


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

17 ФЕВ 2016



006646103

Челябинск – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет)
 Экспериментальная часть работы выполнена
 в НП «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»

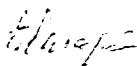
Защита состоится 30 марта 2016 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.
 Тел/факс (351) 267 91 23. E-mail: 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 «25» 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, М. 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 газозоудном 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 государственному стандарту, 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.

Во *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).

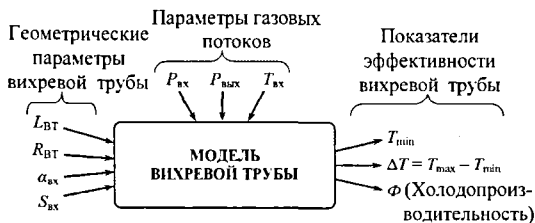


Рисунок 1 – Входные параметры и выходные характеристики математической модели

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

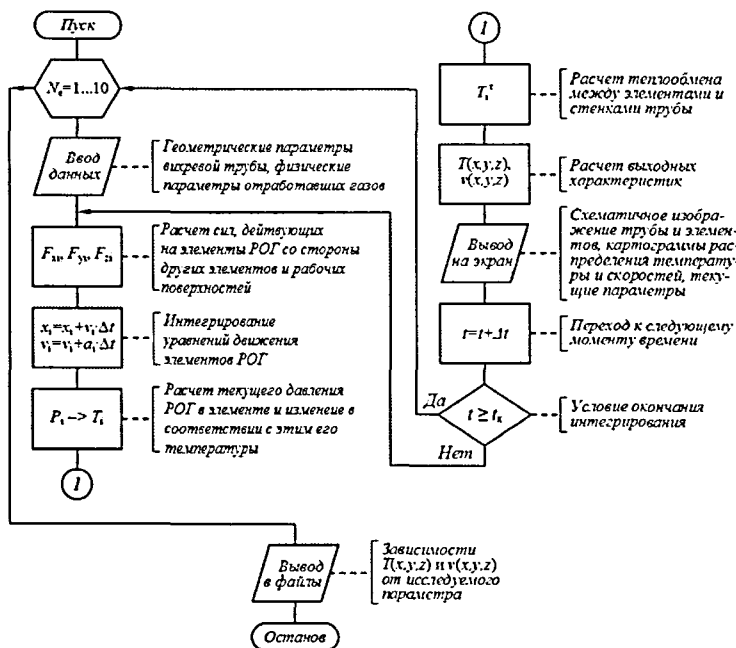


Рисунок 2 – Схема алгоритма моделирования движения отработавших газов в вихревой трубе

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 доли 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 осуществлялся 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.

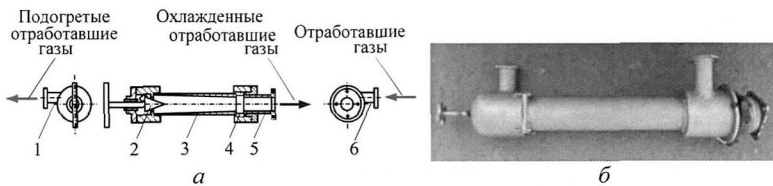


Рисунок 3 – Вихревая труба:

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

| Конструктивная характеристика | Единица измерения | Величина |
|--|-------------------|----------------------|
| 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 | $0,11 \cdot 10^{-2}$ |
| Сужение внутреннего диаметра корпуса в сторону патрубка выхода потока охлажденных отработавших газов | град | 7 |

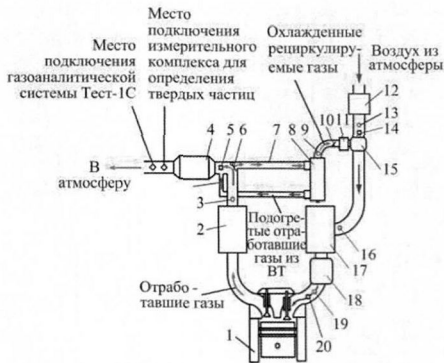


Рисунок 4 – Схема системы рециркуляции и нейтрализации отработавших газов:

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.

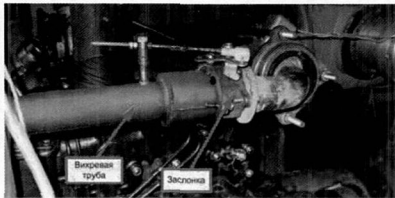


Рисунок 5 – Расположение вихревой трубы и заслонки, регулирующей объем рециркулируемого газа, на стенде

В *четвертой главе* приведены результаты натурального экспериментального исследования. выбросов ВВ с ОГ дизеля 4СН13/15 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 4СН13/15, 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 4СН13/15 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 4СН13/15 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 |
| $n = 1850 \text{ мин}^{-1}$ | 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 |
| $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$ | 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 |
| $\text{г} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$ | | | | | |
| 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:

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

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 | | $\Delta \bar{C}_{CO}$ | $\Delta \bar{C}_{CH}$ | $\Delta \bar{C}_{NOx}$ | $\Delta \bar{C}_{PM}$ | $\Sigma \Delta \bar{C}_{ni}$ |
|----------------------------|---|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 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 натурального 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 4ЧН13/15 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.

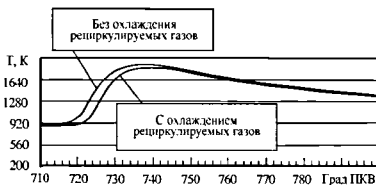


Рисунок 6 – Изменение температуры рабочего тела: ($n=1250 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка 75 %)

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 большого количества окислителя в камере сгорания в случае охлаждения РГ обеспечило и более раннее горение топлива в диффузионной фазе, что хорошо видно на рисунке 7.

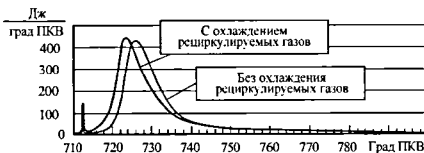


Рисунок 7 – Скорость тепловыделения в надпоршневом пространстве

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 натурального 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