на индивидуальные и интегральные степени превращения токсичных компонентов, %

<i>Режим</i>		$\Delta\bar{C}_{CO}$	$\Delta\bar{C}_{CH}$	$\Delta\bar{C}_{NOx}$	$\Delta\bar{C}_{PM}$	$\Sigma\Delta\bar{C}_{hi}$
$n = 1850 \text{ мин}^{-1}$	нагрузка 100 %	+0,91	-0,25	-0,89	+6,1	+5,87
	нагрузка 75 %	+3,77	-1,27	-1,17	+31,54	+35,99
	нагрузка 50 %	+6,89	+0,26	-1,65	+41,67	+47,17
	нагрузка 10 %	+16,14	+13,85	-0,49	+48,57	+78,07
$n = 1250 \text{ мин}^{-1}$	нагрузка 100 %	+0,01	-0,04	-0,1	+0,01	-0,03
	нагрузка 75 %	+0,02	+0,01	0,0	0,0	+0,03
	нагрузка 50 %	+2,14	+3,13	-2,05	+39,73	+42,59
	холостой ход	+37,36	+23,23	+10,45	+43,39	+114,43

Материалы таблицы показывает, что регулирование температуры ОГ перед КН с помощью ВТ обеспечило повышение интегральных степеней превращения токсичных компонентов на различных скоростных и нагрузочных режимах 50 и менее процентов и холостом ходу (т.е. там, где нейтрализатор в обычных условиях работает крайне неэффективно) от 47 до 114 %

4.4. Обобщение экспериментальных исследований по определению влияния доли рециркулируемых газов в свежем заряде и их температуры на выбросы оксидов азота и твердых частиц

В соответствии с четвертым этапом проведения настоящего исследования для возможности обобщения экспериментального материала было необходимо связывающей доли РГ в свежем заряде, их температуру, скоростной и нагрузочный режимы работы дизеля с содержанием ВВ в выбрасываемых в атмосферу с ОГ.

Принятые уровни и интервалы варьирования всех факторов представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Уровни и интервалы варьирования факторов

<i>Факторы</i>			<i>Уровни варьирования</i>			
<i>Наименование</i>	<i>Обозначение</i>		<i>Кодовые</i>			<i>Интервалы варьирования</i>
	<i>Натуральное</i>	<i>Кодовое</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	
			<i>Натуральные</i>			
Объемная доля РГ в свежем заряде	$\bar{V}_{\text{ОГ пер}}$	X_1	0,00	0,09	0,18	0,09
Степень снижения температуры РГ в ВТ	$\Delta \bar{t}_{\text{ОГ пер}}$	X_2	1,000	0,94	0,88	0,06
Относительная частота вращения коленчатого вала двигателя	\bar{n}	X_4	0,378	0,689	1,000	0,311
Относительная нагрузка на двигатель	$\bar{M}_{\text{кр}}$	X_4	0,52	0,76	1,00	0,24

В результате обработки данных эксперимента были найдены регрессионные зависимости функций отклика от факторов, оказывающих влияние на содержание оксидов азота и твердых частиц в ОГ:

- для определения содержания оксидов азота в ОГ:

$$\begin{aligned} \text{NO}_x = & 61,462 - 11,925 X_1 + 19,212 X_2 + 55,988 X_3 + 25,737 X_4 - 11,700 X_1 X_3 + \\ & + 17,538 X_2 X_3 + 24,087 X_3 X_4 \end{aligned} \quad (4.1)$$

- для определения массового потока твердых частиц в ОГ:

$$\begin{aligned} \text{PM} = & 73,038 - 33,737 X_1 - 2,212 X_2 - 44,100 X_3 + 8,975 X_4 + \\ & + 40,475 X_1 X_3 - 7,575 X_1 X_4 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Адекватность уравнений (4.1) и (4.2) проверяли с использованием критерия Фишера при заданном уровне значимости $q = 5 \%$.

Расчеты показали, что $F_{\text{расч}} = 4,8$ для зависимости (4.1) и $F_{\text{расч}} = 9,4$ для выражения (4.2). Табличное значение критерия Фишера для имевших место степеней свободы $F_{\text{кр}} = 19,4$ [12]. Как видно, $F_{\text{расч}}$ в обоих случаях меньше $F_{\text{кр}}$. Таким образом, гипотеза адекватности полученной математической модели для расчета содержания оксидов азота (в ppm) и твердых частиц (в г/ч) в зависимости от: объемной доли РГ в свежем заряде; степени снижения температуры РГ в ВТ; относительной частоты вращения коленчатого вала двигателя и относительной нагрузки на двигатель нашла подтверждение с вероятностью совпадения результатов расчета и эксперимента не менее чем в 95 % случаев.

4.5. Выводы

1. Стендовые испытания дизеля 4ЧН13/15 в исходной комплектации показали, что его номинальная эффективная мощность при частоте вращения коленчатого вала 1850 мин^{-1} составляет 151,6 кВт, максимальный крутящий момент - 976 Н·м при частоте вращения 1250 мин^{-1} , минимальный удельный эффективный

расход топлива - 225 г/(кВт·ч). Выбросы ВВ с ОГ соответствуют требованиям ГОСТ Р 41.96-2011. При этом содержание: оксида углерода на 27,7% ниже нормированной величины; углеводородов на 24,0 %; твердых частиц – на 5,0 %; оксидов азота – на 1,5 %; дымность ОГ составляет 70,6 % от нормы.

2. Экспериментально определено влияние доли и температуры РГ на температуру свежего заряда.

3. Экспериментально оценено влияние доли и температуры РГ на концентрацию оксидов азота, величину массового потока твердых частиц в ОГ и удельный эффективный расход топлива дизеля 4ЧН 13/15 на различных скоростных и нагрузочных режимах в соответствии с ГОСТ Р 41.96-2005. При этом установлено, что:

- Снижение содержания оксидов азота за счет охлаждения РГ в ВТ на 60 °С составило от 5,1 до 18,0 % при частоте вращения коленчатого вала, соответствующей режиму номинальной мощности, и от 8,5 до 16,3 % при частоте вращения, соответствующей режиму максимального крутящего момента; твердых частиц – от 0,08 до 16,3 % и от 2,3 до 8,5 % соответственно.

- Снижение удельного эффективного расхода топлива за счет охлаждения РГ на 60 °С составило от 2,31 до 2,93 % при частоте вращения коленчатого вала, соответствующей режиму номинальной мощности, и от 1,98 до 4,18 % при частоте вращения, соответствующей режиму максимального крутящего момента.

4. Регулирование температуры ОГ перед КН с помощью ВТ обеспечило повышение интегральных степеней превращения токсичных компонентов на различных скоростных, нагрузочных режимах 50 и менее процентов и на режиме холостого хода (т.е. там, где нейтрализатор в обычных условиях работает крайне неэффективно) от 47 до 114 %

Глава 5

**ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ 4ЧН13/15
С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ И ИХ ОХЛАЖДЕНИЕМ
(численный эксперимент)**

5.1. Исходные данные для расчета

Расчетные исследования выполнялись с использованием программного обеспечения AVL FIRE v.2010.1 («платиновая» лицензия № 14DAE92804C4 от 08.11.2011).

Конфигурация камеры сгорания дизеля была взята с чертежа поршня (рисунок 5.1) и показана на рисунке 5.2.

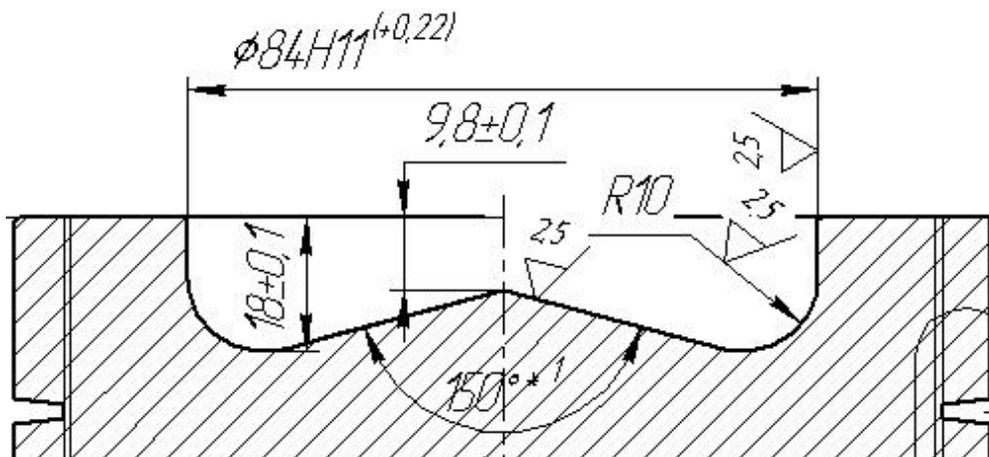


Рисунок 5.1 – Чертеж поршня дизеля 4ЧН13/15 (фрагмент)

Внешний вид автоматически сгенерированной расчетной сетки для различных углов поворота коленчатого вала приведен на рисунке 5.3.

Основные характеристики расчетной сетки: число граничных слоев – 2; толщина граничных слоев – 0,0002 м; ширина компенсационного объема (в поршне) – 0.0015 м; средний размер ячейки – 0.001 м; число ячеек в радиальном направлении – 25; минимальное число ячеек (в положении поршня около ВМТ) – 44100; максимальное число ячеек (в положении поршня около НМТ) – 114700; тип ячеек – hexahedron.

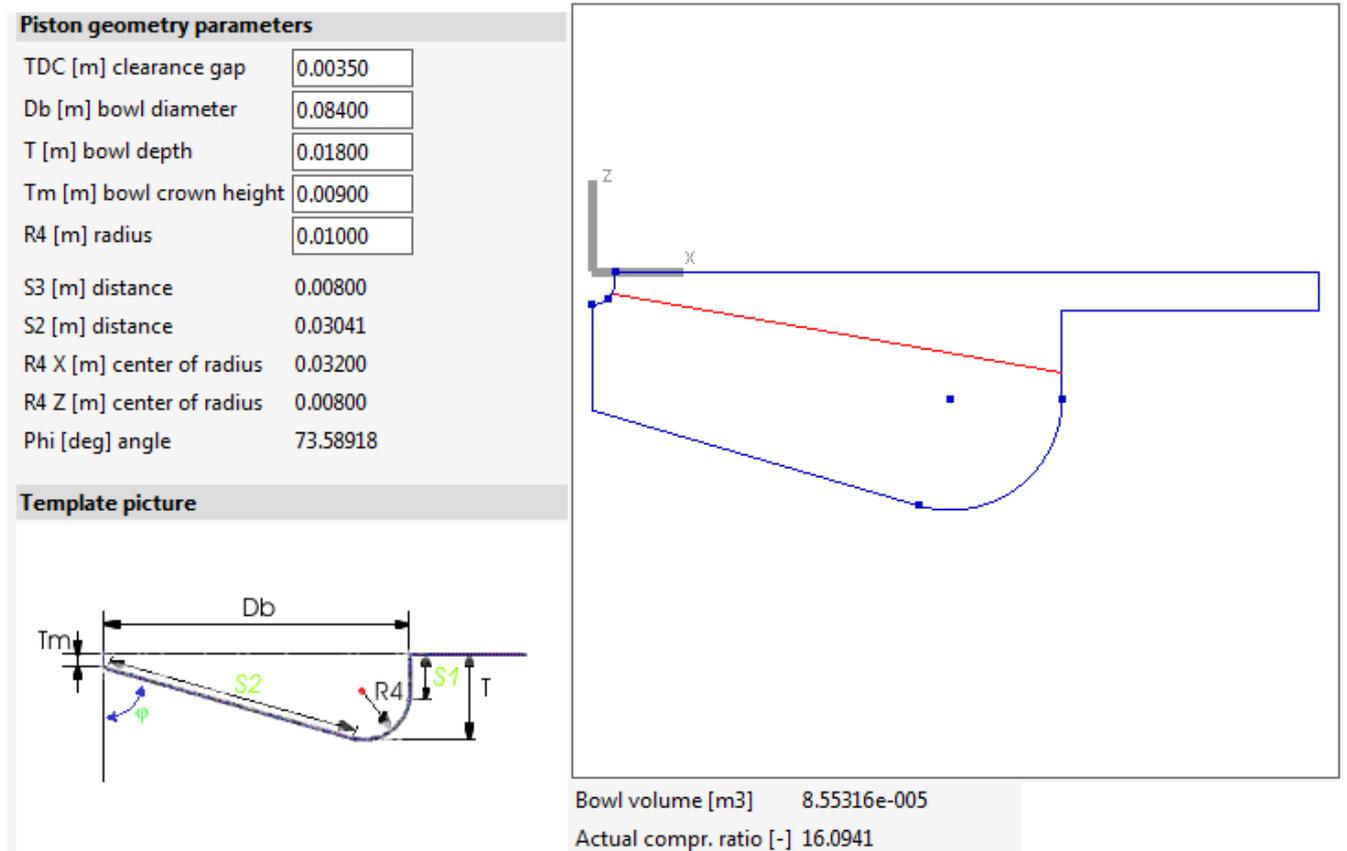


Рисунок 5.2 – Конфигурация камеры сгорания дизеля 4ЧН13/15
(скриншот препроцессора AVL FIRE ESE DIESEL)

Так как размер файла настроек и исходных численных данных для расчета имеет объем 262 страницы, ниже (таблицы 5.1 и 5.2) приведены только основные исходные и настроечные данные (частично полученные на втором этапе проведения экспериментов), которые подбирались исходя из технических характеристик дизеля 4ЧН13/15 и задач расчета, соответственно.

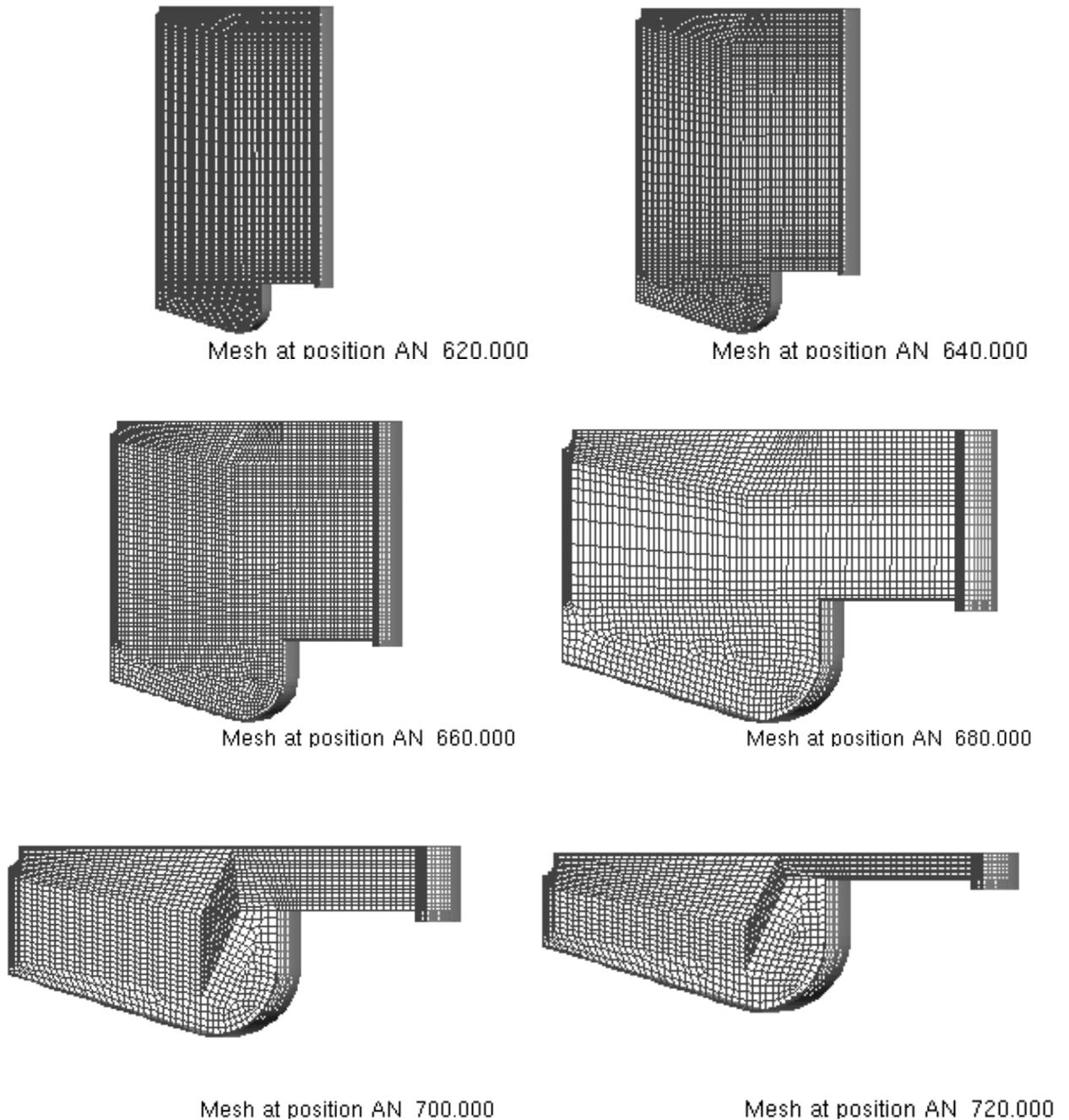


Рисунок 5.3 – Расчетная сетка камеры сгорания дизеля 4ЧН13/15

для углов поворота коленчатого вала:

*620, 640, 660, 680, 700, 720 °ПКВ (ВМТ в момент сгорания
соответствует 720 град ПКВ)*

Таблица 5.1 – Варьируемые параметры расчетного эксперимента

№ ре- жи- ма	Цикловая подача топлива, мг (на одно распыливающее отверстие форсунки)	Параметр		
		Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Давление наддува, кПа	Угол начала впрыскива- ния топлива, град ПКВ
Режим номинальной мощности				
1	16	1850	205	700
2	12	1850	180	702
3	8	1850	145	704
Режим максимального крутящего момента				
4	20	1250	150	700
5	18	1250	140	704
6	16	1250	130	706
7	12	1250	120	708
8	8	1250	110	710
Режим минимальной частоты вращения холостого хода				
9	8	700	100	706

Таблица 5.2 – Исходные данные и настройки математической модели для расчета

№ п.п.	Параметр	Значение
1. Общие данные *		
1.1	Диаметр цилиндра, м	0,13
1.2	Степень сжатия	16
1.3	Радиус кривошипа, м	0,075
1.4	Длина шатуна, м	0,26
2. Распылитель форсунки *		
2.1	Число распыливающих отверстий	8
2.2	Высота расположения распыливающих отверстий относительно огневой поверхности головки цилиндра, м	0,002
2.3	Выступание распылителя относительно огневой поверхности головки цилиндра, м	0,003
2.4	Угол расположения распыливающих отверстий, град	160
3. Параметры расчета		
3.1	Режим расчета	По углу ПКВ
3.2	Начальный угол расчета, °ПКВ	540
3.3	Конечный угол расчета, °ПКВ	800
3.4	Частота вращения коленчатого вала двигателя, мин ⁻¹	см. табл. 4.1

Продолжение таблицы 5.2

№ п.п.	Параметр	Значение
4. Граничные условия*		
4.1	Поршень (температура, К)	575
4.2	Гильза цилиндра (температура, К)	475
4.3	Головка цилиндра (температура, К)	550
5. Начальные условия		
5.1	Давление	см. табл. 4.1
5.2	Температура, °С	30
5.3	Кинетическая энергия турбулентности, м ² /с ² *	50
5.4	Масштаб турбулентности, м *	0,003
5.5	Диссипация кинетической энергии турбулентности, м ² /с ³ *	19365
5.6	Тип топлива	дизельное
5.7	Доля рециркулируемых газов	см. табл. 2.1
5.8	Доля кислорода в отработавших газах	0,478
6. Модели		
6.1	Модель скорости ламинарного пламени	Metghalchi & Keck
6.2	Модель турбулентности	k-epsilon
6.3	Сжимаемость газа	учитывается
6.4	Модель горения	Eddy Breakup Model
6.5	Модель воспламенения	Diesel
6.6	Модель образования оксидов азота	Heywood original
6.7	Модель сажеобразования (основная)	Hiroyasu /Nagle /Stickland-Constable
6.8	Модель сажеобразования из масла	отключена
7. Параметры смесеобразования		
7.1	Угол начала впрыскивания топлива	см. табл. 4.1
7.2	Продолжительность впрыска, °ПКВ*	24
7.3	Масса топлива впрыскиваемого в расчетную область	см. табл. 4.1
7.4	Температура топлива, К*	330
7.5	Диаметр распыливающего отверстия, м*	0,000217
7.6	Начальный угол раскрытия факела, град*	16
7.7	Математическая модель топливной пленки	включена

* По данным завода-изготовителя

5.2. Результаты оценки особенностей рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией отработавших газов и их охлаждением

Большой объем материала, полученного в результате выполненных расчетов, отражающих особенности рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией ОГ и их охлаждением, не позволяет привести его в рамках ограниченного объема текста диссертации. Поэтому на рисунках 5.4–5.14 показаны сравнительные данные по влиянию охлаждения РГ для их доли в свежем заряде, равной 18 %, и при снижении их температуры на 60 К.

Результаты расчетов приведены для частоты вращения коленчатого вал, соответствующей номинальной мощности, при нагрузках 100, 75 и 50 %, и для частоты, соответствующей максимальному крутящему моменту при нагрузках 75, 25 и 10 %. Отсутствия нагрузки 100 % на последнем скоростном режиме связано с тем, что он не является, характерном для двигателей сельскохозяйственных и дорожно-строительных машин (см. рисунок 4.5.), каковым и является дизель 4ЧН13/15. Таким режимом в данном случае является режим № 5 (см. таблицу 3.1). Кроме того, известно, что максимум выбросов NO_x дизелями с объемным смесеобразованием (к которым относится исследуемый двигатель) приходится, как правило, на нагрузки от 62,5 до 87,5 % [75].

На рисунке 5.4 показано изменение температуры рабочего тела при работе на режиме № 5 без охлаждения РГ и в случае их охлаждения. Из рисунка видно, что имеет место определенная разница теплового состояния газов в камере сгорания в указанных двух случаях. В частности, расчеты показали, что разница температуры свежего заряда на входе в цилиндр в случае охлаждения РГ в ВТ и без него составила 11 К (при стендовых испытаниях она равнялась 9 К – см. рисунок 3.13), максимальная температура газов в надпоршневом объеме при отсутствии охлаждения составляла 1885 К, а в случае охлаждения – 1819 К. Средняя темпера-

тура рабочего тела в указанном на рисунке диапазоне изменения град ПКВ составила в первом варианте 1571 К, во втором – 1513 К.

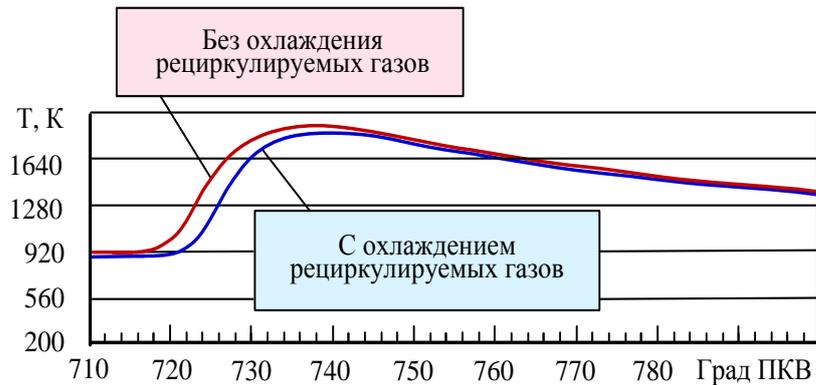


Рисунок 5.4 – Изменение температуры рабочего тела без охлаждения рециркулируемых газов и в случае их охлаждения

($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %, доля рециркулируемых газов 18 %, снижение температуры рециркулируемых газов 60°C)

Более низкая температура свежего заряда в случае охлаждения РГ обеспечила повышение его плотности и, как следствие, увеличение массовой доли кислорода в надпоршневом пространстве примерно на 30 % (рисунок 5.5)

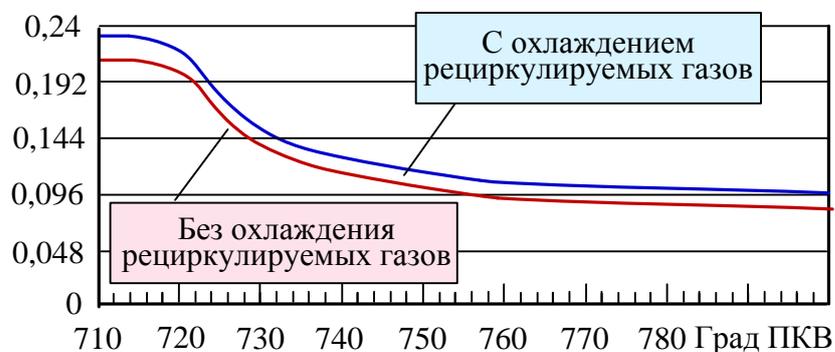


Рисунок 5.5 – Изменение массовой доли кислорода в надпоршневом пространстве без охлаждения рециркулируемых газов и в случае их охлаждения

($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %, доля рециркулируемых газов 18 %, снижение температуры рециркулируемых газов 60°C)

Это привело к более быстрому сгоранию паров топлива, образовавшихся в период задержки воспламенения и, соответственно, более интенсивному тепловыделению. Скорость тепловыделения в случае охлаждения РГ за короткий про-

межутков времени стремительно увеличивалась и, достигнув определенного максимума (примерно 40 Дж/град ПКВ), также быстро уменьшилась (рисунок 5.6). Без охлаждения РГ максимум скорости тепловыделения составил лишь 13 Дж/град ПКВ. Совершенно очевидно, что в этот период времени преобладал кинетический механизм горения. Наличие большего количества окислителя в камере сгорания в случае охлаждения РГ обеспечило и более раннее горение топлива в диффузионной фазе, что хорошо видно из графиков, приведенных на рисунках 5.6 и 5.7.

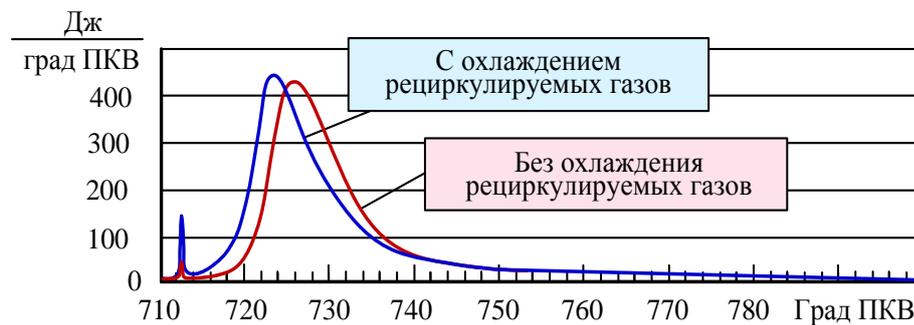


Рисунок 5.6 – Скорость тепловыделения в надпоршневом пространстве без охлаждения рециркулируемых газов и в случае их охлаждения ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %, доля рециркулируемых газов 18 %, снижение температуры рециркулируемых газов $60 \text{ }^\circ\text{C}$)

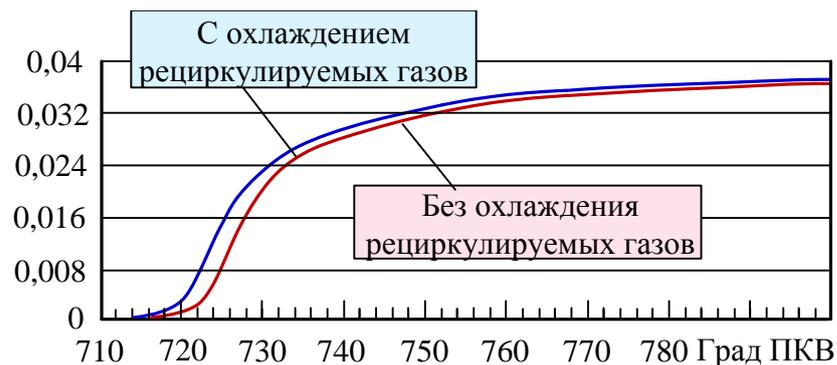


Рисунок 5.7– Изменение массовой доли выгоревшего топлива в надпоршневом пространстве без охлаждения рециркулируемых газов и в случае их охлаждения ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %, доля рециркулируемых газов 18 %, снижение температуры рециркулируемых газов $60 \text{ }^\circ\text{C}$)

Рассмотренные особенности протекания процесса сгорания в случае охлаждения РГ привели к более полному тепловыделению (рисунок 5.8), что и отразилось в снижении удельного эффективного расхода топлива, зафиксированного в ходе натурного эксперимента (см. рисунок 4.18).

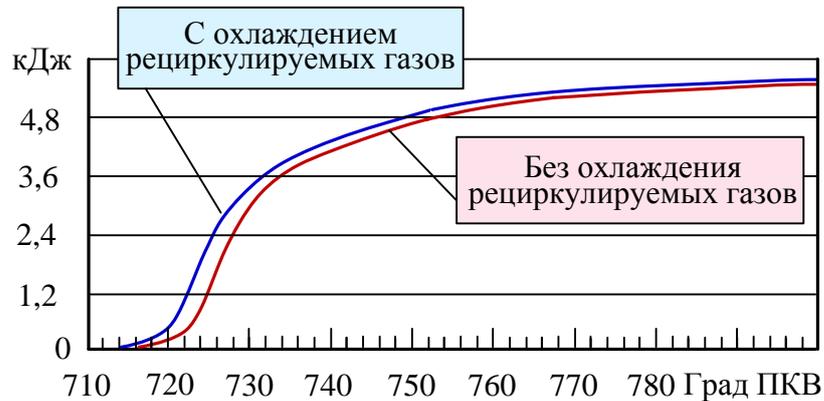


Рисунок 5.8 – Интегральная характеристика тепловыделения в надпоршневом пространстве без охлаждения рециркулируемых газов и в случае их охлаждения ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %, доля рециркулируемых газов 18 %, снижение температуры рециркулируемых газов 60°C)

На рисунках 5.9,а–5.9,е в визуализированной форме представлена динамика изменения температуры в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала на режимах 1, 2, 3, 5, 7 и 8, приведенных в таблице 3.1.

Рассматривая зоны развития максимальной температуры, следует помнить, что эти зоны образуются в диффузионном пламени (которое имеет место в дизелях), когда окислитель диффундирует во фронт пламени вокруг каждой капли топлива и в узкой области смешения протекает реакция окисления.

Как видно, при частоте вращения коленчатого вала, соответствующей номинальной мощности и 100 %-ной нагрузке (рисунок 5.9,а) реально ощутимый эффект охлаждения РГ проявляется только начиная с 770 град ПКВ после ВМТ.

При работе на этих же оборотах с нагрузкой 75 % (рисунок 5.9,б) наоборот, эффект охлаждения проявляется до 770 град ПКВ и не виден в дальнейшем.

При нагрузке же 50 % (рисунок 5.9,в) охлаждение рециркулируемых газов приводит к явному уменьшению как размера зон рабочего тела с высокой температурой, так и некоторому снижению ее максимальной величины.

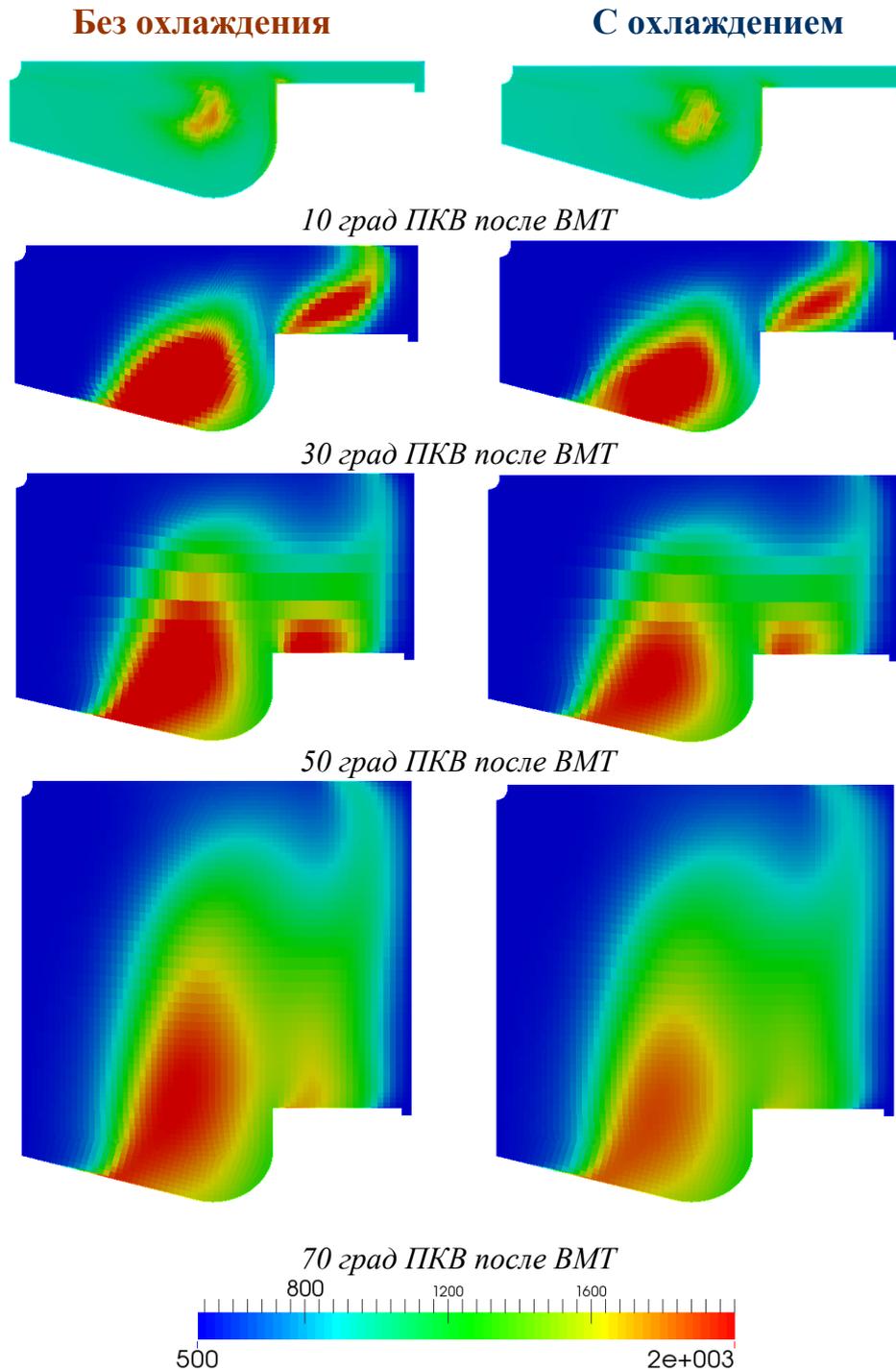


Рисунок 5.9,а – Динамика изменения температуры в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 100 %)

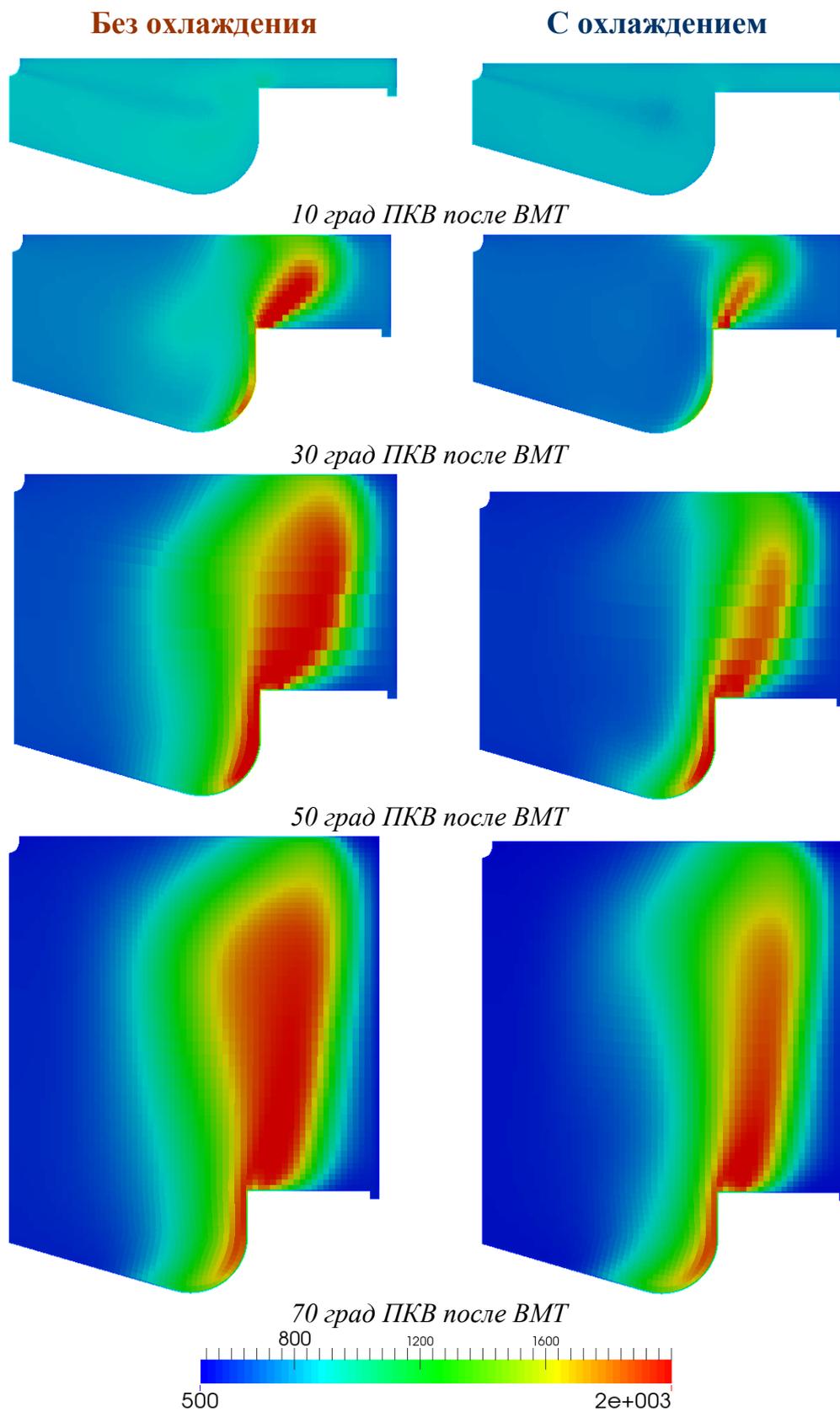


Рисунок 5.9,в – Динамика изменения температуры в надпоршневом пространстве
в зависимости от угла поворота коленчатого вала
($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 50 %)

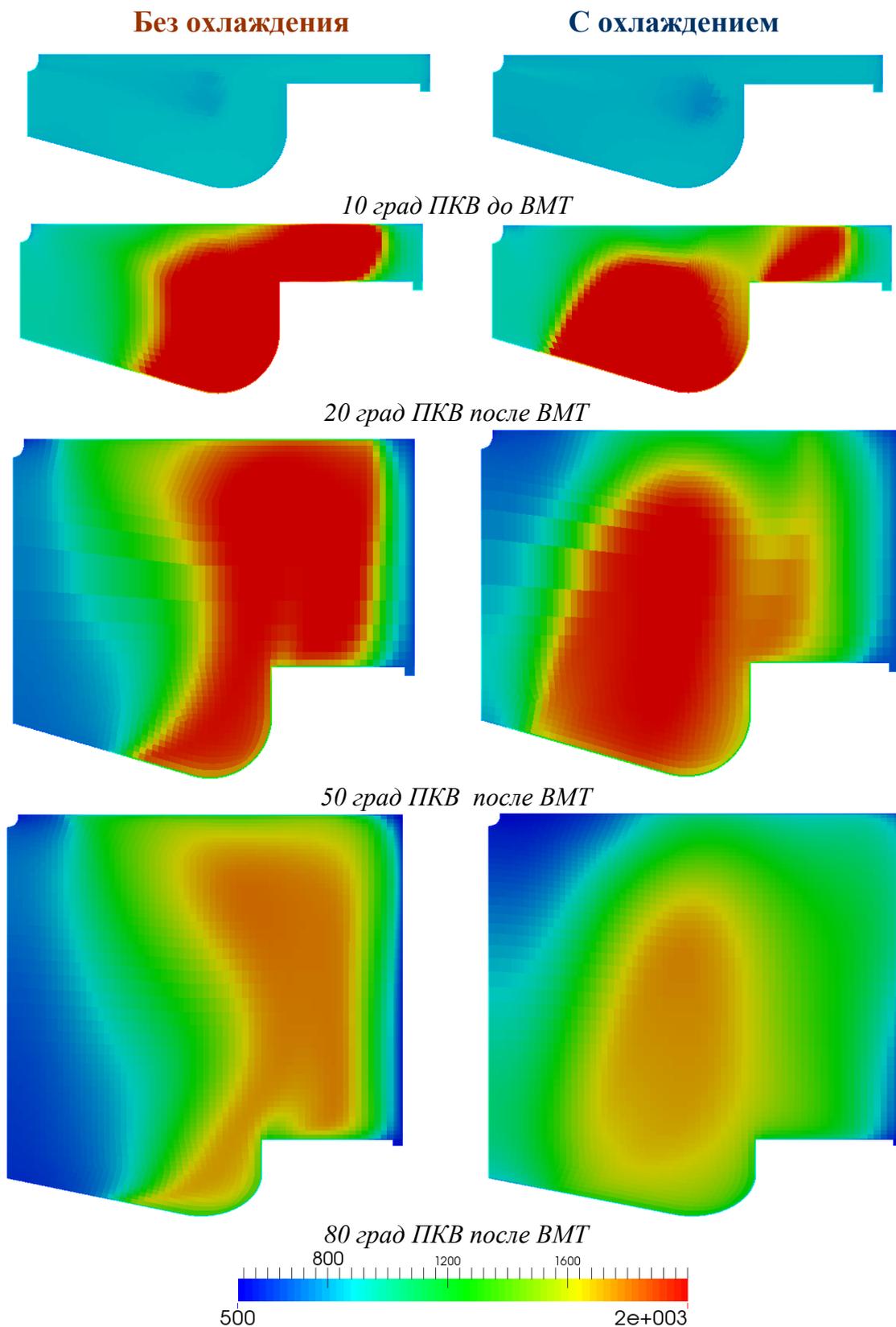


Рисунок 5.9,з – Динамика изменения температуры в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

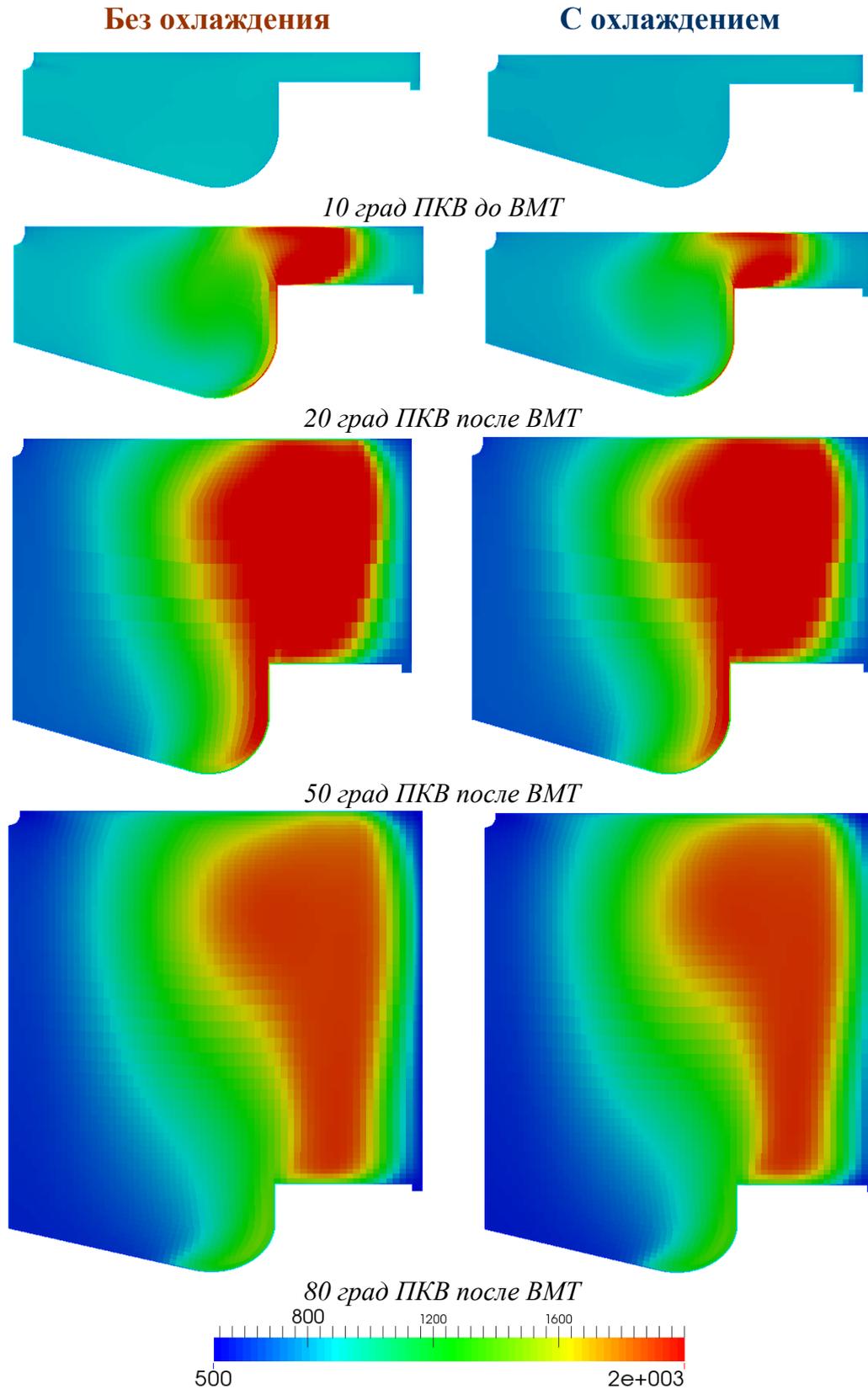


Рисунок 5.9,д – Динамика изменения температуры в надпоршневом пространстве
в зависимости от угла поворота коленчатого вала
($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 50 %)

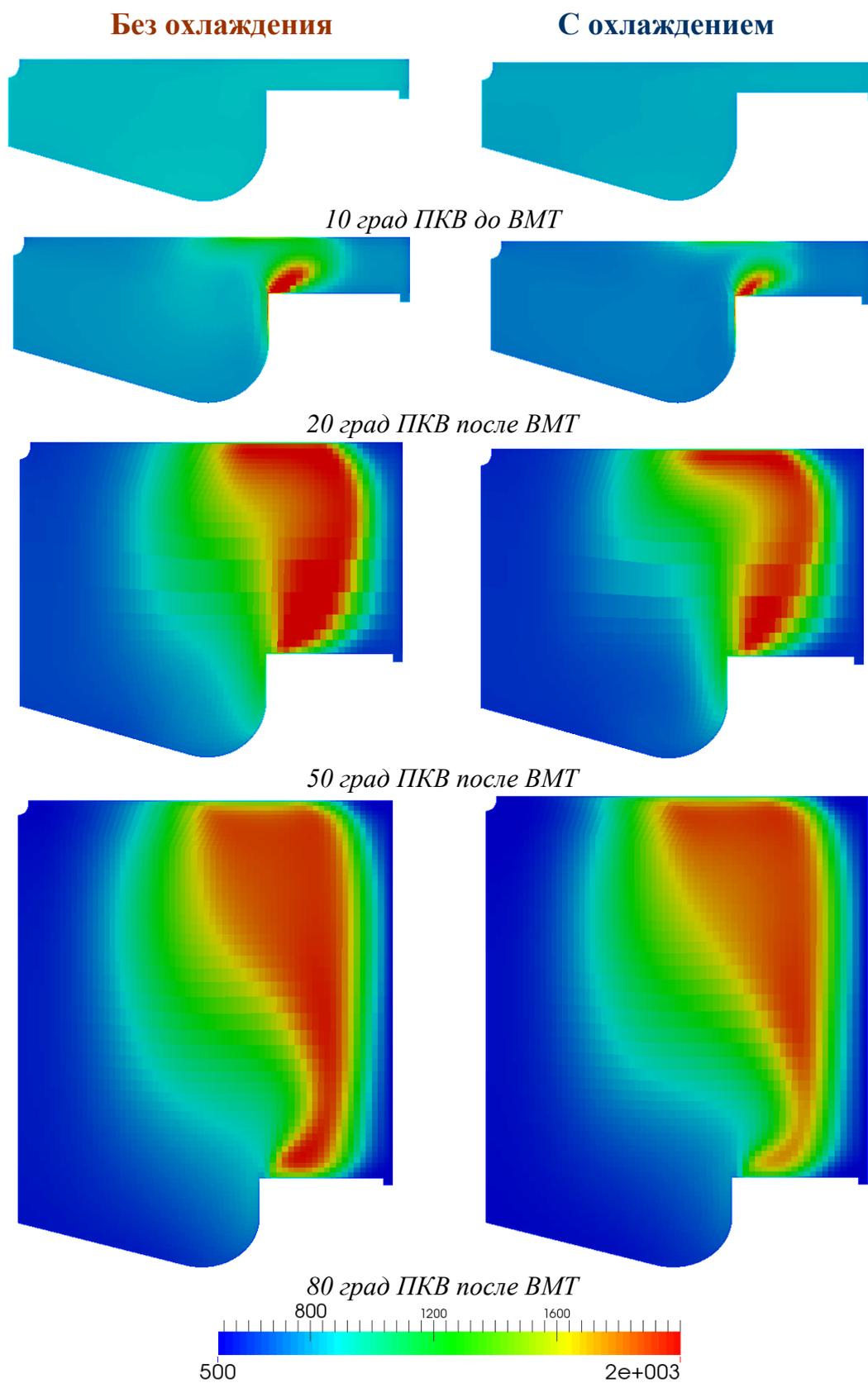


Рисунок 5.9,*e* – Динамика изменения температуры в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 10 %)

При частоте вращения коленчатого вала, соответствующей максимальному крутящему моменту, очевидное влияние охлаждения РГ на уменьшение зон рабочего тела с высокой температурой и ее максимальных значений наблюдается при нагрузке 75 % (рисунок 5.9,з), практически не наблюдается при нагрузке 50 % (рисунок 5.9,д), и заметно лишь до 770 град ПКВ после ВМТ при нагрузке 10 % (рисунок 5.9,е).

Отмеченные выше результаты влияния охлаждения РГ в ВТ на температурное состояние РТ в надпоршневом пространстве и обусловили снижение содержания оксидов азота, установленное при стендовых испытаниях. Следует отметить и тот факт, что организация охлаждения РГ в ВТ весьма существенно повлияла на скорость образования оксидов в камере сгорания (рисунок 5.10).

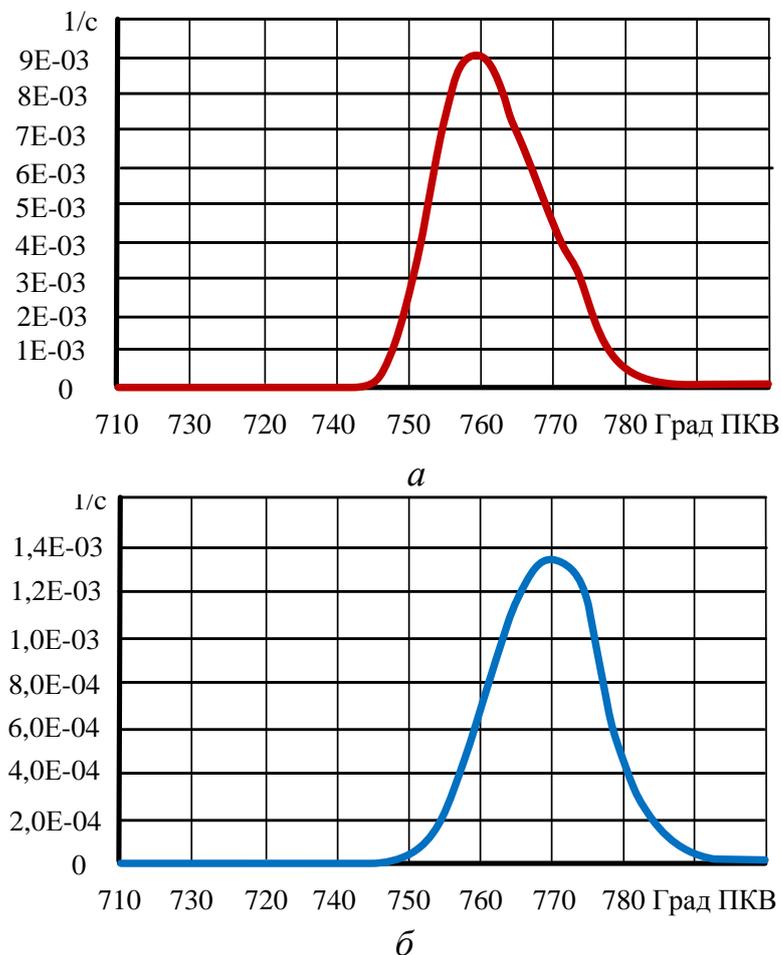


Рисунок 5.10 – Скорость образования оксидов азота в камере сгорания ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %, доля рециркулируемых газов в свежем заряде 18 %);
а – без охлаждения рециркулируемых газов; *б* – при охлаждении рециркулируемых газов на 60 K

Так максимальное значение этой скорости при работе двигателя на режиме № 5 (см. таблицу 3.1) уменьшилось в 7,35, а средняя – в 6,36 раза. При этом без охлаждения РГ максимальная скорость достигалась раньше – практически через 40 град ПКВ после ВМТ, а в случае их охлаждения – на 10 град ПКВ позже.

Кроме сказанного, рассматривая ситуацию с образованием оксидов азота, отраженную на рисунках 5.11,*a*–5.11,*e*, следует помнить, что по происхождению выделяют три группы оксидов азота, образующихся в дизеле: термические, топливные и быстрые [8]. Физическую основу процессов образования всех групп оксидов азота составляет цепной механизм, описанный Зельдовичем Я.Б., Садовниковым П.Я. и Франк-Каменецким Д.А. [42].

Быстрые оксиды азота образуются только при очень высокой степени диссоциации молекул топлива и окислителя. Принципиальная возможность образования топливных оксидов азота сомнений не вызывает, но необходимость их учета проявляется при использовании топлив с содержанием связанного азота от 0,03–0,5 % и выше. Источником («поставщиком») атомов азота при образовании термических и быстрых оксидов азота является, прежде всего, молекулярный азот воздуха, участвующего в процессе сгорания топлива. При образовании топливных оксидов азота источником атомов азота и инициатором дополнительных реакций образования оксидов азота является связанный азот топлива, который в ходе пламенных реакций переходит в лабильное реакционно-способное состояние. Возможными источниками азота являются также различные присадки к топливам и маслам, большинство из которых создано на основе четырехатомных соединений кислорода, азота, углерода и других.

Топливные и быстрые оксиды азота образуются непосредственно в зоне горения – во фронте пламени, реакции их образования идут совместно с реакциями разложения и горения топлива.

Термические оксиды азота образуются за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания после завершения пламенных реакций, так как скорости окисления

азота воздуха по своей физической природе ниже скоростей сгорания углеводородов топлив.

Необходимо рассматривать и характерное время образования оксидов азота. Время пребывания реагентов во фронте пламени составляет [6]: для ламинарного – приблизительно 10^{-3} с; для турбулентного – около $0,1 \cdot 10^{-3}$ с. Время же активного тепловыделения для автотракторных дизелей оценивается величиной $10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$ с. Отсюда следует вывод о том, что характерное время образования термических оксидов азота в цилиндре дизеля на один-два порядка выше времени образования быстрых оксидов азота.

На рисунках 5.11,*a*–5.11,*e* в визуализированной форме представлена динамика изменения массовой доли оксидов азота в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала на режимах 1, 2, 3, 5, 7 и 8, приведенных в таблице 3.1, которая в полной мере соответствует изложенным выше соображениям.

Приведенные материалы наглядно подтверждают полученные при стендовых испытаниях результаты положительного влияния охлаждения рециркулируемых газов на изменение содержания оксидов азота в ОГ дизеля 4ЧН13/15.

На скоростном режиме, соответствующем номинальной мощности, это особенно явно видно на рисунке 5.11,*в*, где показано изменение массовой доли оксидов азота в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала при нагрузке 50 %. Здесь совершенно очевидны и уменьшение интенсивности образования оксидов азота и конфигурация зон протекания этого процесса

При оборотах 1250 мин^{-1} эффект положительного влияния охлаждения рециркулируемых газов на образование зон синтеза оксидов азота в надпоршневом пространстве менее заметен при нагрузке 25 % (рисунок 5.11,*д*), но совершенно очевиден при нагрузках 75 и 10 % (рисунки 5.11,*з* и 5.11,*е*).

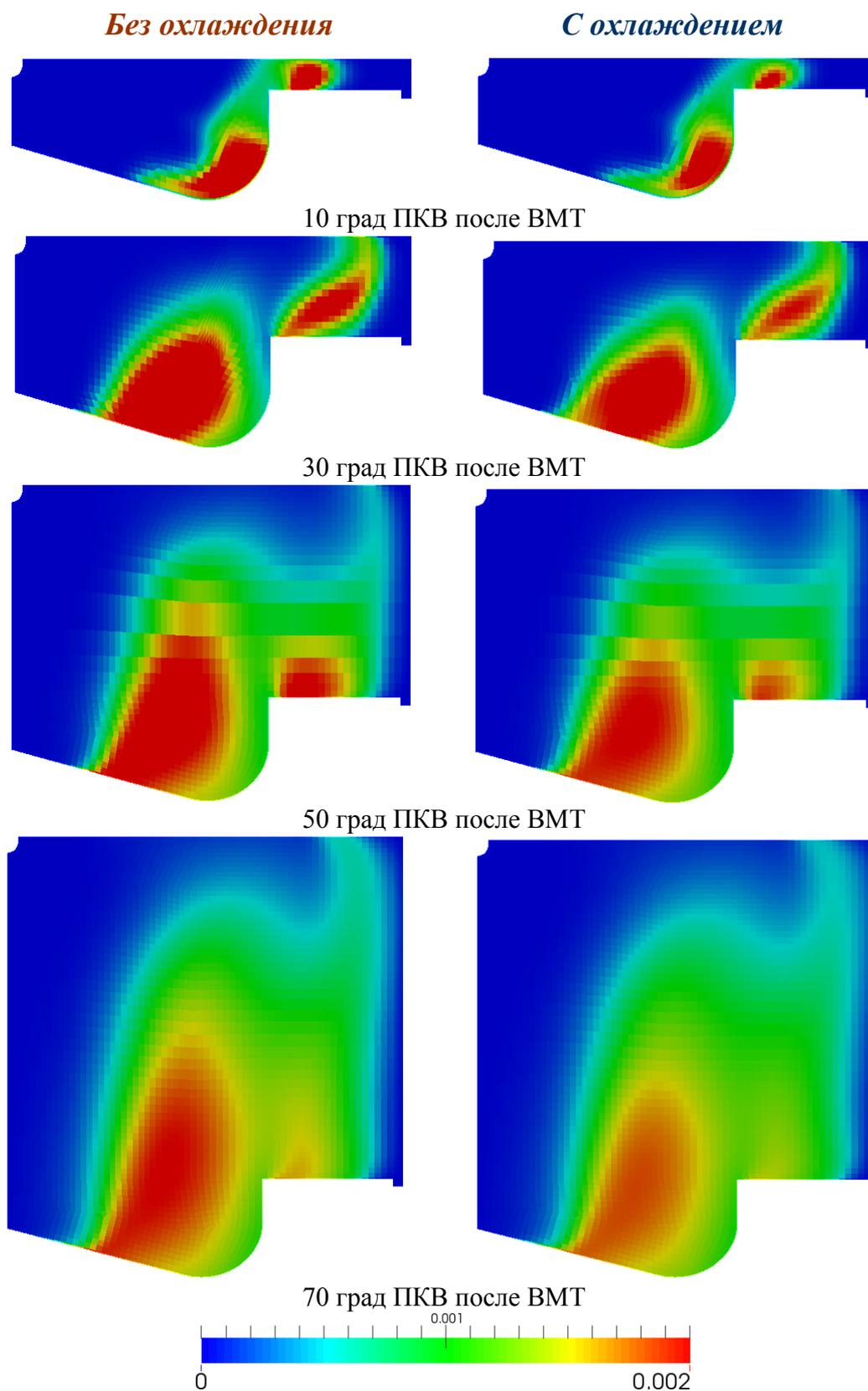


Рисунок 5.11,*a* – Динамика изменения массовой доли оксидов азота в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 100 %)

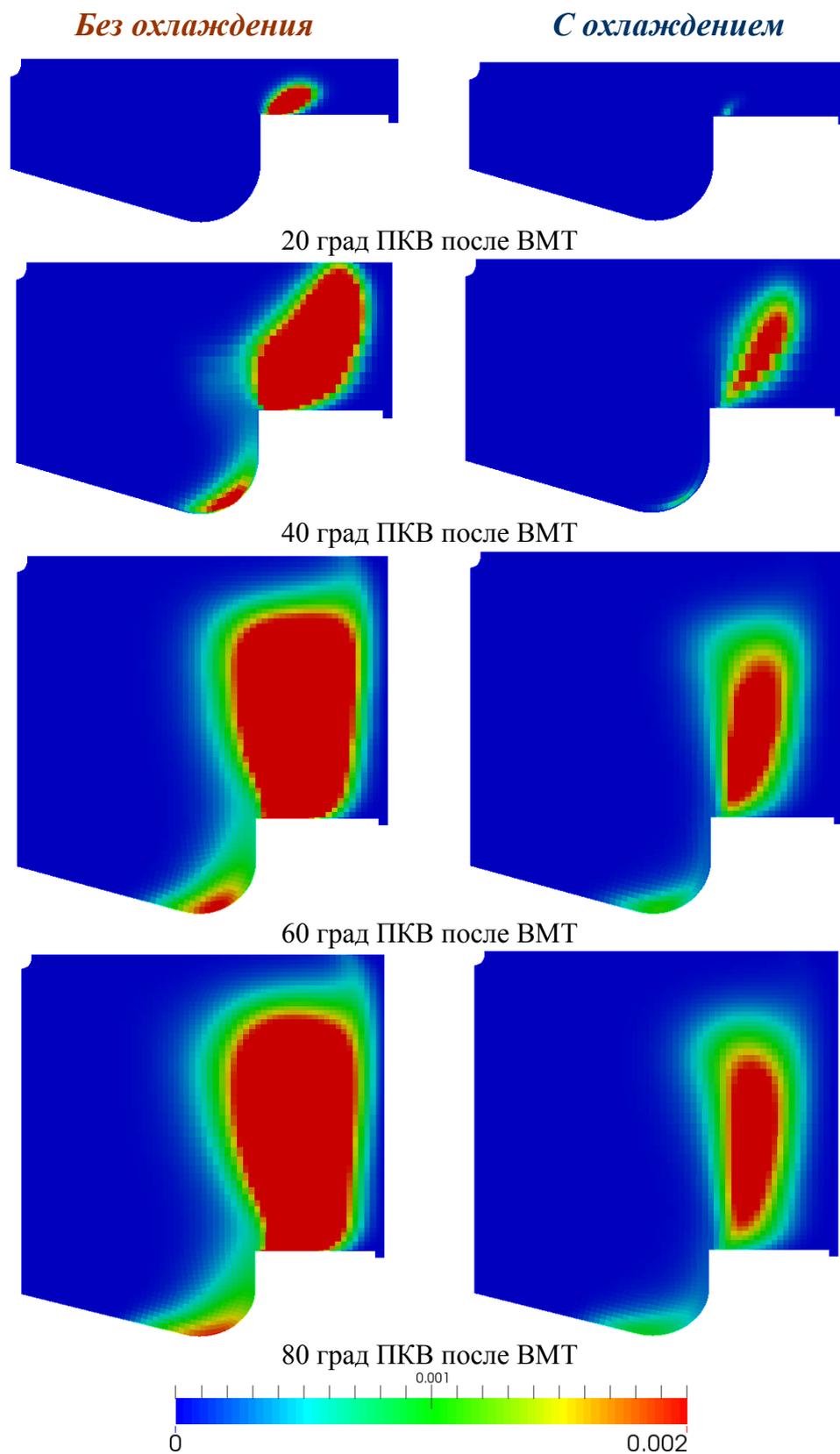


Рисунок 5.11,б – Динамика изменения массовой доли оксидов азота в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

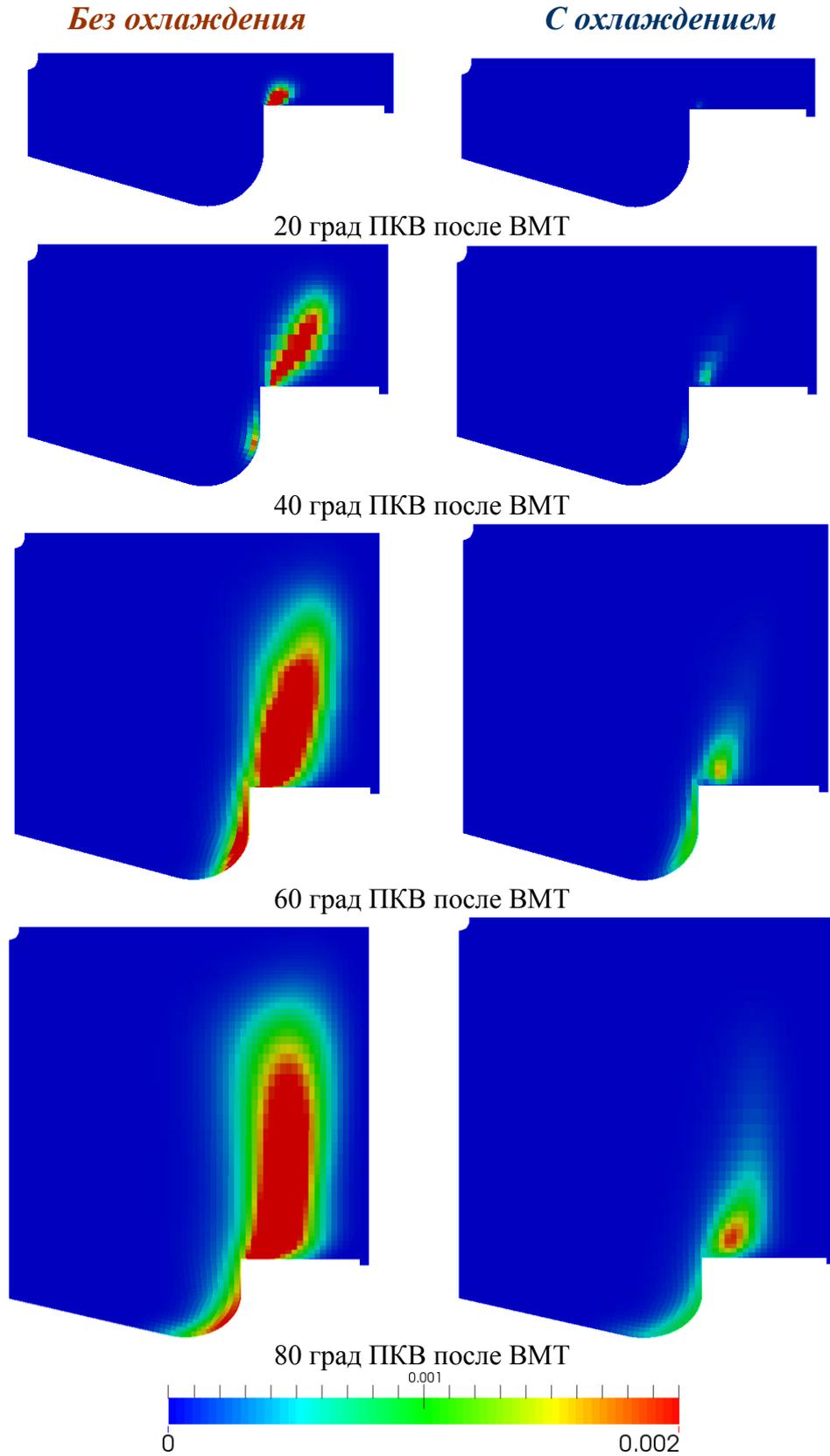


Рисунок 5.11,в – Динамика изменения массовой доли оксидов азота в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 50 %)

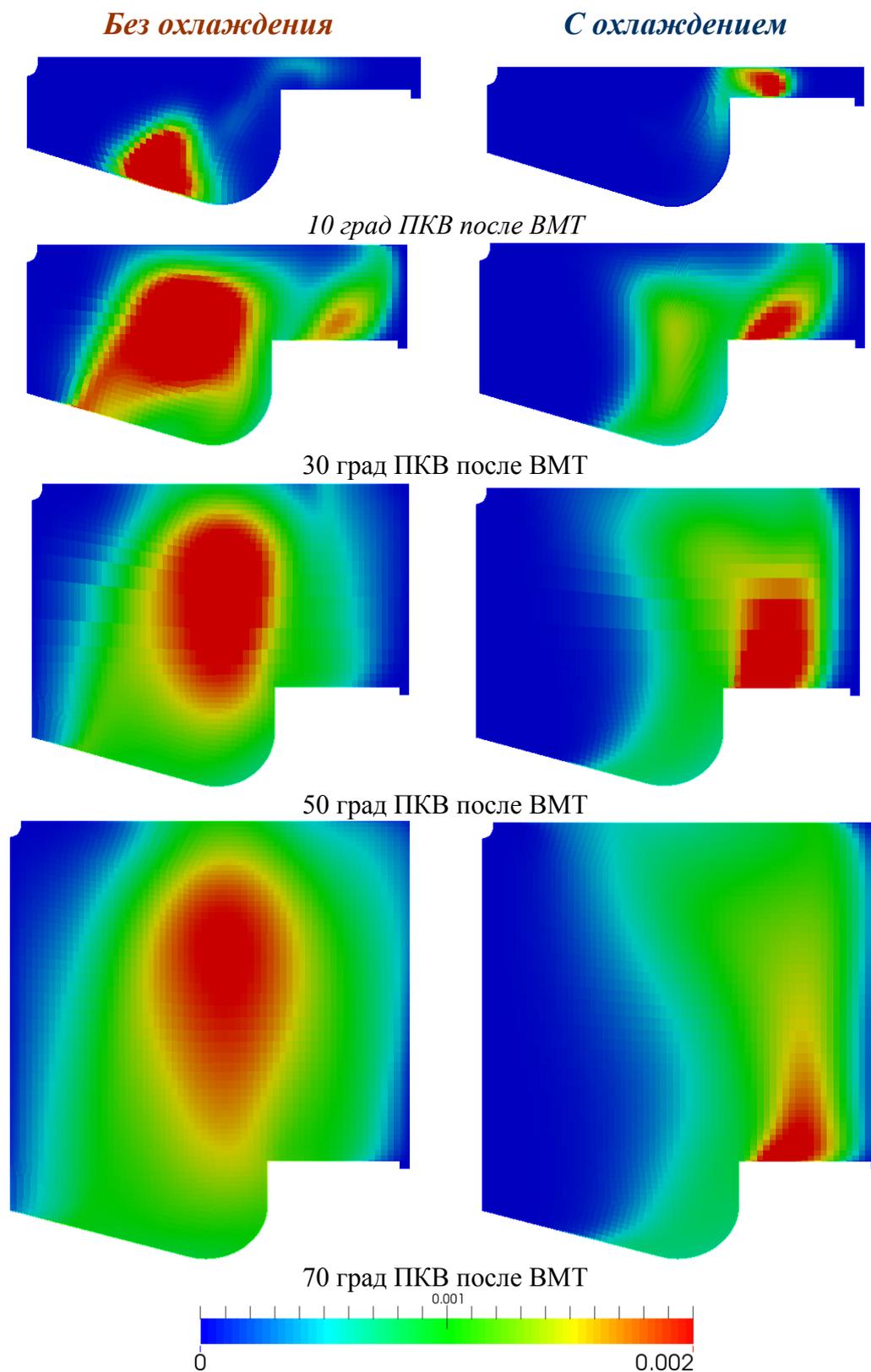


Рисунок 5.11,2– Динамика изменения массовой доли оксидов азота в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

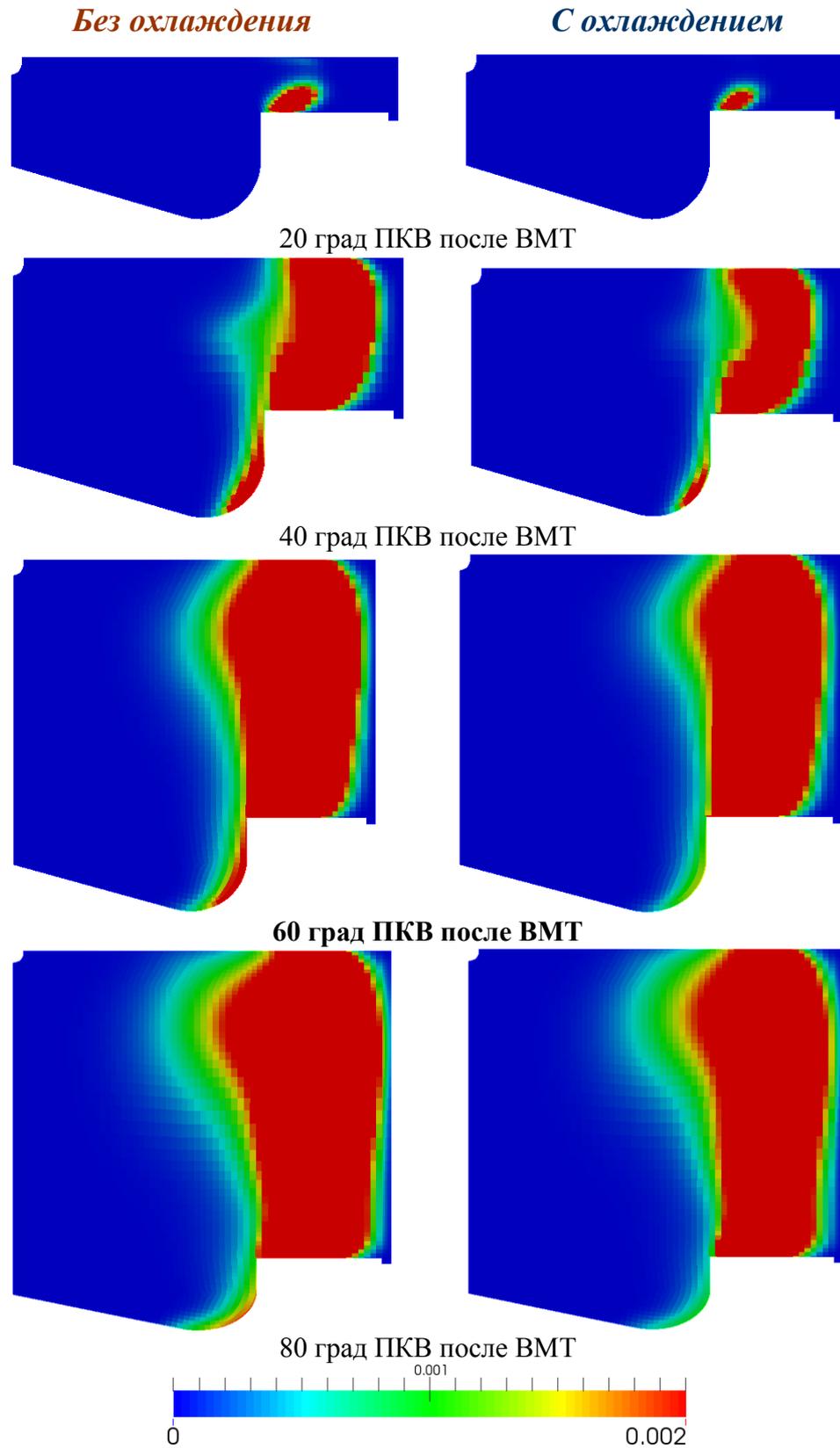


Рисунок 5.11,д – Динамика изменения массовой доли оксидов азота в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 25 %)

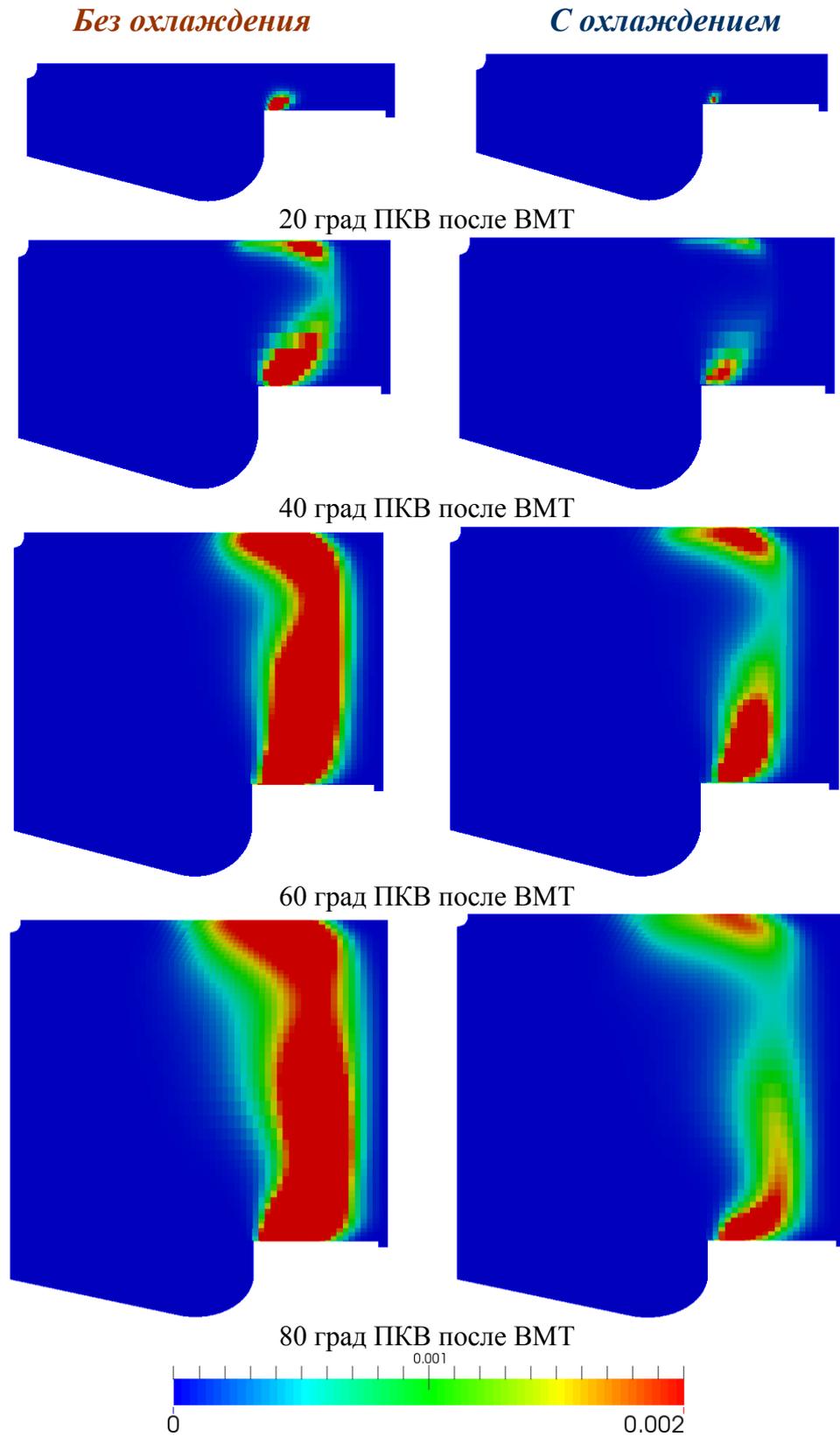


Рисунок 5.11,*e* – Динамика изменения массовой доли оксидов азота в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 10 %)

Рассматривая образование твердых частиц в продуктах сгорания, следует иметь в виду, что они включают нерастворимые (твердый углерод, оксиды металлов, диоксид кремния, сульфаты, нитраты, асфальты) и растворимые в органическом растворителе (смолы, фенолы, альдегиды, лак, нагар, тяжелые фракции, содержащиеся в топливе и масле) вещества. Твердые частицы в ОГ дизелей с наддувом состоят на 68–75 % из нерастворимых и на 25–32 % растворимых веществ.

Сажа (твердый углерод) является основным компонентом нерастворимых твердых частиц. Главной причиной образования сажи при диффузионном сгорании неоднородной смеси в цилиндре дизеля следует считать существование локальных физических условий для протекания реакций пиролиза топлива. То, что в исследуемом дизеле диффузионный механизм горения является доминирующим подтверждает рисунок 5.6, демонстрирующий скорость тепловыделения при работе на режиме 5 (см. таблицу 2.2) без охлаждения рециркулируемых газов. Из рисунка совершенно очевидно, что только в самом начале процесса тепловыделения очень слабо проявляется кинетический механизм, а доминирующим является диффузионный механизм горения.

Необходимым и достаточным условием образования в цилиндре дизеля сажи является наличие и взаимодействие в камере сгорания высокотемпературных (хорошо видных на рисунках 5.9,*a*–5.9,*e*) и переобогащенных топливом зон..

На первой стадии процесса в результате объемных гомофазных химических реакций образуется физический зародыш сажистой частицы. На второй стадии, в процессе взаимодействия зародышей с молекулами углеводородов, происходит поверхностный рост частиц. Для условий сгорания в дизеле наиболее вероятный механизм, посредством которого происходит образование сажи при диффузионном сгорании парообразной фазы углеводородного топлива, состоит из следующих этапов [8, 63]:

- Термическое разложение сложного углеводорода топлива на индивидуальные, более низкомолекулярные, углеводороды по радикально-цепному механизму.

- Термический и окислительный крекинг индивидуальных углеводородов с образованием, в результате неполного окисления, ацетилена в качестве основного сырьевого продукта последующих процессов образования сажи.

- Термическое взрывное разложение ацетилена с образованием углеводородных радикалов C_2H , C_4H_2 с последующим образованием кольцевых структур фенольного радикала C_6H_5 с различным содержанием атомов водорода. Указанные радикалы являются химическими зародышами будущих сажистых частиц.

- Образование физических зародышей сажистых частиц, обусловленное дальнейшим ростом числа атомов углерода в радикалах до 80–200 с образованием физической поверхности сажистой частицы размером 1,2–1,6 нм. Процесс начинается в гомофазной системе и заканчивается фазовым переходом с образованием твердой конденсированной фазы.

- Коагуляция первичных сажистых частиц, сопровождающаяся гетерогенным процессом поверхностного роста частиц до характерных размеров 10–30 нм. В процессе коагуляции под действием дисперсионных сил объединяется в одну частицу порядка 10^3 первичных сажистых частиц-кристаллитов. Химизм гетерогенного процесса роста частиц заключается в разложении молекул углеводородов и радикалов на поверхности сажистых частиц. При быстром охлаждении часть высокомолекулярных углеводородов не успевает пройти все стадии превращений и адсорбируется поверхностью сажистых частиц, что и определяет канцерогенную опасность сажи.

- После прекращения стадии поверхностного роста, в результате коалесценции сажистых частиц, возможен процесс образования разветвленных и неразветвленных цепей (агрегация или агломерация) размером 200 нм и более. Для процесса агрегации сажистых частиц потребное время составляет величину до 100 мс. Из-

за малых величин времени пребывания (1–10 мс) процессы агрегации сажистых частиц в цилиндре дизеля маловероятны.

- Наряду с процессами образования сажистых частиц идут также процессы их выгорания и сублимации.

Совместное влияние перечисленных факторов на процесс образования сажи в камере сгорания дизеля 4ЧН 13/15 привело к тому, что при охлаждении РГ в ВТ максимальное значение скорости образования сажи при работе двигателя на режиме № 5 (см. таблицу 3.1) уменьшилось на 46,98 (рисунок 5.12), а средняя скорость – на 17,03 %. При этом без охлаждения РГ максимальная скорость достигалась раньше – практически через 15 град ПКВ после ВМТ, а в случае их охлаждения – примерно на 10 град ПКВ позже.

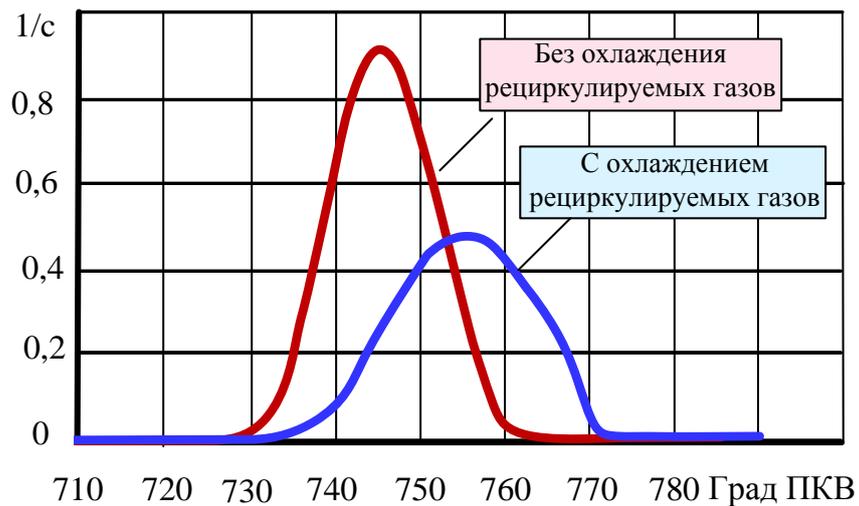


Рисунок 5.12 – Скорость образования сажи в камере сгорания ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %, доля рециркулируемых газов в свежем заряде 18 %); а – без охлаждения рециркулируемых газов; б – при охлаждении рециркулируемых газов на 60 К

Результаты визуализации расчета динамики изменения массовой доли сажи в надпоршневом пространстве в зависимости от угла ПКВ отражены на рисунках 5.13,а–5.13,е.

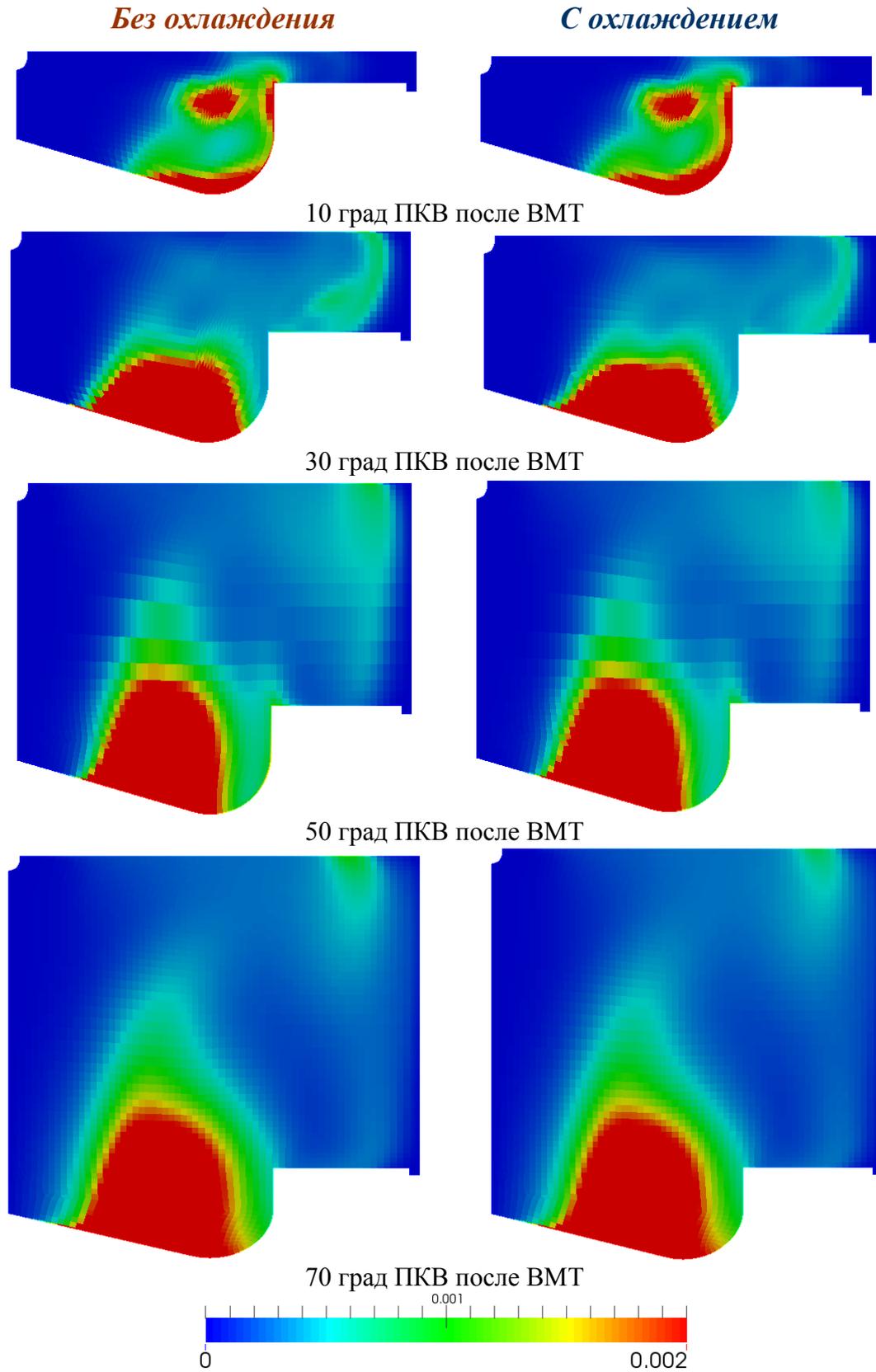


Рисунок 5.13,а – Динамика изменения массовой доли сажи в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 100 %)

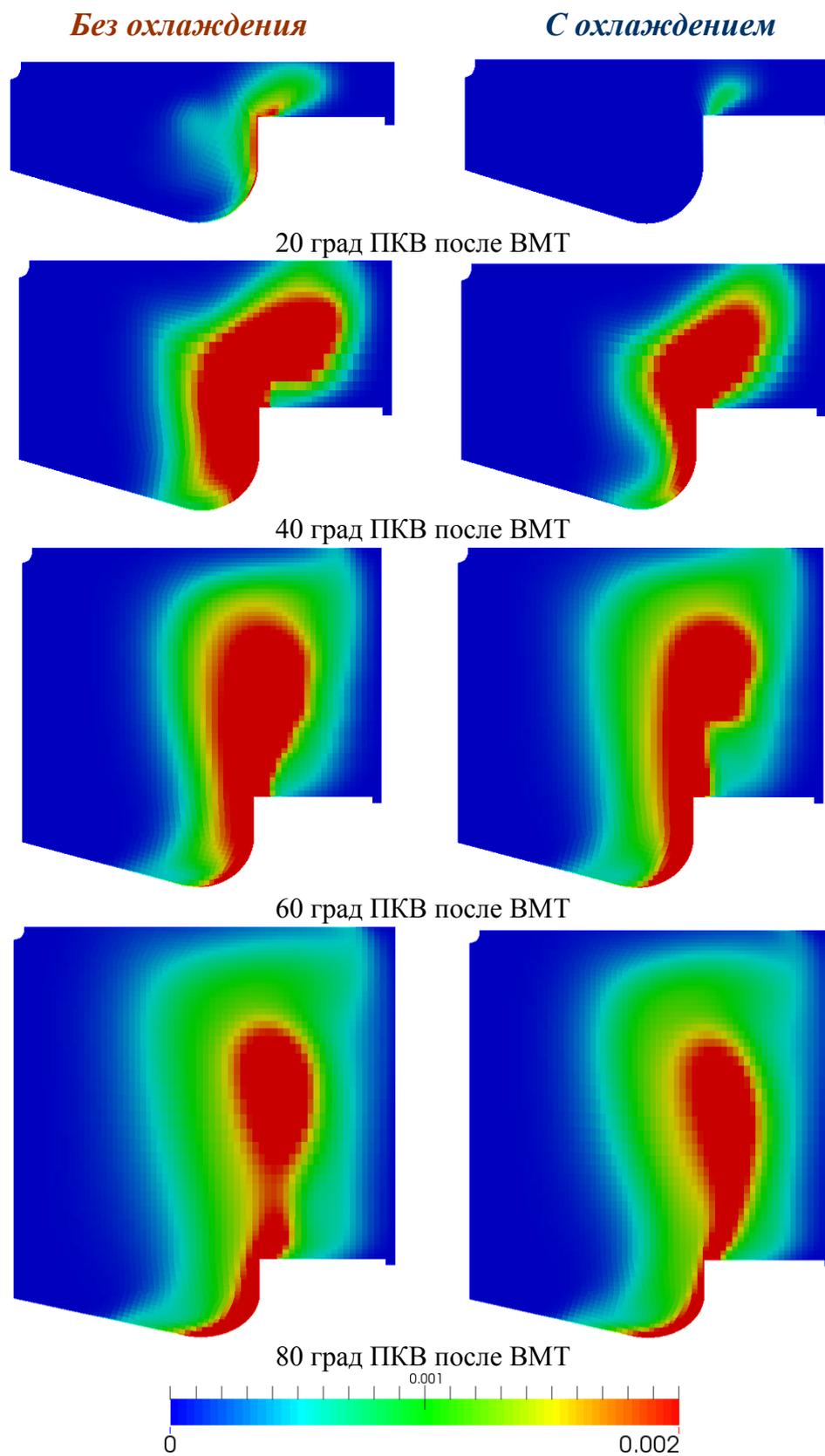


Рисунок 5.13,б – Динамика изменения массовой доли сажи в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

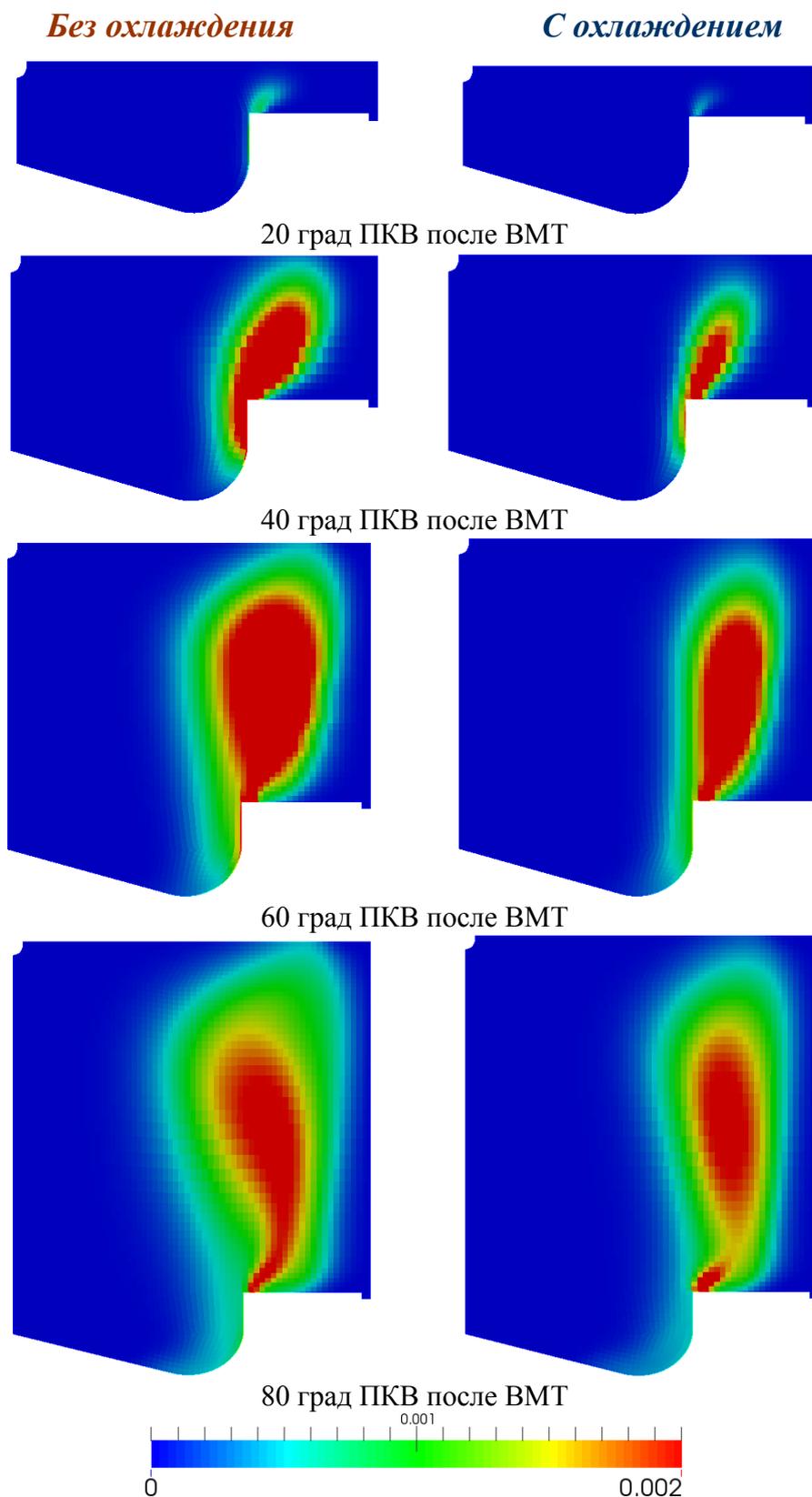


Рисунок 5.13,в – Динамика изменения массовой доли сажи в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1850 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 50 %)

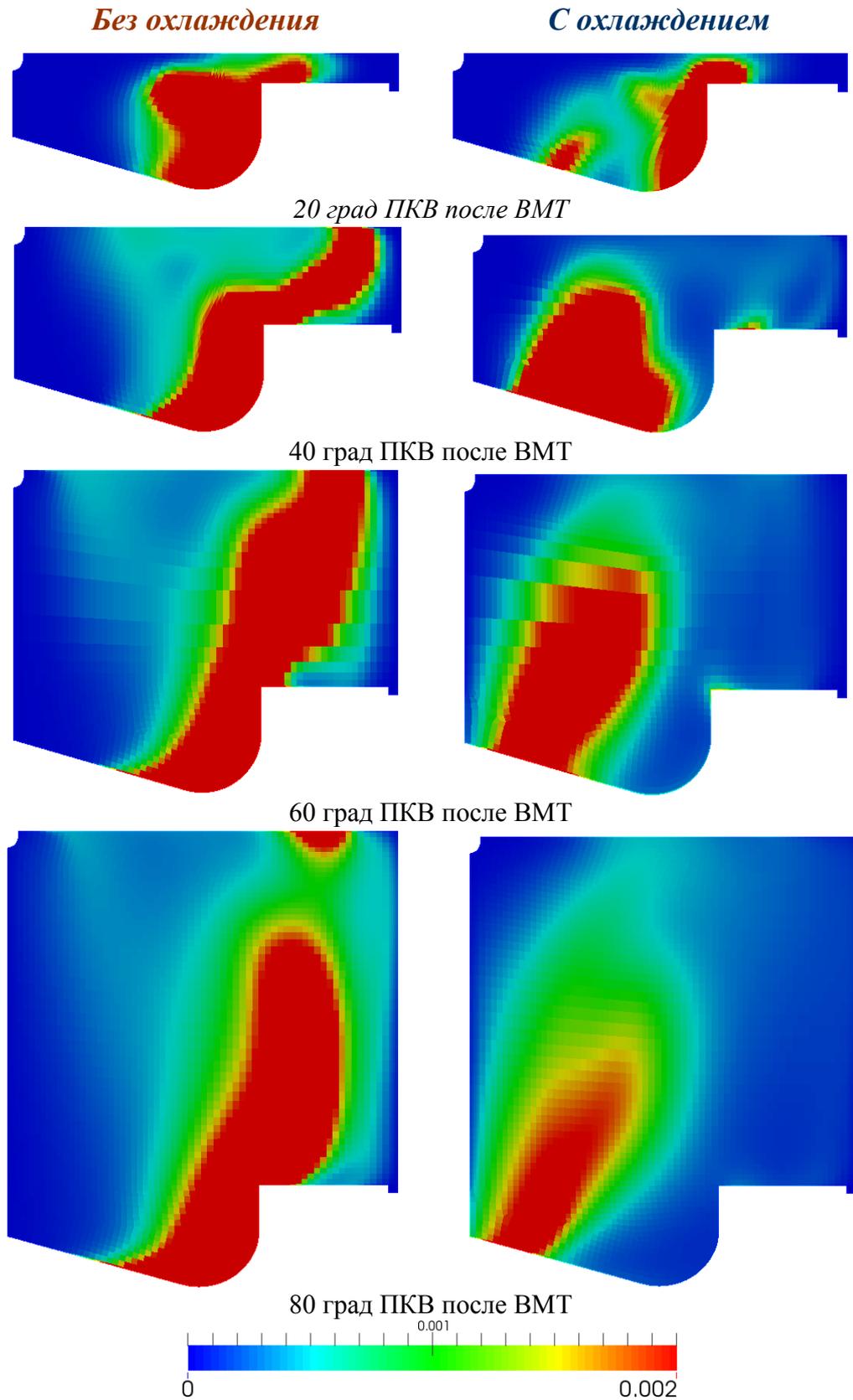


Рисунок 5.13,2 – Динамика изменения массовой доли сажи в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

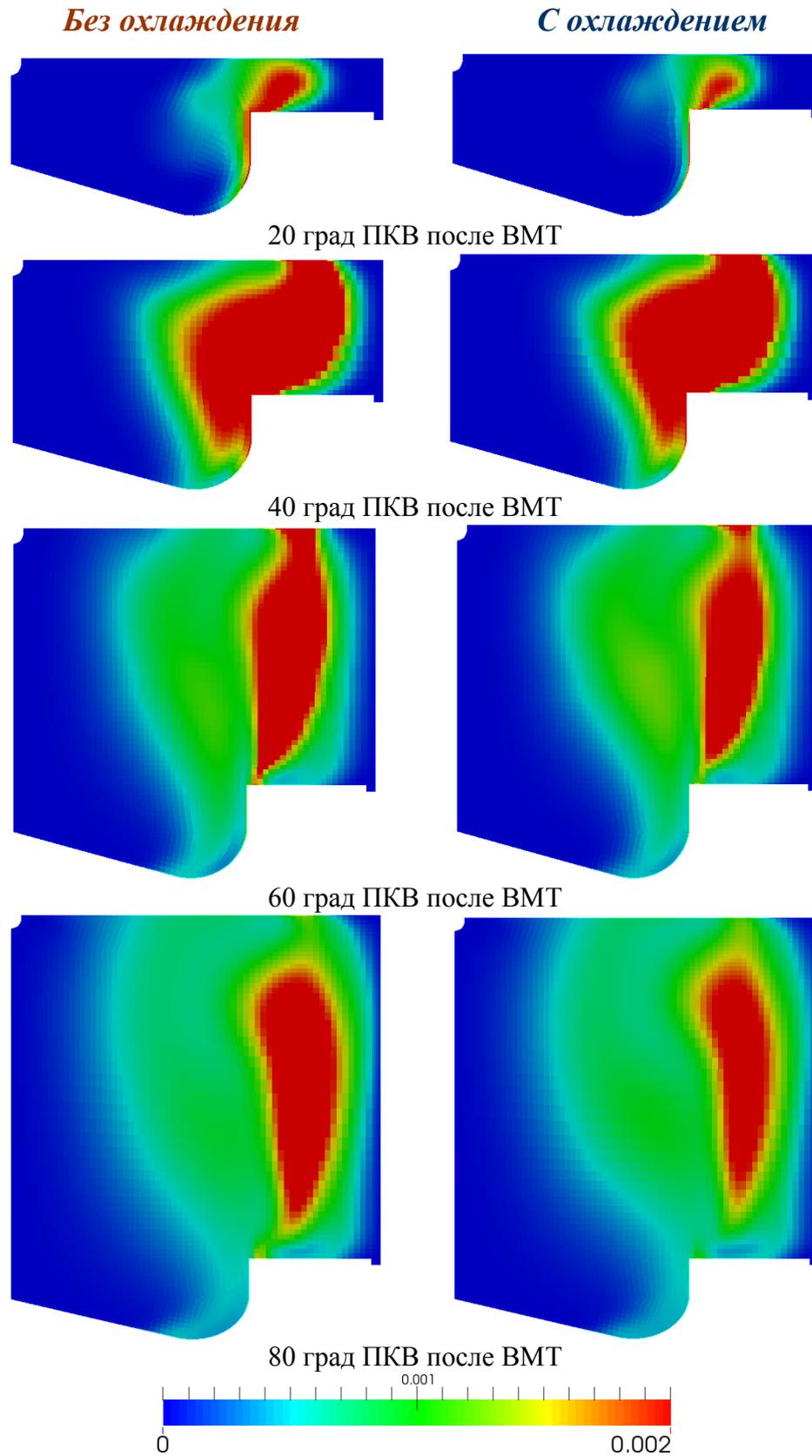


Рисунок 5.13,д – Динамика изменения массовой доли сажи в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 25 %)

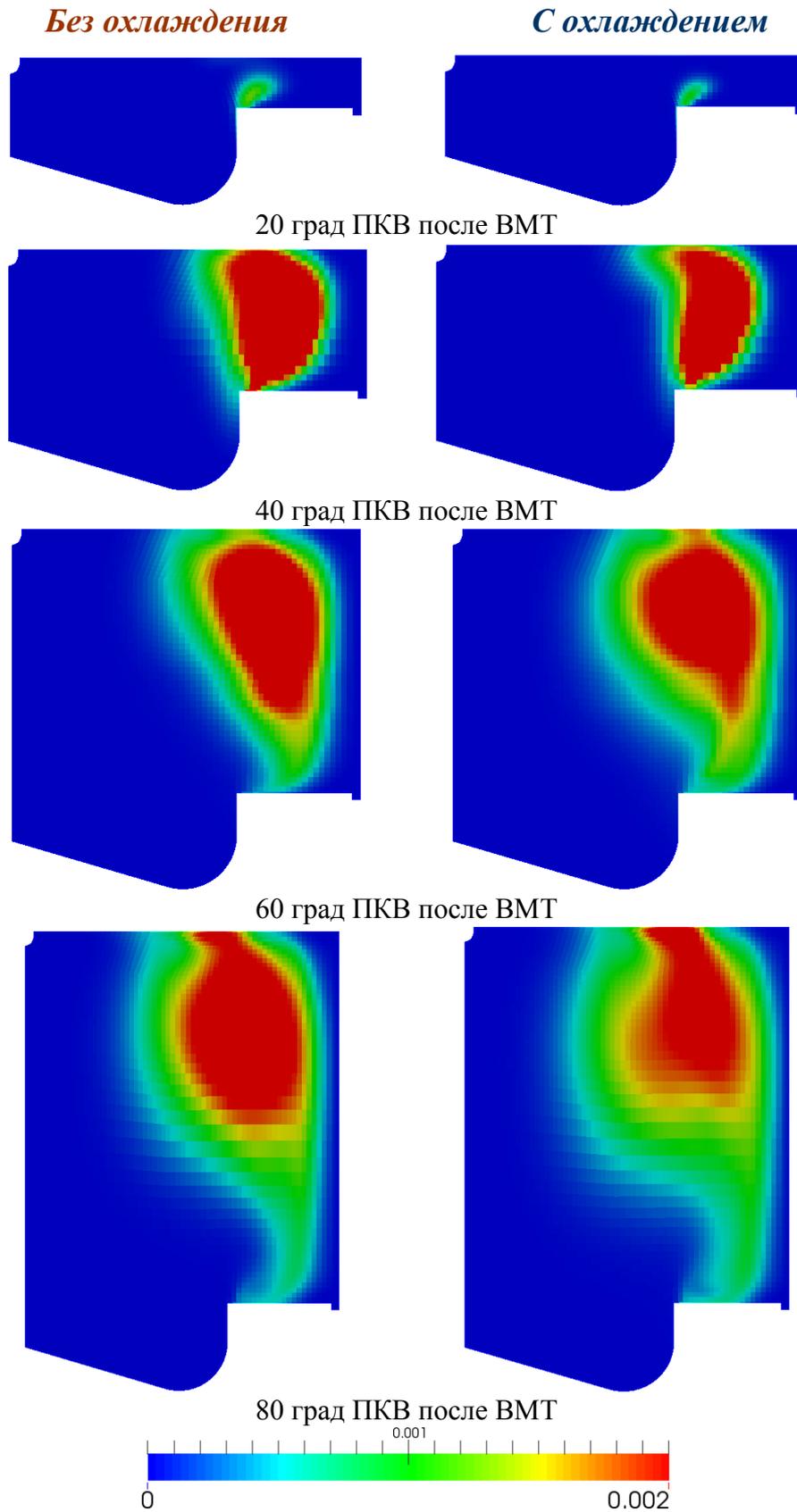


Рисунок 5.13, *e* – Динамика изменения массовой доли сажи в надпоршневом пространстве в зависимости от угла поворота коленчатого вала

($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 10 %)

Для получения уверенности в том, что представленные в настоящем разделе результаты, после проведения расчетов была выполнена оценка сходимости результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследований на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 (рисунок 5.14).

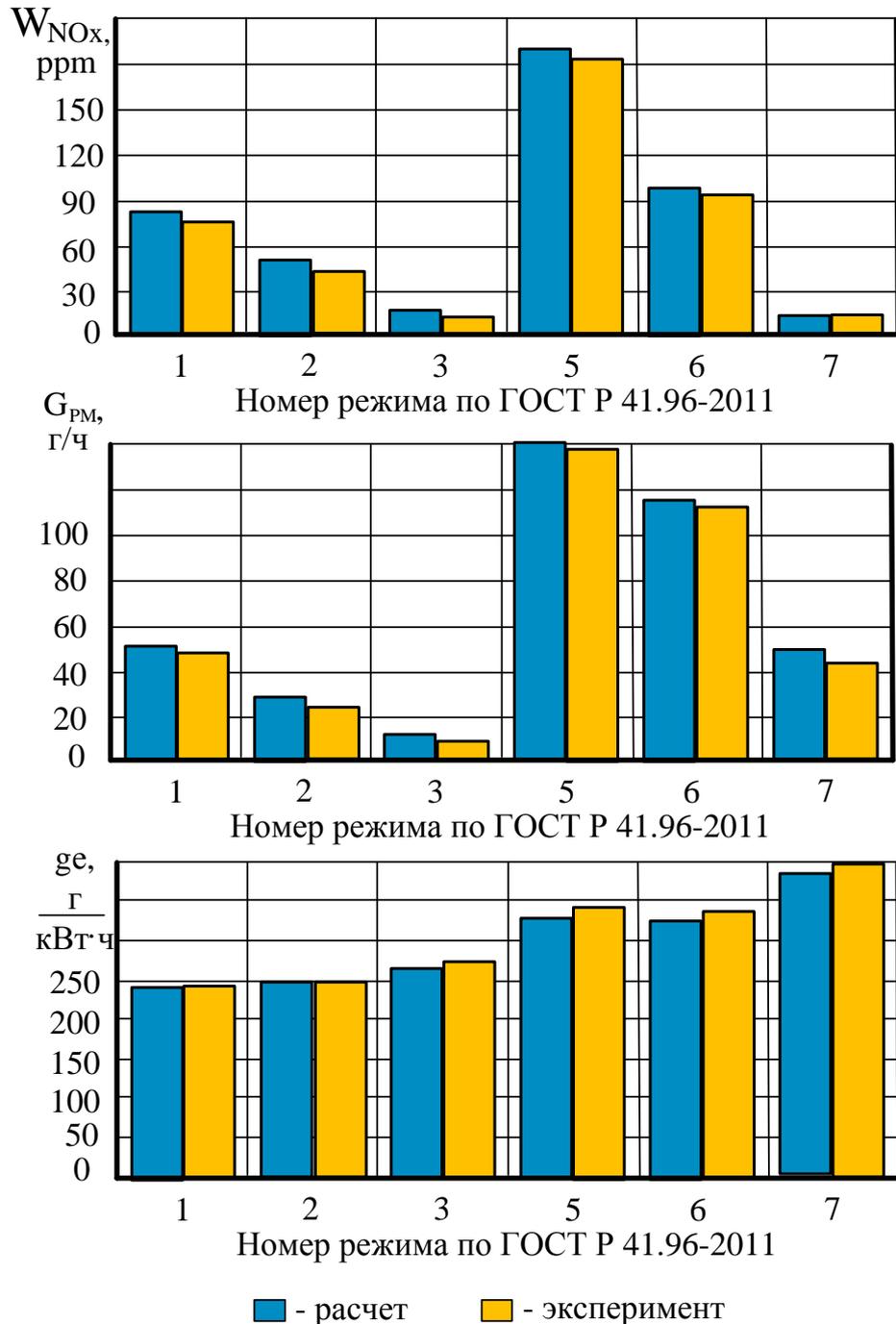


Рисунок 5.14 – Сходимость результатов расчетного и экспериментального исследований

(доля рециркулируемых газов – 18 % без их охлаждения)

Сравнение показало, что погрешность расчета составила:

- по концентрации NO_x : средняя – 7,2 %, максимальная – 19,2 %;
- концентрации твердых частиц: средняя – 5,6 %, максимальная – 22,7 %;
- удельного эффективного расхода топлива средняя – 4,7 %, максимальная – 9,6 %;

Приведенные цифры свидетельствуют о том, что результаты расчета с применение программного обеспечения AVL FIRE являются адекватными и могут использоваться при дальнейших исследованиях.

5.3. Выводы

1. На режиме, характерном для двигателей сельскохозяйственных и дорожно-строительных машин, каковым и является дизель 4ЧН13/15 ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %), при доле РГ 18 %:

- Охлаждение РГ на 60°C обеспечивает заметную разницу температуры свежего заряда на входе в цилиндр –11 К по сравнению с ситуацией без охлаждения. Максимальная температура газов в надпоршневом объеме при отсутствии охлаждения составляет 1885 К, а в случае охлаждения – 1819 К. Средняя температура рабочего тела в диапазоне изменения от 710 до 800 град ПКВ составила в первом варианте 1571 К, во втором – 1513 К.

- Более низкая температура свежего заряда в случае охлаждения РГ обеспечивает увеличение массовой доли кислорода в надпоршневом пространстве примерно на 30 % (при охлаждении РГ на 60°C), более быстрое сгорание топлива и, соответственно, более интенсивное и более полное тепловыделение.

2. В визуализированной форме представлена сравнительная картина изменения в камере сгорания дизеля 4ЧН13/15 при доле РГ 18 %: температуры рабочего тела, массовой доли оксидов азота и сажи в зависимости от угла поворота коленчатого вала при работе двигателя на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011

без охлаждения РГ и при их охлаждении на 60 К. Это позволило наглядно оценить изменение указанных показателей в надпоршневом пространстве.

3. Подтверждена адекватность результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследований на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 при доле РГ 18 %. Сравнение показало, что погрешность расчета составила: по концентрации NO_x : средняя – 7,2 %, максимальная – 19,2 %; по концентрации твердых частиц: средняя – 5,6 %, максимальная – 22,7 %; по удельному эффективному расходу топлива средняя – 4,7 %, максимальная – 9,6 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертации произведена оценка возможности повышения экологической безопасности ПДВС за счет использованием вихревой трубы в системе рециркуляции ОГ. При этом:

- была изготовлена оригинальная вихревая труба, позволяющая понижать температуру рециркулируемых газов максимально на 60 °С;

- создана экспериментальная установка для проведения стендовых испытаний дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией ОГ и их охлаждением с использованием вихревой трубы.

- проведено исследование выбросов вредных веществ с ОГ дизеля 4ЧН13/15, установленного на испытательном стенде, оборудованном системой рециркуляции ОГ и вихревой трубой для их охлаждения и регулирования температуры ОГ перед каталитическим нейтрализатором;

- получены регрессионные зависимости, позволяющие определять содержание оксидов азота и твердых частиц в ОГ в зависимости от: объемной доли рециркулируемых газов в свежем заряде; степени снижения их температуры в вихревой трубе; частоты вращения коленчатого вала и нагрузки на двигатель с вероятностью совпадения результатов расчета и эксперимента не менее чем в 95 % случаев;

- с помощью программного пакета FIRE фирмы AVL расчетным методом выполнены оценка особенностей рабочего процесса дизеля 4ЧН13/15 с рециркуляцией ОГ и их охлаждением, а также визуализация характера изменения температуры, массовой доли оксидов азота и сажи в надпоршневом пространстве в ходе процесса сгорания при работе двигателя на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 без охлаждения рециркулируемых газов и при их охлаждении на 60 °С, что позволило наглядно оценить изменение указанных показателей в процессе сгорания, произошедшие за счет охлаждения рециркулируемых газов в вихревой трубе;

- подтверждена адекватность результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследований.

При этом:

1. Установлено, что при доле рециркулируемых газов в свежем заряде 18 %:

А). На различных скоростных и нагрузочных режимах ГОСТ Р 41.96-2011:

- Снижение содержания оксидов азота за счет охлаждения рециркулируемых газов в вихревой трубе на 60 К составило от 5,1 до 18,0 % при частоте вращения коленчатого вала, соответствующей режиму номинальной мощности, и от 8,5 до 16,3 % при частоте вращения, соответствующей режиму максимального крутящего момента; твердых частиц – от 0,08 до 16,3 % и от 2,3 до 8,5 % соответственно.

- Снижение удельного эффективного расхода топлива за счет охлаждения РГ в на 60 К составило от 2,3 до 2,9 % при частоте вращения коленчатого вала, соответствующей режиму номинальной мощности, и от 2,0 до 4,2 % при частоте вращения, соответствующей режиму максимального крутящего момента.

Б). На режиме, характерном для двигателей транспортных и дорожно-строительных машин, каковым и является дизель 4ЧН13/15 (частота вращения коленчатого вала, соответствующая максимальному крутящему моменту, нагрузка 75 %):

- Охлаждение рециркулируемых газов на 60 К обеспечивает заметную разницу температуры свежего заряда на входе в цилиндр –11 К по сравнению с ситуацией без охлаждения. Максимальная температура газов в надпоршневом объеме при отсутствии охлаждения составляет 1885 К, а в случае охлаждения – 1819 К. Средняя температура рабочего тела в диапазоне изменения от 710 до 800 град ПКВ составила в первом варианте 1571 К, во втором – 1513 К.

- Более низкая температура свежего заряда в случае охлаждения рециркулируемых газов обеспечивает увеличение массовой доли кислорода в надпоршневом пространстве примерно на 30 % (при охлаждении рециркулируемых газов на 60 К), более быстрое сгорание топлива и, соответственно, более интенсивное и более полное тепловыделение.

2. Сравнение результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследований на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 при доле рециркулируемых газов 18 % в свежем заряде показало, что погрешность расчета составила: по концентрации NO_x : средняя – 7,2 %, максимальная – 19,2 %; по концентрации твердых частиц: средняя – 5,6 %, максимальная – 22,7 %; по удельному эффективному расходу топлива средняя – 4,7 %, максимальная – 9,6 %.

3. Регулирование температуры ОГ перед каталитическим нейтрализатором с помощью вихревой трубы обеспечило повышение интегральных степеней превращения токсичных компонентов на различных скоростных, нагрузочных режимах 50 и менее процентов и на режиме холостого хода (т.е. там, где нейтрализатор в обычных условиях работает крайне неэффективно) от 47 до 114 %

Полученные результаты исследования рекомендуется использовать при создании новых и модернизации существующих поршневых и комбинированных двигателей, при проведении НИР и ОКР в области двигателестроения, а также в учебном процессе.

Дальнейшее развитие настоящей работы предполагает разработку алгоритма и реализацию системы автоматического регулирования, обеспечивающей оптимальные количество и температуру рециркулируемых газов, а также температуру ОГ перед каталитическим нейтрализатором на различных скоростных и нагрузочных режимах работы двигателя, с позиции достижения максимально возможной его экологической безопасности.

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

<i>ВВ</i>	– вредные вещества;
<i>ВМТ</i>	– верхняя мертвая точка;
<i>ВТ</i>	– вихревая труба;
<i>ДВС</i>	– двигатель внутреннего сгорания;
<i>КН</i>	– каталитический нейтрализатор;
<i>КПД</i>	– коэффициент полезного действия;
<i>НМТ</i>	– нижняя мертвая точка;
<i>ОГ</i>	– отработавшие газы;
<i>ОНВ</i>	– охладитель наддувочного воздуха;
<i>ОРГ</i>	– охлаждение рециркулируемых газов
<i>ОС</i>	– окружающая среда;
<i>ПДВС</i>	– поршневой двигатель внутреннего сгорания;
<i>ПКВ</i>	– поворот коленчатого вала;
<i>РГ</i>	– рециркулируемые газы;
<i>РМ</i>	– твердые частицы;
<i>РОГ</i>	– рециркуляция отработавших газов;
<i>РТ</i>	– рабочее тело.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильный справочник: Перевод с англ. Первое русское издание - М.: Изд-во «За рулем», 2000. - 896с.
2. Автотранспортные потоки и окружающая среда / Под ред. В.Н. Луканина. - М.: ИНФРА, 1998. - 408 с.
3. Аксеенко, В.Д. Пути снижения степени отрицательного воздействия тракторной и другой мобильной сельскохозяйственной техники на окружающую среду: Обзор - М.: ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш / В.Д. Аксеенко, В.М. Свиридов, А.Н. Винокурова. - М., 1984. - Серия 1. - Вып.5 - 57с.
4. Альтмаш, Л.В. Снижение дымности и токсичности отработавших газов тракторного дизеля Д-240 / Л.В. Альтман, А.И. Крутов, А.М. Сайкин // Тракторы и сельхозмашины.- 1979. - №4. - С. 16-19.
5. Ахромешин, А.В. Применение системы рециркуляции отработавших газов в ДВС с управляемым процессом газообмена / А.В. Ахромешин // Известия ТулГУ. Технические науки. – Вып. 1.- 2010. - С. 235-239.
6. Баранов, Н.А. Исследование высокотемпературной сублимации и дисперсного состава дизельной сажи / Н.А. Баранов, В.И. Смайлис // Труды ЦНИДИ. - Л.: ЦНИДИ, 1980. - С.82-89.
7. Барсуков, С.И. Вихревой эффект Ранка / С.И. Барсуков, В.И. Кузнецов. - Иркутск: Иркутский ун-т, 1993 г. - 217 с.
8. Батулин, С.А. Физические основы и математическое моделирование процессов сажевыделения и теплового излучения: дис. ... докт. техн. наук, 05.04.02. - Л.:ЛПИ им. М.И. Калинина, 1982. - 435 с.
9. Белов, С.В. Снижение токсичности выбросов транспортно-энергетических установок: Учебное пособие / С.В. Белов, Л.Л. Морозова. - М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. - 1984. - 36с

10. Березин, Е.Ю. Системы нейтрализации отработавших газов для внутри-цехового транспорта / Е.Ю. Березин, С.П. Моисеев, Н.И. Павлов // Тракторы и двигатели. - Вып. 16. - М.:ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш, 1982. - С. 20-24.
11. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. - М.: Наука, 1965. - 474 с.
12. Бродянский, В.М., Мартынов /А.В. Зависимость эффекта Ранка-Хилша от температуры / В.М. Бродянский, А.В. Мартынов // Теплоэнергетика. - 1964. - № 4. – С. 76-78.
13. Бурячко, В.Р. Автомобильные двигатели: Рабочие циклы. Показатели и характеристики. Методы повышения эффективности энергопреобразования. / В.Р. Бурячко, А.В. Гук. - СПб.: НПИКЦ, 2005. - 292 с.
14. Буянов, Р.А. Закоксовывание и регенерация катализаторов дегидрирования при получении мономеров СК / Р.А. Буянов. - Новосибирск: Наука, 1968. - 64 с.
15. Вагнер, В.А. Снижение дымности дизелей / В.А. Вагнер, А.Л. Новоселов, А.С. Лоскутов / Под ред. А.Л. Новоселова. - Барнаул: Союз НИО, 1991. - 140 с.
16. Вихревой эффект и его применение в технике. Материалы VI Всесоюзной науч.-техн. конференции. Куйбышев: КуАИ, 1993. – 223 с.
17. Гарипов, М.Д. Рабочие процессы и конструирование двигателей, работающих на биотопливах / М.Д. Гарипов, Р.Д. Еникеев, Р.Ю. Сакулин. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2008. – 107 с.
18. Голиков, В.П.. Улучшение экологических и топливно-экономических показателей транспортного дизеля за счет применения рециркуляции отработавших газов и совершенствования рабочих процессов / В.П. Голиков: Дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02: Ярославль, 2004. - 170 с.
19. Голиков В.П. Применение рециркуляции отработавших газов в перспективных дизелях / В.П. Голиков // Вестник ЯГТУ. – Вып. 4. - Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2004. - С. 133-137.
20. Горбунов, В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. - М.: Изд-во РУДН, 1998. - 214 с.

21. Горячкин, А.В. Влияние содержания влаги в зоне горения на эмиссию оксидов азота и серы / А.В. Горячкин // Наукові праці Техногенна безпека. - 2004. - Вип. 18. - Т. 31. - С. 27-37.
22. ГОСТ 21339-82 Тахометры. Общие технические условия.
23. ГОСТ 22616-77. Трубы вихревые. Термины и определения.
24. ГОСТ 17.2.2.02-98 Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.
25. ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний.
26. ГОСТ Р 41.96-2011 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.
27. Григорович, А.Д. Новые катализаторы для нейтрализации отработавших газов автотранспорта. / А.Д. Григорович. - Киев: Б.И., 1982. - 60 с.
28. Григорьева, Т.Ю. Оценка ущерба, наносимого вредными выбросами с отработавшими газами дизелей / Т.Ю. Григорьева, Е.М. Артеменко, Е.И. Кибяков // Повышение экологической безопасности автотракторной техники. - Барнаул, 2001. - С. 124-138.
29. Гусаров, А.П. Оксиды азота - основная забота разработчиков АТС / А.П. Гусаров // «Автомобильная промышленность». - 1992. - № 8. - С. 13-15.
30. Гуцол, А.Ф. Эффект Ранка / А.Ф. Гуцол // Успехи физических наук, 1997г. - Т. 167. - №6. - С. 665-687.
31. Двигатели внутреннего сгорания. 1 кн. Теория рабочих процессов: учеб. для вузов / Под. ред. В.Н. Луканина. - М.: Высш. шк., 2005. - 479 с.
32. Демочка, О.И. Пути снижения токсичности отработавших газов автотракторных двигателей: Обзор / О.И. Демочка, В.Н. Ложкин. - М.: ЦНИИТЭИТ-тракторсельхозмаш. - 1984. - Сер. 1. - Вып. 13. - 53 с.

33. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Н.Джонсон, Ф. Лион. - М.: Мир, 1981. - 520 с.
34. Евдокимов, Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колеников, А.И. Тетерин. - М.: Наука, 1980. - 228 с
35. Жегалин, О.И. Каталитические нейтрализаторы транспортных двигателей / О.И. Жегалин [и др.] - М.: Транспорт, 1979. - 80 с.
36. Жегалин, О.И. Разработка каталитических нейтрализаторов для очистки отработавших газов дизельных двигателей / О.И. Жегалин, Н.А. Китросский, С.П. Моисеев // Снижение токсичности ДВС: Докл. уч. симпозиума. - М.: МТ и СХМ, 1981. - С. 241-249.
37. Жегалин, О.И. Снижение токсичности автомобильных двигателей / О.И. Жегалин, П.Д. Луначев. - М.: Транспорт, 1985. - 120 с.
38. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романников. - М.: Атомиздат, 1978. - 232 с.
39. Заявка на полезную модель. Устройство для снижения вредных выбросов с отработавшими газами поршневого двигателя внутреннего сгорания / В.С. Кукис [и др.], Справка о приоритете 2015115364 от. 23.04.15
40. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов - М.: Машиностроение, 1973. - 200 с.
41. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г Зедгинидзе. - М.: Наука, 1976. - 390 с.
42. Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. - М.: Изд-во АН СССР, 1947. - 147 с.
43. Изаков, Ф.Я. Планирование эксперимента и обработка опытных даны: Учебное пособие для магистрантов и аспирантов / Ф.Я. Изаков. Изд-во ЧГАУ, Челябинск, 1997. - 128 с.

44. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов / Р.З. Кавтарадзе. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - 720 с.

45. Кирпиченков, С.В. Регулируемая рециркуляция отработавших газов системе комплексного снижения токсичных выбросов среднеоборотного дизеля речного судна / С.В. Кирпиченков: Дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 : М., 2002. - 152 с.

46. Кирсанов, К.А. Охрана окружающей среды за счет использования нового способа приготовления водотопливных эмульсий / К.А. Кирсанов, В.П. Родионов // Труды Седьмого Международного научного симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск, 2003. - С. 735-736.

47. Климов, В.И. Повышение технико-экономических показателей и снижение токсичности отработавших газов карбюраторного двухтактного двигателя / В.И. Климов, П.А. Сидоров // Труды II конференции по вихревому эффекту. - КУАИ, Куйбышев, 1976 - С. 20- 23.

48. Костин, А.К. Эксплуатационные режимы транспортных дизелей / А.К. Костин, Е.Б. Еркембаев. - Алма-Ата: Наука, 1988. - 192 с.

49. Кузнецов, В.И. Теория и расчет эффекта Ранка / В.А. Кузнецов. Омск: ОмГТУ, 1995. - 217 с.

50. Кукис, В.С. Использование вихревой трубы Ранка-Хилша для улучшения экономических и экологических показателей комбинированных двигателей внутреннего сгорания / В.С. Кукис, А.А. Малоземов, В.А. Романов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. - Вып. 1. - Новосибирск : ФГОУ ВПО «НГавт». - 2013, С. 216-218.

51. Кукис, В.С. Использование вихревых труб в поршневых двигателях внутреннего сгорания / В.С. Кукис, В.А. Романов, Д.В. Шабалин, Е.А. Омельченко. СПб.: Изд-во ВА МТО. – 215 с.

52. Кукис, В.С. Новые пути повышения экологической безопасности дизелей / В.С. Кукис, В.А. Романов, Е.А. Омельченко. - Saarbucher: Palmarium Academic publishing, 2015. – 155 с.

53. Кукис, В.С. Оптимизации параметров вихревой трубы методом динамики частиц / В.С. Кукис, Д.В. Шабалин, Е.А. Омельченко // Вестник академии военных наук. № 4 (53). – 2015. – С. 113-118.

54. Кукис, В.С. Повышение эффективности поршневых тепловых двигателей за счет использования вихревых труб / В.С. Кукис, В.А. Романов, А.А. Малоземов, М.И. Куколев, В.С. Дворцов, С.Н. Вильдяева // Материалы за VIII международна научна практична конференция, «Научният потенциал на света - 2012. (17-25 септември 2012). Том 17. София «БялГРАД-БГ», 2012. - С. 23-37.

55. Кукис, В.С. Результаты использования вихревой трубы в системе рециркуляции отработавших газов дизеля трубы / В.С. Кукис, Е.А. Омельченко, Д.В. Романов // X международной научно-практической конференции «Научные перспективы XXI века. достижения и перспективы нового столетия». - Ч. 4. - № 3 (10) Технические науки: - Новосибирск, 2015. - С. 90-95.

56. Кукис, В.С. Физико-математическая модель вихревых труб для регулирования температуры наддувочного воздуха / В.С. Кукис, Д.В. Шабалин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. - Вып. 1. - Новосибирск : ФГБОУ ВО «СГУВТ». - 2015. - С. 129-133.

57. Кулешов, А.С. Особенности и закономерности образования сажи, окислов азота и углерода в дизелях // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: Тезисы докладов V науч.-практ. сем. / А.С. Кулешов, Н.Ф. Разлейцев, А.А. Прохоренко. - Владимир: Изд-во ВПИ, 1995. - С.71-72.

58. Кульчицкий, А.Р. Водотопливные эмульсии для дизелей / А.Р. Кульчицкий, Б.Ю. Голев, А.М. Аттия // Research papers of Lithuanian University of Agriculture. - 2010. - Vol. 42.- No. 2-3. - P. 127-140.

59. Кульчицкий, А.Р. Водотопливные эмульсии для дизелей / А.Р. Кульчицкий, Б.Ю. Голев, А.М.А. Аттия // Мир транспорта. - 2011. - № 3(36). - С. 50-58.

60. Кульчицкий, А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей / А.Р. Кульчицкий. - Владимир: Изд-во Владимирского государственного ун-та, 2000. - 256 с.

61. Лазарев, Е.А. Основные принципы, методы и эффективность средств совершенствования процесса сгорания топлива для повышения технического уровня тракторных дизелей. Учебное пособие / Е.А. Лазарев. - Челябинск: ЧГТУ, 1995. - 215 с.
62. Ложкин, В.Н. Загрязнение атмосферы автомобильным транспортом: справ.-метод. и уч. пособие / В.Н. Ложкин. - СПб.: НПК «Атмосфера» при ГГО им. А.И. Воейкова, 2002. - 296 с.
63. Ложкин, В.Н. Структурная модель и численная аппроксимация кинетических процессов образования бенз-а-пирена в дизеле/ В.Н. Ложкин, Т.Ю. Салова // Сб. научн. трудов ЦНИТА. - Л., 1989. - С. 250-259.
64. Любимов, Д.В. Теоретическая модель эффекта Ранка-Хилша / Д.В. Любимов, Е.Л. Тарунин, Ю.А. Ямишнина - Пермь: Пермский университет/научный журнал «Математика». - 1994. - № 1. - С. 162-177.
65. Майков, В.П. Новый подход к объяснению эффекта Ранка / В.П. Майков, К.Х. Некофар // Сб.тр. науч.-техн. форума с междунар. участием «Высокие технологии 2004». Ч. 2.- Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2004. - Кн. 2. - С. 74-80.
66. Малозёмов, А.А. Разработка методов и технических решений по улучшению экологических параметров транспортных дизелей / А.А. Малозёмов [и др.]. Отчет о НИОКР. - Челябинск: ООО «ФУМНПЦ», 2006. - 83 с.
67. Марков, В.А. Рециркуляция отработавших газов в двигателях с воспламенением от сжатия / В.А. Марков, В.Г. Камалтдинов, С.А. Хрипунов // Грузовик &. - 2011. - № 6. - С. 14-25.
68. Марков, В.А. Сравнительная эффективность методов снижения токсичности отработавших газов дизелей / В.А. Марков // Автомобильная промышленность. - 2002. - № 12. - С. 19-23.
69. Марков, В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 132 с.

70. Марков, В.А. Управление рециркуляцией отработавших газов в транспортных дизелях / В. А. Марков, С. А. Хрипунов, В. Г. Камалтдинов // Автотранспорт: эксплуатация, обслуживание, ремонт. - 2012. - № 5. - С. 10-18.
71. Марков, В.А. Экологические показатели ДВС / В.А. Марков, С.А. Аникин, Е.А. Сиротин // Автомобильная промышленность. -2002. - № 2. - С. 13-15.
72. Марченко, А.В. Проблемы экологизации двигателей внутреннего сгорания / А.В. Марченко, И.В. Парсаданов // Двигатели внутреннего сгорания. - 2009. - № 2. - С. 3-8.
73. Матиевский, Д.Д. Рабочие процессы в ДВС: Учебное пособие / Д.Д. Матиевский. - Барнаул: АлтПИ, 1983. - 84 с.
74. Матиевский, Д.Д. Снижение токсичности дизеля организацией перепуска отработавших газов охлаждаемых водой, водными растворами спиртов и аммиака / Д.Д. Матиевский, М.А. Челядников // Двигателестроение. - №7. - 1985. - С. 3-6.
75. Мельберт, А.А. Основные направления снижения дымности и токсичности отработавших газов дизелей / А.А. Мельберт [и др.] // Дымность дизелей: Сб. статей. Барнаул, 2005. - С. 4-9.
76. Мельберт, А.А. Повышение экологической безопасности поршневых двигателей / А.А. Мельберт. - Новосибирск: Наука, 2003. - 170 с.
77. Мельберт. А.А. Системы каталитической очистки отработавших газов поршневых двигателей/ А.А. Мельберт. АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - Барнаул. - 2003. - 24 с. Деп. в ВИНТИ.
78. Меркулов, А.П. Вихревой эффект и его применение в технике / А.П. Меркулов. – М.: Машиностроение, 1969. – 183 с
79. Мироненко, И. Г Особенности эксплуатации судовых дизелей на водото1шивной эмульсии / Новосибирск Наука, 2005. - 103с.
80. Мироненко, И. Г. Исследование работы высокооборотного дизеля на водотопливной эмульсии дизельного топлива / И.Г. Мироненко // Повышение уровня технической эксплуатации судовых дизелей. Сб науч. тр. Новосиб. ин-та инж. водного транспорта. – 1987. - С 42-48.

81. Мироненко, И.Г. Водотопливные эмульсии - действенное средство совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / И.Г. Мироненко // Речной транспорт (XXI век) - 2005 - № 5. – С. 57-59.

82. Некрасов, В. Г. Экологически чистый и экономичный автомобильный двигатель / В.Г. Некрасов. - Алматы, 2005. - 327 с.

83. Новиков, Л.А. Современные и перспективные технологии для организации малотоксичной работы двигателей / Л.А. Новиков // Двигателестроение. - № 1. - 2004. - С. 7-15.

84. Новоселов, А.Л. Основы инженерной экологии в двигателестроении: Учебное пособие / А.Л. Новоселов, А.А. Мельберт, С.Л. Беседин / Под ред. А.Л. Новоселова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1993. - 98 с.

85. Новоселов, А.Л. Системный подход в решении проблемы снижения вредных выбросов ДВС / А.Л. Новоселов, А.А. Мельберт // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сб. статей / Под ред. А.Л. Новоселова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1998. - С. 99-102.

86. Новоселов, А.Л. Снижение токсичности автотракторных дизелей: Учебное пособие / А.Л. Новоселов [и др.] / Под ред. А.Л. Новоселов. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1996. - 122 с.

87. Новоселов, А.Л. Совершенствование очистки отработавших газов дизелей на основе СВС-материалов / А.Л. Новоселов, В.И. Пролубников, Н.П. Тубалов. - Новосибирск: Наука, 2002. - 96 с.

88. Новоселов, А.Л. Современное состояние проблемы снижения токсичности и дымности ДВС / А.Л. Новоселов, А.А. Мельберт, Л.А. Ковалева: В кн.: Качество - стратегия XXI века. - Томск: Изд-во НТЛ, 1996. - С. 136-138.

89. Новоселов, А.Л. Улучшение экологических показателей дизелей за счет совершенствования рабочих процессов / А.Л. Новоселов, В.Ю. Русаков, А.А. Мельберт // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: Сб. статей. - Ч. 2. - Академия транспорта РФ - АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - Барнаул, 1999. - С. 68 - 72.

90. Новоселов, А.Л., Тенденции развития конструкции фильтров для очистки отработавших газов дизелей от твердых частиц / А.Л. Новоселов, А.Г. Кашкаров, А.А. Мельберг // Исследование и совершенствование быстроходных дизелей: Межвуз. сб. научн. тр.у. АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1997. - С. 31-38.

91. Омельченко, Е.А. Влияние рециркуляции и нейтрализации отработавших газов на экологические показатели ДВС / Е.А. Омельченко, М.П. Грабец, Д.В. Романов // Вестник Сибирского отделения академии военных наук. - 2015. - № 30. - С. 133-137.

92. Омельченко, Е.А. Методы и средства снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей / Е.А. Омельченко // Межкафедральный сборник научных и методических трудов. - Вып. 4. - Омск: Омский научно-образовательный комплекс, 2014. С. 30-36.

93. Охрана окружающей среды: модели социально-экономического прогноза / Д.П. Ананиашвили [и др.] - М.: Экономика, 1982. - 224 с.

94. Павлова, Е.И. Экология транспорта: Учебник для ВУЗов / Е.И. Павлова. - М.: Транспорт, 2000. - 248 с.

95. Парсаданов, И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия / И.В. Парсаданов. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. - 244 с.

96. Пат. на полезную модель РФ 124321. Поршневой двигатель внутреннего сгорания с рециркуляцией отработавших газов / В.С. Кукис [и др.], опубл. 20.01.2013. Бюл. № 2.

97. Пат. на полезную модель РФ 143995. Система выпуска отработавших газов поршневого двигателя внутреннего сгорания / В.С. Кукис [и др.], опубл. 27.11.2013. Бюл. № 33.

98. Пат. РФ 2478820. Устройство для охлаждения рециркулирующих газов двигателей внутреннего сгорания / З. Кордос, Э. Седерберг, Р. Дюбдаль, опубл. 10.04.2013.

99. Поликер, Б.Е. О повышении экономичности и снижении токсичности отработавших газов дизелей / Б.Е. Поликер, Л.Л. Михальский // Грузовик. - № 10. - 1997. - С. 29-31.

100. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.05.2003 № 114 (ред. от 03.11.2005) «О введении в действие ГН 2.1.6.1338-03» (вместе с «Гигиеническими нормативами «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. ГН 2.1.6.1338-03», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21.05.2003) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 11.06.2003 № 4679).

101. Промышленно-транспортная экология: учеб. для вузов / В.Н. Луканин [и др.] / Под ред. В.Н. Луканина. - М.: Высш. шк., 2003. - 273 с.

102. Разлейцев, Н.Ф. Исследование процесса образования вредных веществ в дизелях / Н.Ф. Разлейцев, И.В. Парсаданов, А.А. Прохоренко // Улучшение эксплуатационных качеств тепловых двигателей: Сб. науч. тр. - ТГАТА. - 1995. - С. 21-22.

103. Реймерс, Н.Ф. Экология: теория, законы, правила, принципы и гипотезы / Н.Ф. Реймерс. - М.: Россия молодая, 1994. - 367 с.

104. Самохов, А.А. Об изменении активности катализаторов в процессе эксплуатации / А.А. Самохов [и др.]. - Новосибирск: Наука, 1976. - 107 с.

105. Свистула, А.Е. Выбор оптимальных параметров топливоподающей аппаратуры двигателей постоянной мощности / А.Е. Свистула, Д.Д. Матиевский // Совершенствование быстроходных дизелей Межвуз.сб. АлтПИ.-Барнаул, 1991. - С. 57-65.

106. Селезнева, Е.В. Разработка автоматизированного планирования эксперимента и обработка его результатов / Е.В. Селезнева, Т.А. Юрина // Вестник Сибирского отделения академии военных наук. № 30. – 2015. – С. 167-172.

107. Смагин, И.И. Каталитические нейтрализаторы отработавших газов автобусов / И.И Смагин // Транспорт: наука, техника, управление / ВИНТИ. - 1998. - № 12. - С. 27-30.

108. Смайлис, В.И. Современное состояние проблемы экологии двигателестроения / В.И. Смайлис // Двигателестроение. - 1991. - № 1. - С.3-6.
109. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций / Н.А. Спирин, В.В. Лавров. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. - 257 с.
110. Стрельников, В.А. Снижение токсических выбросов автотракторных дизелей / В.А. Стрельников, С.В. Истомин, В.И. Цыпцин // Тракторы и с/х машины. - № 10. - 2003. - С. 6-9.
111. Султанов, Т.Ф. Методика определения целесообразного уровня стабилизации температуры отработавших газов для обеспечения эффективной работы каталитического нейтрализатора / Т.Ф. Султанов, В.А. Романов // Научный вестник. - Вып. 19. - Челябинск: ЧВВАКИУ, 2007. - С. 123-125.
112. Тихомиров, В.Б. Планирование и анализ эксперимента / В.Б. Тихомиров. - М.: Легкая индустрия, 1974. - 264 с
113. Уровни вредных выбросов различных двигателей внутреннего сгорания / М.В. Бойчук [и др.] // Качество - стратегия XXI века. - Томск: Изд-во НТЛ, 1998. - 199 с.
114. Филиппов, А.З. Токсичность отработавших газов тепловых двигателей / А.З. Филиппов. - Киев: Выща школа, 1980. - 159 с.
115. Хортов, В.П. Новый взгляд на токсичность автомобильных двигателей в условиях городского движения / В.П. Хортов // Грузовик. - 2000. - № 5. - С. 8-11.
116. Хортов, В.П. Новый взгляд на экологическую опасность АТС / В.П. Хортов // Автомобильная промышленность. - 2000. - № 6. - С. 22-24.
117. Хьюз, Р. Дезактивизация катализаторов перевод с англ. / Р Хьюз / Под ред. А.Г. Горелина и А.К. Аветисова. - М.:Химия, 1989. - 280 с.
118. Чуб, Т.В. Рециркуляция отработавших газов судового дизель-генератора как средство снижения выбросов оксидов азота / Т.В. Чуб: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02: М., 2000. - 138 с.
119. Шечков, Г.Т. Проблемы создания каталитических нейтрализаторов отработавших газов ДВС / Г.Т. Шечков, О.А. Лебедева, И.Н. Аржанов // Совершен-

ствование быстроходных дизелей: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. - Барнаул, 1993. - С. 69-71.

120. Экологическая безопасность автомобильного транспорта: Учеб. пособ. для студентов автомобильных техникумов и колледжей / Ю.С. Козлов [и др.] - М.: Агар: Рандеву-АМ, 2000. - 175 с.

121. Якубовский, Ю. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды / Ю. Якубовский / Пер. с польского. - М.: Транспорт, 1979 - 198 с.

122. Яхонтов, В.В. Автомобиль – источник загрязнения атмосферы / В.В. Яхонтов, Ю.Р. Абдрахимов, Е.А. Наумкин // Промышленная экология. Проблемы и перспективы: Материалы науч.-практ. конф., Уфа, 21 ноября 2001. -Уфа: Изд-во ИНХП,2001. - С. 78-79.

123. Auspuff-Filtereinsatz mit katalytischer Wirkung reduziert Abgas - Schadstoffgehalt um 60 bis 90 % // Filtr. und Separ. - 1999. - 13. - №6. - S. 285-289.

124. Bertoli C. Impiego Di Filtri Di Particolato Allo Scarico Di Un Motore Diesel Iniezione Diretta / C. Bertoli, F.Corcione, N. Giacomo. e. al. // II Coveqno Internazionale Metodologie e Mezzi Innovativi Per La Sperimenazione Nel Settore Automobilistico, Firenze, 22 - 25 November 1988. - P. 357-375.

125. Extending Exhaust Gas Recirculation Limits in Diesel Engines / M. Wagner [et.al.] // A&WMA 93-rd Annual Conference and Exposition Salt Lake Citi. UN. June 18-22. 2000 - P. 188-195.

126. Hampson G. J. Development of NO_x and Soot Models for Multidimensional Diesel Combustion / G.J. Hampson, R.D. Reitz // ASME International Joint Power Generation Conference, Minneapolis, MN, 1995. - P. 62-69.

127. Han Z. Mechanism of Soot and NO_x Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine. / Z. Han, A. Uludogan, G. Hampson, R. Reitz // Engine Research Center University of Wisconsin-Madison, 1996. - P. 93-101.

128. Hartley H.O. Smallest composite designs for quadratic response surface. - Biometric, 1959. - Vol. 15, P. 611-622

129. Mollenhauer K. Hand book of Diesel Engine / K. Mollenhauer, H. Tshoeke. - Heidelberg: Springer, 2010. - 636 p.

130. Stefanopoulou A. Dynamic Scheduling of Internal Exhaust Gas Recirculation System / A. Stefanopoulou, I. Kolmanovsky // Proc. IMESE 1997/ DSC. - Vol. 61. - P. 671-678.

131. Strategies and Issues in Correlating Diesel Fuel Properties with Emissions. US Environmental Protection Agency: EPA420-P-01-001, July 2001. - 28 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ



УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
АО «НИИД»
Городилов В.А.

" 04 " 12 2015 г

АКТ

использования результатов диссертационной работы
Е.А. Омельченко

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов, полученных в диссертационном исследовании Омельченко Евгения Алексеевича на тему «Использование вихревой трубы для повышения экологической безопасности поршневых двигателей внутреннего сгорания»

Конкретно при выполнении работы НИР «Проведение поисковых и фундаментальных исследований по разработке технологии оптимизации топливоподачи и рабочих процессов двигателей для создаваемых семейств средне- и высокооборотных дизельных двигателей мощностью более 400 кВт» (шифр «Барельеф»), Государственный контракт от 16.12.2011 11411.1003703.05.010 с Министерством промышленности и торговли Российской Федерации в АО «НИИД» используются:

- предложения по использованию вихревых труб для повышения эффективности поршневых ДВС;
- результаты экспериментальной оценки снижения концентрации оксидов азота и твердых частиц в отработавших газах и повышения экономических показателей дизеля путем рециркуляции отработавших газов и их охлаждением с помощью вихревой трубы;
- результаты экспериментальной оценки снижения концентрации вредных веществ в отработавших газах за счет стабилизации их температуры перед каталитическим нейтрализатором с помощью вихревой трубы.

Начальник отдела проектов

А.В. Воронин

" 01 " 12 2015 г

Подпись А.В. Воронина заверяю

Зел. Золотухина МП





внедрения материалов диссертации Омельченко Е.А. на тему
«Использование вихревой трубы для повышения экологической безопасности поршневых двигателей внутреннего сгорания»

Комиссия в составе:

начальника кафедры двигателей полковника Эдигарова В.Р.;

профессора кафедры двигателей Калекина В.С.;

доцента кафедры двигателей подполковника Перова С.А.

составили настоящий акт, подтверждающий, что в учебном процессе кафедры двигателей Омского автобронетанкового инженерного института использованы теоретические положения и практические результаты диссертационной работы Омельченко Е.А. при:

- * проведении учебных занятий по дисциплинам «Энергетические установки транспортных средств специального назначения. Теория и проектирование» (темы 1, 9, 10, 11, 12, 15) и «Термодинамика и теплотехника» (тема 6,7),
- выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ;
- разработке диссертационных работ адъюнктами кафедры.

Председатель комиссии:

полковник

В. Эдигаров

Члены комиссии:

подполковник

В. Калекин

С. Перов



**УРАЛЬСКИЙ
ДИЗЕЛЬ-
МОТОРНЫЙ
ЗАВОД**

Общество с ограниченной ответственностью
«Уральский дизель-моторный завод»
(ООО «УДМЗ»)
620017, г. Екатеринбург, ул. Фронтových бригад, д. 18
Тел. 311-09-50, 311-09-60
Факс (343)311-09-61
E-mail: mail@udmw.ru

р/сч 40702810614900000107 в
ОАО «СКБ-БАНК», г. Екатеринбург,
БИК 046577756
к/сч 30101810800000000756
ИНН 6673105167
КПП 667301001

От 14.12.2015 Исх. № _____
На № _____ От _____

Утверждаю

технический директор

ООО «Уральский дизель-моторный
завод»

К.т.н., проф. В.С. Мурзин



« 14 » декабря 2015

АКТ

об использовании материалов диссертации Омельченко Е.А.
«Использование вихревой трубы для повышения экологической безопасности
поршневых двигателей внутреннего сгорания»

Настоящим подтверждается, что на ООО «УДМЗ» в процессе модернизации перспективных двигателей семейства ДМ-21 используются материалы диссертационной работы Е.А. Омельченко, связанные с:

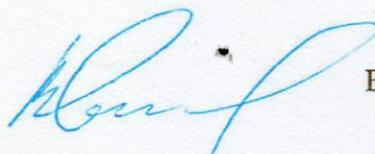
- применением вихревых труб в системах снижения токсичности поршневых двигателей внутреннего сгорания;
- результатами оценки возможности снижения концентрации оксидов азота и твердых частиц в отработавших газах и повышения экономических показателей дизеля путем рециркуляции отработавших газов и их охлаждением с помощью вихревых труб;

- особенностями протекания рабочего процесса и образования в камере сгорания оксидов азота и сажи в дизеле с рециркуляцией отработавших газов и их охлаждением с помощью вихревых труб;

- результатами оценки возможности снижения концентрации вредных веществ в отработавших газах за счет стабилизации их температуры перед каталитическим нейтрализатором с помощью вихревых труб.

Отмечаем, что проработка перечисленных вопросов в диссертации выполнена на высоком научном уровне и заслуживает широкого использования в отрасли.

Заместитель главного конструктора



В.В. Мальцев

Тел. (343) 311-09-50 (доб. 503)