

На правах рукописи



ОМЕЛЬЧЕНКО Евгений Алексеевич

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

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет)
 Экспериментальная часть работы выполнена
 в НИ «Сертификационный центр автотракторной техники»
 (г. Челябинск)

- Научный руководитель:** Кукис Владимир Самойлович,
 доктор технических наук,
 профессор, Заслуженный деятель науки РФ
- Официальные оппоненты:** Еникеев Рустэм Далилович,
 доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
- Салова Тамара Юрьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и электротехнологии» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет»

Защита состоится 30 марта 2016 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.
 Тел/факс (351) 267 91 23. E-mail: D 212.298.09@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) и на сайте <http://susu.ac.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » января 2016 г.

Ученый секретарь
 диссертационного совета
 доктор технических наук, профессор



Е.А. Лазарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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. В современном двигателестроении снижение экологического вреда, наносимого ПДВС, является важнейшей самостоятельной задачей

Степень разработанности темы. Обзор способов повышения экологической безопасности дизелей, проведенный в первой главе диссертации, показал, что в силу особенностей их рабочего процесса, большинство мероприятий, направленных на снижение выбросов оксида углерода, углеводородов и твердых частиц, сопровождается ростом выбросов оксидов азота и наоборот. Поэтому для обеспечения соответствия дизелей действующим и перспективным нормам по токсичности целесообразно использование методов снижения ВВ, включающих сочетание систем рециркуляции отработавших газов (РОГ) с охлаждением рециркулируемых газов (РГ) и нейтрализации ОГ. Эти вопросы широко отражены в технической литературе. Однако при этом возникают проблемы с обеспечением целесообразной температуры для эффективной реализации указанных способов повышения экологической безопасности ПДВС. В настоящее время для этой цели, как правило, используют традиционные рекуперативные теплообменники (А.В. Ахромешин В.П. Голиков, В.А. Марков, В.Н. Луканин, К. Mollenhauer, M. Wagner и др.), характеризующиеся значительной массой, металлоемкостью цветных металлов и имеющие существенные гидравлические сопротивления. Кроме того, создание надежного и эффективного теплообменника для охлаждения РГ представляет собой сложную задачу из-за отложений и загрязнений, выделяющихся из ОГ дизеля. Между тем, материалы работ В.С. Кукиса, А.А. Малоземова, В.А. Романова и ряда других ученых свидетельствуют о теоретической возможности использования вихревых труб (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 ВТ в системах снижения токсичности ПДВС.

3. Разработать программу, методику экспериментального исследования и 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 каталитическим нейтрализатором (КН).

4. Провести натурный 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 ОГ 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 ВТ 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 КН.

Предметом исследования являлись экологические и экономические показатели дизеля с газотурбинным наддувом, оборудованного каталитическим нейтрализатором, системой рециркуляции ОГ и их охлаждением с помощью ВТ.

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 РГ с помощью ВТ;

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

- результаты экспериментальной оценки возможности снижения концентрации ВВ в ОГ за счет регулирования их температуры перед КН с помощью ВТ.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в:

- подтверждении возможности снижения концентрации оксидов азота и твердых частиц в ОГ, а также повышения экономических показателей дизеля с рециркуляцией ОГ и их охлаждением с помощью ВТ;

- подтверждении возможности снижения концентрации ВВ в ОГ за счет регулирования их температуры перед КН с помощью ВТ;

- установлении количественной зависимости выбросов твердых частиц и оксидов азота, от доли РГ в свежем заряде; степени снижения их

температуры с помощью ВТ; 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. Были использованы методы изучения специальной литературы, теоретического анализа и синтеза полученного экспериментального материала, индуктивный и дедуктивный методы обобщения полученных эмпирическим путем данных; математические и статистические методы обработки полученных экспериментальных материалов и для установления количественных зависимостей между изучаемыми явлениями. Теоретическая основа работы базировалась 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 учеными 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 4СН13/15.

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

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 «Достижения 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» (г. Екатеринбург), ОАО «НИИ двигателей» (г. Москва) 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., включает 77 рисунков, 15 таблиц, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы (131 наименование) и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи исследования, его научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые автором на защиту, дана общая характеристика диссертационной работы.

В **первой главе** рассмотрены общие экологические проблемы взаимодействия ПДВС с окружающей средой. Приведены основные факторы, влияющие на образование ВВ в дизелях и существующие способы повышения их экологической безопасности. Показано, что для обеспечения соответствия дизелей действующим и перспективным нормам по токсичности целесообразно использование методов снижения выбросов ВВ, включающих сочетание систем РОГ с охлаждением РГ и нейтрализации ОГ. Показаны негативные стороны использования для этих целей традиционных рекуперативных теплообменников и целесообразность применения вместо них ВТ. Сказанное позволило сформулировать цель и задачи настоящего исследования, приведенные выше.

Во **второй главе** приведены обзор предложенных в литературе и Патентах возможных вариантов использования ВТ в системах снижения токсичности ПДВС, а также математическая модель для расчета и теоретического исследования ВТ для системы рециркуляции ОГ.

Модель представляет собой систему уравнений газовой динамики Навье-Стокса и турбулентности, решаемой численными методами. Она с высокой детализацией описывает процессы, происходящие в ВТ, и содержит большое число параметров. Среди них выбраны наиболее важные, влияющих на степень охлаждения РГ (Δt) и холодопроизводительность (Φ) ВТ (рисунок 1).

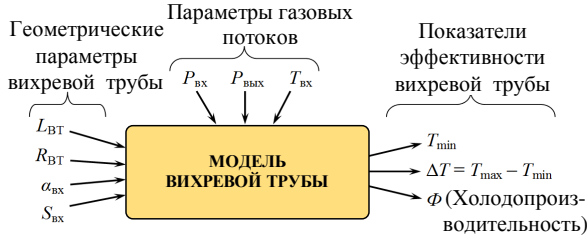


Рисунок 1 – Входные параметры и выходные характеристики математической модели

Для удобства исследования системы уравнений и проведения компьютерных экспериментов разработана компьютерная программа «Программа для моделирования вихревого охладителя РГ» (рисунок 2).

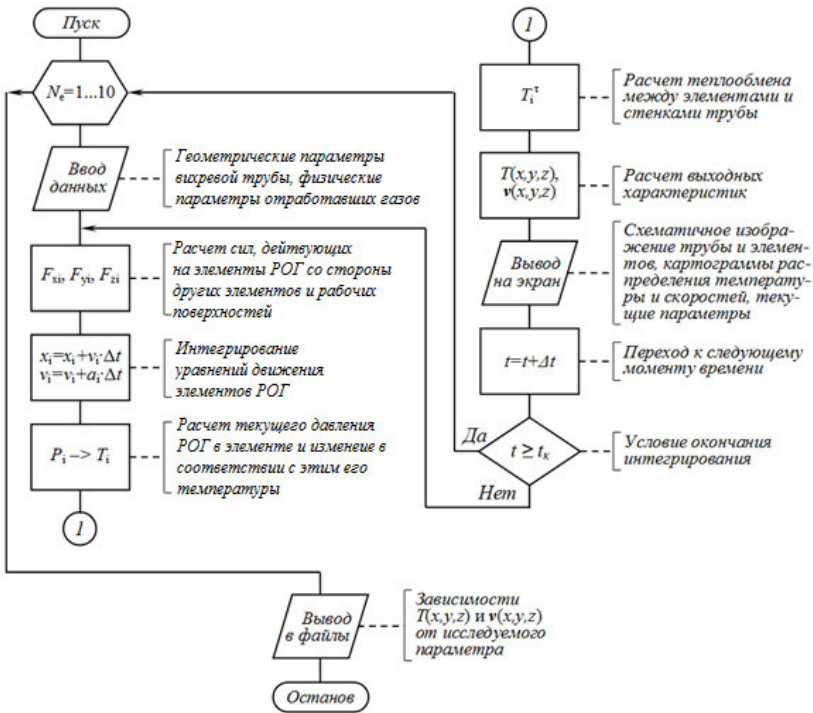


Рисунок 2 – Схема алгоритма моделирования движения отработавших газов в вихревой трубе

В *третьей главе* разработаны программа, методика проведения экспериментального исследования и дано описание экспериментальной установки. Программа включает сравнительный анализ выбросов ВВ с ОГ дизеля 4ЧН13/15 без рециркуляции, с рециркуляцией ОГ и их охлаждением с помощью ВТ.

При этом решались задачи:

1) экспериментального определения влияния доли РГ в свежем заряде, их температуры, скоростного и нагрузочного режимов работы дизеля на концентрацию ВВ в ОГ и на удельный эффективный расход топлива (целесообразность оценки последнего обусловлена тем, что, как известно, рециркуляция ОГ ведет к его ухудшению);

2) расчетного определения целесообразного уровня температуры ОГ, поступающих в КН, и экспериментальной оценки результатов обеспечения этой температуры с помощью ВТ на эффективность его работы;

3) построения математической модели в форме уравнений регрессии, связывающих долю РГ в свежем заряде, их температуру, скоростной и нагрузочный режимы работы дизеля с содержанием оксидов азота и твердых частиц в ОГ.

Отбор ОГ из выпускного тракта в систему рециркуляции осуществляется после турбины (перед КН). Перед смесителем РГ и воздуха на впуске, который размещался перед компрессором, была установлена ВТ (рисунок 3, таблица 1). Система РОГ с ВТ обеспечивала возможность регулировки объемного расхода РГ в диапазоне 0–20 % от объемного расхода свежего заряда и предельное снижение их температуры на 60 К относительно температуры ОГ, входящих в ВТ.

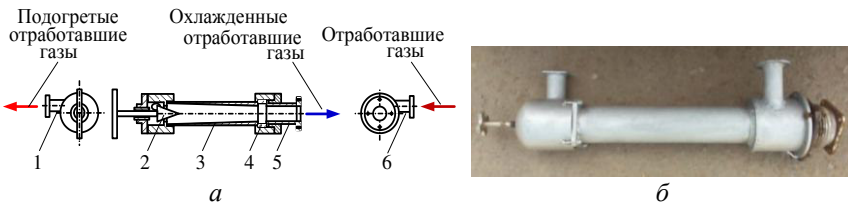


Рисунок 3 – Вихревая труба:

а – 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

Схема системы рециркуляции и нейтрализации ОГ с местами установки датчиков приведена на рисунке 4.

Таблица 1 – 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

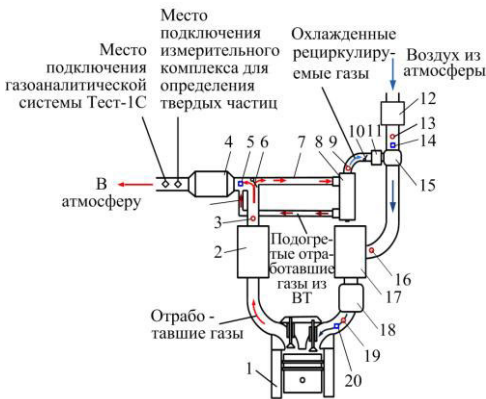


Рисунок 4 – Схема системы рециркуляции и нейтрализации отработавших газов:

1 – дизель; 2 – газовая турбина; 3, 9, 13, 16, 19 – точки замера температуры; 4 – КН, 5, 14, 20 – точки замера давления; 6 – заслонка; 7 – патрубок подвода ОГ к ВТ; 8 – ВТ; 10 – заслонка, регулирующая объем РГ; 11 – расходомер РГ; 12 – расходомер воздуха; 15 – смеситель газов; 17 – компрессор, 18 – ОНВ

На рисунке 5 показан фрагмент экспериментальной установки, иллюстрирующий расположение ВТ и заслонки, регулирующей объем РГ.

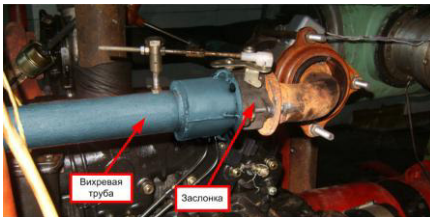


Рисунок 5 – Расположение вихревой трубы и заслонки, регулирующей объем рециркулируемого газа, на стенде

В *четвертой главе* приведены результаты натурального экспериментального исследования выбросов ВВ с ОГ дизеля 4ЧН13/15 в исходной комплектации и при их рециркуляции с охлаждением в ВТ, а также с регулированием температуры ОГ перед их поступлением в КН.

Учитывая то, что содержание оксида углерода и углеводородов в ОГ дизеля 4ЧН13/15, определенное при испытаниях в исходной комплектации, оказалось значительно ниже нормированных величин, и то, что индекс токсичности твердых частиц в два раза выше, чем оксидов азота, в 10 раз – чем углеводородов и в 20 раз – чем оксида углерода, 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), исследование было ограничено оценкой выбросов твердых частиц и оксидов азота.

При определении влияния работы системы РОГ и охлаждения РГ на содержание в ОГ дизеля 4ЧН13/15 твердых частиц, оксидов азота и удельный эффективный расход топлива, прежде всего, было оценено влияние доли и температуры РГ при его работе на режимах, соответствующих ГОСТ Р 41.96-2011 (Правила ЕЭК ООН № 96). Ограниченный объем автореферата не позволяет привести подробные результаты испытаний, поэтому в последующем будут показаны только результаты, полученные при доле РГ в свежем заряде 18 % и их охлаждении на 60 °С (таблицы 2, 3 и 4).

Таблица 2 – Содержание оксидов азота и твердых частиц в ОГ при работе дизеля 4ЧН13/15 на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 (1 – исходное значение; 2 – с рециркуляцией; 3 – с рециркуляцией и охлаждением)

Режим		Содержание NO_x , ppm			Содержание РМ, $г/м^3$		
		1	2	3	1	2	3
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 2 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 3.

Таблица 3 – Снижение содержания оксидов азота и твердых частиц в ОГ дизеля 4ЧН13/15 за счет охлаждения РГ на 60 °С при его работе на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011, %
(1 – нагрузка 100 %; 2 – нагрузка 75 %; 3 – нагрузка 50 %)

Режим					
$n = 1850 \text{ мин}^{-1}$			$n = 1250 \text{ мин}^{-1}$		
1	2	3	1	2	3
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

Как и следовало ожидать, реализация рециркуляции ОГ привела к ухудшению экономичности, которое было несколько компенсировано охлаждением РГ (таблица 4).

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

Режим					
$n = 1850 \text{ мин}^{-1}$			$n = 1250 \text{ мин}^{-1}$		
1	2	3	1	2	3
$\text{г / (кВт} \cdot \text{ч)}$					
7	7	6	14	7	8
%					
2,93	2,80	2,31	4,18	2,11	1,98

Из материалов таблицы 4 очевиден вывод, что абсолютное снижение удельного эффективного расхода топлива произошло практически на всех режимах на 6–8 г/(кВт·ч). Это 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.

Определение целесообразного уровня температуры ОГ на входе в КН показало, что для дизеля 4ЧН13/15 таковым 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. В таблице 5 приведены полученные значения степеней превращения токсичных компонентов ОГ, которые рассчитывали по формуле:

$$\Delta \bar{C}_{\text{ни}} = \frac{C_i - C_i^{\text{H}}}{C_i} = 1 - \frac{C_i^{\text{H}}}{C_i},$$

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

В таблице 5 показано, какое влияние оказало регулирование температуры ОГ перед КН с помощью ВТ на индивидуальные и интегральные степени превращения токсичных компонентов при работе дизеля 4ЧН13/15 на режимах, соответствующих ГОСТ Р 41.96-2011.

Таблица 5 – Влияние регулирования температуры отработавших газов перед каталитическим нейтрализатором на индивидуальные и интегральные степени превращения токсичных компонентов, % (1 – нагрузка 100 %; 2 – нагрузка 75 %; 3 – нагрузка 50 %; 4 – 10 %; 5 – холостой ход)

Режим		$\Delta \bar{C}_{\text{CO}}$	$\Delta \bar{C}_{\text{CH}}$	$\Delta \bar{C}_{\text{NOx}}$	$\Delta \bar{C}_{\text{PM}}$	$\Sigma \Delta \bar{C}_{\text{ни}}$
n = 1850 мин ⁻¹	1	+0,91	-0,25	-0,89	+6,1	+5,87
	2	+3,77	-1,27	-1,17	+31,54	+35,99
	3	+6,89	+0,26	-1,65	+41,67	+47,17
	4	+16,14	+13,85	-0,49	+48,57	+78,07
n = 1250 мин ⁻¹	1	+0,01	-0,04	-0,1	+0,01	-0,03
	2	+0,02	+0,01	0,0	0,0	+0,03
	3	+2,14	+3,13	-2,05	+39,73	+42,59
	4	+37,36	+23,23	+10,45	+43,39	+114,43
	5					

Материалы таблицы показывают, что регулирование температуры ОГ перед КН с помощью ВТ обеспечило повышение интегральных степеней превращения токсичных компонентов на различных скоростных, нагрузочных ре-

жимах 50 и менее процентов и режиме холостого хода (т.е. там, где нейтрализатор в обычных условиях работает крайне неэффективно) от 47 до 114 %.

В конце четвертой главы приведены регрессионные зависимости, позволяющие определять содержание оксидов азота и твердых частиц в ОГ в зависимости от: объемной доли РГ в свежем заряде; степени снижения их температуры в ВТ; частоты вращения коленчатого вала и нагрузки на двигатель, полученные в результате обработки данных натурного эксперимента:

$$\begin{aligned} \text{NO}_x &= 61,462 - 11,925 X_1 + 19,212 X_2 + 55,988 X_3 + 25,737 X_4 - \\ &\quad - 11,700 X_1 X_3 + 17,538 X_2 X_3 + 24,087 X_3 X_4; \\ \text{PM} &= 73,038 - 33,737 X_1 - 2,212 X_2 - 44,100 X_3 + 8,975 X_4 + \\ &\quad + 40,475 X_1 X_3 - 7,575 X_1 X_4; \end{aligned}$$

где X_1, X_2, X_3, X_4 – кодовые значения соответственно: объемной доли РГ в свежем заряде; степени снижения температуры; относительная частоты вращения коленчатого вала двигателя и относительной нагрузки на двигатель.

Кодовые значения факторов получали по формуле:

$$X_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta x_i},$$

где x_i - натуральное текущее значение i -го фактора; x_{i0} – начальный (нулевой) уровень i -го фактора; Δx_i – интервал варьирования i -го фактора.

Проверка с помощью критерия Фишера подтвердила совпадение результатов расчета по этим уравнениям и эксперимента с вероятностью не менее чем в 95 % случаев.

В **пятой главе** приведены результаты оценки особенностей рабочего процесса дизеля 4СН13/15 с рециркуляцией ОГ и их охлаждением в ВТ, полученные в ходе численного эксперимента. Расчеты выполнялись в с использованием программного обеспечения AVL FIRE. Большой объем полученного материала не позволяет привести его в рамках ограниченного объема текста реферата. Поэтому в дальнейшем показаны сравнительные данные по влиянию охлаждения РГ только для их доли в свежем заряде, равной 18 %, и при снижении их температуры на 60 К. На рисунке 6 показано изменение температуры рабочего тела при работе на одном из режимов без охлаждения РГ и в случае их охлаждения.

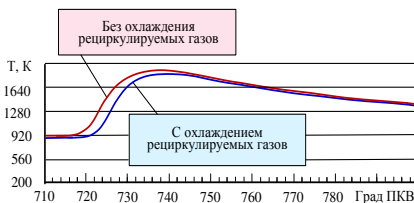


Рисунок 6 – Изменение температуры рабочего тела: ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

Расчеты показали, что разница температуры свежего заряда на входе в цилиндр в случае охлаждения РГ в ВТ и без него составила 11 К, максимальная температура газов в надпоршневом объеме при отсутствии охлаждения – 1885 К, а в случае охлаждения – 1819 К. Средняя температура рабочего тела в указанном на рисунке диапазоне изменения град ПКВ составила в первом варианте 1571 К, во втором – 1513 К. 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 %. Это привело к более быстрому сгоранию топлива (и, соответственно, более интенсивному тепловыделению) паров топлива, образовавшихся в период задержки воспламенения. Скорость тепловыделения в случае охлаждения РГ за короткий промежуток времени стремительно увеличивалась и, достигнув определенного максимума (примерно 40 Дж/град ПКВ), также быстро уменьшалась (рисунок 5). 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 на рисунке 7.

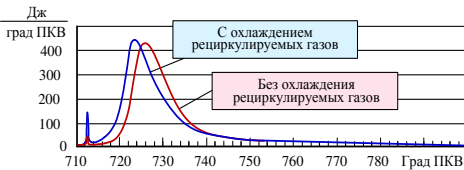


Рисунок 7 – Скорость тепловыделения в надпоршневом пространстве

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

Кроме отмеченного, в главе в визуализированной форме представлена динамика изменения температуры; массовых долей оксидов азота, сажи и углеводородов в зависимости от угла поворота коленчатого вала в надпоршневом пространстве на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 без охлаждения РГ и при их охлаждении на 60 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертации произведена оценка возможности повышения экологической безопасности ПДВС за счет использования ВТ в системе рециркуляции ОГ.

При этом:

- была изготовлена оригинальная ВТ, позволяющая понижать температуру РГ максимально на 60 °С;

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

- проведено исследование выбросов ВВ с ОГ дизеля 4ЧН13/15, установленного на испытательном стенде, оборудованном системой рециркуляции ОГ и ВТ для их охлаждения и регулирования температуры ОГ перед КН;

- получены регрессионные зависимости, позволяющие определять содержание оксидов азота и твердых частиц в ОГ в зависимости от: объемной доли РГ в свежем заряде; степени снижения их температуры в ВТ; 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, сажи и углеводородов в надпоршневом пространстве в ходе процесса сгорания при работе двигателя на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 без охлаждения РГ и при их охлаждении на 60 °С, что позволило наглядно оценить изменение указанных показателей в процессе сгорания, произошедшие за счет охлаждения РГ в ВТ;

- подтверждена адекватность результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследований.

При этом:

I. Установлено, что при доле РГ в свежем заряде 18 %:

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

- снижение содержания оксидов азота за счет охлаждения РГ в ВТ 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.

2. На режиме, характерном для двигателей транспортных и дорожно-строительных машин, каковым и является дизель 4ЧН13/15 (частота вра-

щения коленчатого вала, соответствующая максимальному крутящему моменту, нагрузка 75 %):

- охлаждение РГ 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 РГ обеспечивает увеличение массовой доли кислорода в надпоршневом пространстве примерно на 30 % (при охлаждении РГ на 60 К), более быстрое сгорание топлива и, соответственно, более интенсивное и более полное тепловыделение.

II. Сравнение результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследований на основных режимах ГОСТ Р 41.96-2011 при доле РГ 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 %.

III. 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 %

Полученные результаты исследования используются 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 РГ, а также температуру ОГ перед КН на различных скоростных и нагрузочных режимах работы двигателя, с позиции достижения максимально возможной его экологической безопасности.

* * *

Представленная работа выполнена при методической и научной поддержке фирмы AVL (Австрия, г. Грац), с которой Южно-Уральский государственный университет имеет соглашение об использовании программ AVL BOOST, AVL CRUISE, AVL EXCITE и AVL FIRE.

Основное содержание диссертации опубликовано:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Омельченко, Е.А.** Расчетная оценка пределов форсирования дизелей с учетом требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами / Е.А. Омельченко, Д.Ю. Фадеев, О.В. Субботин // Вестник СибАДИ. – Вып. 6 (40), 2014. – С. 39-44

2. **Омельченко, Е.А.** К вопросу об оценке пределов форсирования дизелей с учетом требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами / Е.А. Омельченко, Д.Ю. Фадеев // Омский научный вестник. – Омск: № 1 (137). – 2015. – С. 80-82.

3. **Омельченко, Е.А.** 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.

В монографиях

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

5. **Омельченко, Е.А.** Использование вихревых труб в поршневых двигателях внутреннего сгорания / В.С. Кукис, В.А. Романов, Д.В. Шабалин, Е.А. Омельченко. – СПб.: Военная Академия МТО. 2015. – 215 с.

В материалах Международных конференций:

6. **Омельченко, Е.А.** Влияние рециркуляции и нейтрализации отработавших газов на экологические показатели дизеля / В.С. Кукис, Е.А. Омельченко // Materials of IX international research and practice conference «Fundamental and applied science» (october 30-november 7, 2014.V. 18. Technical science). Sheffield UK, 2014. – P.26-30.

7. **Омельченко, Е.А.** Результаты использования вихревой трубы в системе рециркуляции отработавших газов дизеля / В.С. Кукис, Д.В. Шабалин, Е.А. Омельченко // Материалы 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.

В других изданиях:

8. **Омельченко, Е.А.** Механизм образования вредных веществ в дизелях / Е.А. Омельченко // Межкафедральный сборник научных и методических трудов. – Вып. 3. – Омск: Омский научно-образовательный комплекс, 2013. – С. 52-56.

9. **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.

10. **Омельченко, Е.А.** Математическое моделирование образования вредных выбросов дизелей / Е.А. Омельченко // Вестник сибирского отделения академии военных наук. Омск – 2015. – Вып. 31. – С. 80-85.

11. **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. – № 30. – 2015. – С. 133-137.

На правах рукописи

Омельченко Евгений Алексеевич

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Специальность: 05.04.02 – Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 13.01.2015. Формат 60x84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать оперативная. Усл.-печ.л. 1,0 Уч.-изд.л. 1,0.
Тираж 100. Заказ 1601.

Отпечатано в типографии
Омского автобронетанкового инженерного института
644098, г. Омск, 14 в/городок