

На правах рукописи

Чжан Цытянь

СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА
В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ ВОДОРОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ,
РАБОТАЮЩЕГО НА ОБЕДНЕННОЙ СМЕСИ

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чжан Цытянь

Москва - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Кавтарадзе Реваз Зарабович,
доктор технических наук, профессор
кафедры комбинированных двигателей и альтернативных
энергоустановок МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Козлов Андрей Викторович,
доктор технических наук, начальник управления
энергосберегающих технологий и альтернативных
топлив ФГУП «НАМИ»

Смирнов Алексей Юрьевич,
кандидат технических наук, директор
департамента технологической поддержки и
развития АО «Трансмашхолдинг»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет»

Защита диссертации состоится «14» декабря 2021 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан «07» октября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Тумашев Р.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью удовлетворения современных жестких требований к решению энергетической и экологической проблем поршневых двигателей. Поршневые двигатели являются основными потребителями топлива нефтяного происхождения и одновременно одними из основных загрязнителей окружающей среды, т.е. перспективы их дальнейшего развития непосредственно связана с энергетической и экологической проблемами современной цивилизации. Ключ решения этих проблем лежит в применении и широком внедрении в поршневых двигателях альтернативных топлив, среди которых наиболее перспективным является водород, что прежде всего, обусловлено его, как моторного топлива, замечательными теплофизическими свойствами, способностью полной декарбонизации отработавших газов, а также практически неисчерпаемыми запасами на планете. Относительно высокая цена, взрывоопасность, трудности хранения и транспортировки - основные препятствия, мешающие широкому применению водорода в транспортной энергетике, в ближайшее будущее, скорее всего, будут преодолены. Результаты исследований последних лет, нацеленных на решение указанных проблем, а также история развития двигателестроения, в частности, сложности при исторически первых попытках использования бензина в поршневых двигателях, работающих до этого на светильном газе, позволяют утверждать, что указанные проблемы будут решены.

Переходу транспортной энергетики на водород препятствует также, конечно, стереотип незаменимости топлив нефтяного происхождения, лобируемый их крупнейшими поставщиками - владельцами всемирных сетей добычи сырья, производства и реализации топлива нефтяного происхождения. Для преодоления сопротивления нефтяного бизнеса нужна не только общегражданская, но и политическая воля. С другой стороны, обострения энергетических и экологических проблем, наблюдаемые в последнее время, придают ускорение процессу решения этой задачи. В связи с этим, развитию и внедрению в экономику водородных двигателей большое внимание уделяется в Китае и в России, а также в других развитых странах.

Очевидные перспективы применения водорода в качестве моторного топлива ставят перед современным двигателестроением актуальную задачу исследования и усовершенствования рабочего процесса, прежде всего, повышения его экологичности и эффективности.

Цель работы: снижение концентрации оксидов азота в камере сгорания водородного двигателя путем применения рециркуляции отработавших газов (РОГ) на опытном водородном двигателе с обедненной смесью и разработка 3D-математической модели его рабочего процесса, позволяющей прогнозировать экологические и эффективные характеристики как конвертированных на водород серийных бензиновых, так и вновь проектируемых перспективных водородных ДВС.

Основные задачи диссертационной работы: Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработка математической модели трехмерного турбулентного переноса и сгорания в цилиндре водородного двигателя с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием, основанной на фундаментальных уравнениях типа Навье-Стокса. Верификация модели по результатам эксперимента;
2. Проведение экспериментальных исследований опытного водородного двигателя, представляющего собой серийный автомобильный бензиновый двигатель, конвертированный на водород. Определение значений коэффициента избытка воздуха, обеспечивающих стабильное сгорание водорода без аномальных явлений в процессе сгорания;
3. Анализ индикаторных и экологических показателей водородного двигателя, полученных в лабораторных условиях в зависимости от регулируемых параметров рабочего процесса и режимов работы двигателя;
4. Моделирование рабочего процесса водородного двигателя и прогнозирование его эффективных и экологических показателей при работе на обедненной смеси в зависимости от угла опережения зажигания и степени РОГ.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Впервые в трехмерной постановке осуществлено моделирование рабочего процесса водородного двигателя с внешним смесеобразованием, принудительным зажиганием и с РОГ.
2. Определены параметры инициализации модели, обеспечивающих хорошее согласование между расчетными и экспериментальными данными. Проведена адаптация расширенной модели когерентного пламени (ECFM, Extended Coherent Flame Model) для процесса горения водорода в поршневом двигателе;
3. Впервые с применением 3D-модели исследовано влияние РОГ на образование оксидов азота в водородных двигателях и проанализированы ее особенности, связанные с отличием состава и теплофизических свойств отработавших газов (ОГ) в водородных и традиционных двигателях.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

- применением фундаментальных законов и уравнений турбулентного переноса количества движения, энергии и массы, теории горения и образования оксидов азота, современных численных методов их реализации, а также результатами верификации математических моделей путем сравнения с результатами эксперимента;
- использованием современных, хорошо апробированных $k-\zeta-f$ -модели турбулентности и ECFM-модели сгорания, реализуемых в 3D - CRFD коде AVL FIRE (лицензионное соглашение между AVL GmbH и МГТУ им. Н.Э. Баумана);
- применением надежных опытных результатов по измерению индикаторных показателей и эмиссии оксидов азота экспериментального водородного двигателя, полученных при непосредственном участии автора диссертации в процессе совместных исследований МГТУ им. Н.Э. Баумана и Пекинского технологического института (ПТИ), проведенных в лаборатории ПТИ.

Практическая ценность состоит в том, что:

- разработанная модель рабочего процесса представляет собой инструмент, позволяющий исследовать влияние регулируемых и конструктивных факторов на эффективные и экологические показатели быстроходного водородного двигате-

ля с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием и прогнозировать эти показатели. Его применение при создании новых перспективных водородных двигателей, а также при конвертировании серийных бензиновых двигателей на водород, способствует существенному сокращению сроков и материальных затрат на экспериментальные исследования и на доводку двигателя.

- результаты исследования РОГ и особенностей ее применения в водородном двигателе, проанализированные в данной диссертационной работе, следует учитывать при использовании РОГ на водородных двигателях, работающих на обедненной смеси.

Автор защищает:

- результаты 3D-моделирования и экспериментального исследования рабочего процесса исследуемого водородного двигателя в зависимости от изменения различных параметров двигателя, влияющих на индикаторные и эффективные показатели и на эмиссию оксидов азота;

- использованные методы и способы, реализованные путем математического моделирования и экспериментального исследования и позволяющие ограничить образование оксидов азота, а также предотвратить аномальные процессы сгорания в водородном двигателе с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием;

- верифицированную путем сравнения с экспериментальными результатами 3D-математическую модель внутрицилиндровых процессов в водородном двигателе с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием, используемый метод численной реализации этой модели, а также результаты численных экспериментов, проведенных с применением разработанной модели.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены:

- на II Международной научно-практической конференции «Материаловедение, машиностроение и энергетика: проблемы и перспективы развития» (Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 20-21 ноября 2020 г. Форма участия в конференции: заочная);

- на заседаниях кафедры комбинированных двигателей и альтернативных энергоустановок МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2019, 2020, 2021 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных статей, в том числе 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8], и 3 статьи, рецензируемых международными системами цитирования *Scopus* [4, 5, 6]. Общий объем работ - 2,3 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Общий объем работы 161 страница, включая 150 страниц основного текста, содержащего 65 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 121 наименование на 12 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения работ, направленных на снижение концентрации оксидов азота в отработавших газах водородного двигателя, работающего на обедненной смеси. Обоснована актуальность, научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика диссертации.

В первой главе диссертации проведен анализ работ, посвященных проблемам снижения концентрации оксидов азота в отработавших газах водородного двигателя. Отмечена актуальность использования водорода в качестве топлива в ДВС. Рассмотрены особенности рабочего процесса водородного двигателя с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием. Проанализированы работы по методам уменьшения количества образования NOx в камере сгорания водородных двигателей. Перспективность работ, направленных на снижение концентрации оксидов азота в отработавших газах водородного двигателя путем совершенствования процесса сгорания, обоснована в трудах И.Л. Варшавского, А.И. Мищенко, Ю.В. Галышева, Е.А. Федянова, Р.З. Кавтарадзе, В.А. Маркова, Д.О. Онищенко, А.А. Зеленцова, G. Woschni, K. Zeilinger, H. Rottengruber, S. Baigang, L. Fushui, J. Heywood, J.W. Heffel, T. Shudo, S. Verhelst и ряда других. На основе проведенного анализа работ по данной тематике была поставлена цель диссертационной работы и определены задачи, решение которых необходимо для ее достижения (см. выше).

Вторая глава посвящена выбору математической модели внутрицилиндровых процессов в водородном двигателе с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием. Дифференциальные уравнения в частных производных, с помощью которых описываются физические процессы переноса массы, количества движении и энергии, представим в виде обобщенного закона сохранения, выраженного обобщенным дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \operatorname{div}\left(\rho \vec{W}\Phi\right) = \operatorname{div}(\Gamma_\Phi \operatorname{grad}\Phi) + S_\Phi \quad (1)$$

где Φ - произвольная зависимая переменная, Γ_Φ - коэффициент диффузии, S_Φ - источниковый член, который в общем случае можно представить как разность генерации $S_{\Phi g}$ и аннигиляции $S_{\Phi a}$ потоков, т.е. $S_\Phi = S_{\Phi g} - S_{\Phi a}$. Конкретный вид Γ_Φ и S_Φ , а также $S_{\Phi g}$ и $S_{\Phi a}$, зависит от смысла переменной Φ (Таблица 1).

При подстановке соответствующих членов в обобщенное уравнение (1) получается система уравнений трехмерного нестационарного переноса (уравнения Навье-Стокса, энергии, неразрывности и диффузии), которая после осреднения по методу Фавра (A. Favre) принимает форму Рейнольдса. Для замыкания системы уравнения Рейнольдса была использована k- ζ -f модели турбулентности, предложенная К. Ханиаличом (K. Hanjalić) и др., дополняется уравнением эллиптической функции f П. Дурбина (P.A. Durbin), учитывающей пристеночную анизотропию турбулентности. Чувствительность к виду ячейки и степени измельчения сетки, характерная для модели турбулентности Дурбина, снижается и устойчивость численного решения улучшается, что особенно важно для расчета турбулентного переноса в камере сгорания поршневого двигателя.

Таблица 1.

Фундаментальных уравнениях Навье – Стокса

УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА, КАК ЧАСТНЫЕ
СЛУЧАИ ОБОБЩЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho W_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_\Phi$$

Таблица 1. (продолжение)

| | | |
|---|-------------------|--|
| $\Phi = W_i, \Gamma_\Phi = \mu,$ $S_\Phi = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + V_\mu$ \cdot Уравнение сохранения количества движения (уравнение Навье - Стокса) | Исход-ная форма | $\rho \frac{DW_i}{D\tau} = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial W_k}{\partial x_k} \right) \right]$ |
| | Форма Рей-нольдса | $\bar{\rho} \frac{D\bar{W}_i}{D\tau} = \bar{G}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right) - \bar{\rho} \bar{W}_i \bar{W}_j \right]$ |
| | Новые неизвестные | $\bar{\rho} \bar{W}_i \bar{W}_j$ - тензор рейнольдсовых турбулентных напряжений, определенный по пульсационным составляющим скорости; |
| $\Phi = H, \Gamma_\Phi = \frac{\lambda}{c_p},$ $S_\Phi = \frac{\partial p}{\partial \tau} +$ $\frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} W_j) + G_j W_j +$ $w_r Q_r + \frac{\partial q_{R_j}}{\partial x_j}$ Уравнение сохранения энергии | Исход-ная форма | $\rho \frac{DH}{D\tau} = G_j W_j + \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} W_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + w_r Q_r + \frac{\partial q_{R_j}}{\partial x_j} \right)$ |
| | Форма Рей-нольдса | $\bar{\rho} \frac{D\bar{H}}{D\tau} = \bar{G}_j \bar{W}_j + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} \bar{W}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - c_p \bar{\rho} \bar{T}' \bar{W}_j' \right)$ $+ \bar{w}_r \bar{Q}_r + \frac{\partial \bar{q}_{R_j}}{\partial x_j}$ |
| $\Phi = 1, \Gamma_\Phi = 0,$ $S_\Phi = 0.$ Уравнение сохранения массы (неразрывности) | Новая неизвестная | $c_p \bar{\rho} \bar{T}' \bar{W}_j' - \text{турбулентный перенос энталпии } \bar{\rho} c_p T' \text{ по-средством флуктуации скорости } \bar{W}_j';$ |
| | Исход-ная форма | $\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho W_j) = 0$ |
| $\Phi = \frac{C_l}{\rho},$ $\Gamma_\Phi = D_l \rho,$ $S_\Phi = m_l.$ Уравнение диффузии (концентрации) | Форма Рей-нольдса | $\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{W}_j) = 0$ |
| | Исход-ная форма | $\frac{DC}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \dot{m}$ |
| $\Phi = \frac{C_l}{\rho},$ $\Gamma_\Phi = D_l \rho,$ $S_\Phi = m_l.$ Уравнение диффузии (концентрации) | Форма Рей-нольдса | $\frac{D\bar{C}}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - \bar{C} \bar{W}_j' \right) + \dot{\bar{m}},$ |
| | Новая неизвестная | $\bar{C} \bar{W}_j'$ - турбулентный диффузионный перенос массы компонента, концентрация которого C , посредством флуктуации скорости \bar{W}_j' . |

Скорость процесса сгорания в данной работе определяется на основе расширенной модели когерентного пламени, известной под названием ECFM (Extended Coherent Flame Model) - модель сгорания. В основе ECFM-модели сгорания лежит допущение о том, что характерный масштаб времени для химических реакций намного меньше по сравнению с масштабом времени турбулентности. При этом в ECFM-модели акцент делается на изменение площади фронта пламени. Обычно эти модели применимы, как для условий с предварительным смешиванием, так и без такового, так как основаны на концепции ламинарного распространения пламени. Согласно этой концепции осредненные по всему фронту пламени значения скорости и толщина фронта зависят только от давления, температуры и состава свежего заряда. На основе результатов численных и натурных экспериментов были определены параметры инициализации модели.

Локальные образования оксидов азота в камере сгорания водородного двигателя моделировались с использованием расширенного термического механизма Я. Б. Зельдовича. Численная реализация модели осуществляется на основе 3D-CFD-кода FIRE, разработанного фирмой AVL List GmbH (версий 2017-2020 гг.). Ядро FIRE основано на численном методе контрольных объемов (МКО) с использованием усовершенствованного алгоритма SIMPLE. С помощью САПР Solid Works строится твердотельная трехмерная модель расчетной области (Рисунок 1, *а*), соответствующая действительным размерам экспериментального водородного двигателя. Построена подвижная сетка для сквозного расчета области «система впуска-цилиндр-система выпуска» (Рисунок 1, *б*). В отдельных случаях с целью экономии времени счета и компьютерных ресурсов моделируются только внутрицилиндровые процессы без впуска и выпуска.

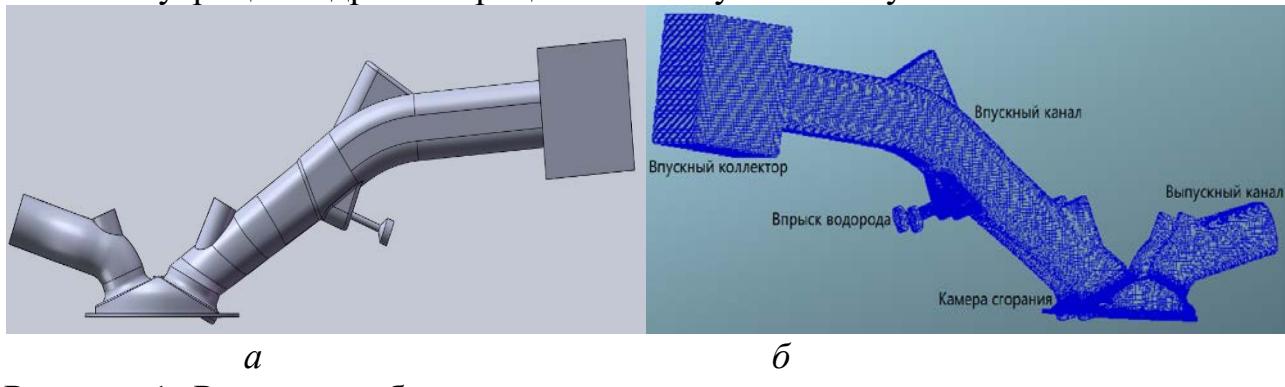


Рисунок 1. Расчетная область экспериментального водородного двигателя: а - твердотельная трехмерная модель; б - сетка для сквозного расчета области «Система впуска-цилиндр-система выпуска»

Особое внимание было уделено уточнению значений параметров для инициализации модели вихревого движения в камере сгорания и для инициализации модели сгорания. Определены значения начальных параметров и параметров инициализации модели, обеспечивающих хорошее согласование между изменениями расчетных и экспериментальных значений таких характерных параметров внутрицилиндрового процесса, как давление (Рисунок 2, *а, б*), интегральное тепловыделение (Рисунок 2, *в*) и скорость тепловыделения (Рисунок 2, *г*). Сравнение с экспериментальными данными подтвердило адаптацию модели к особенностям горения водорода.

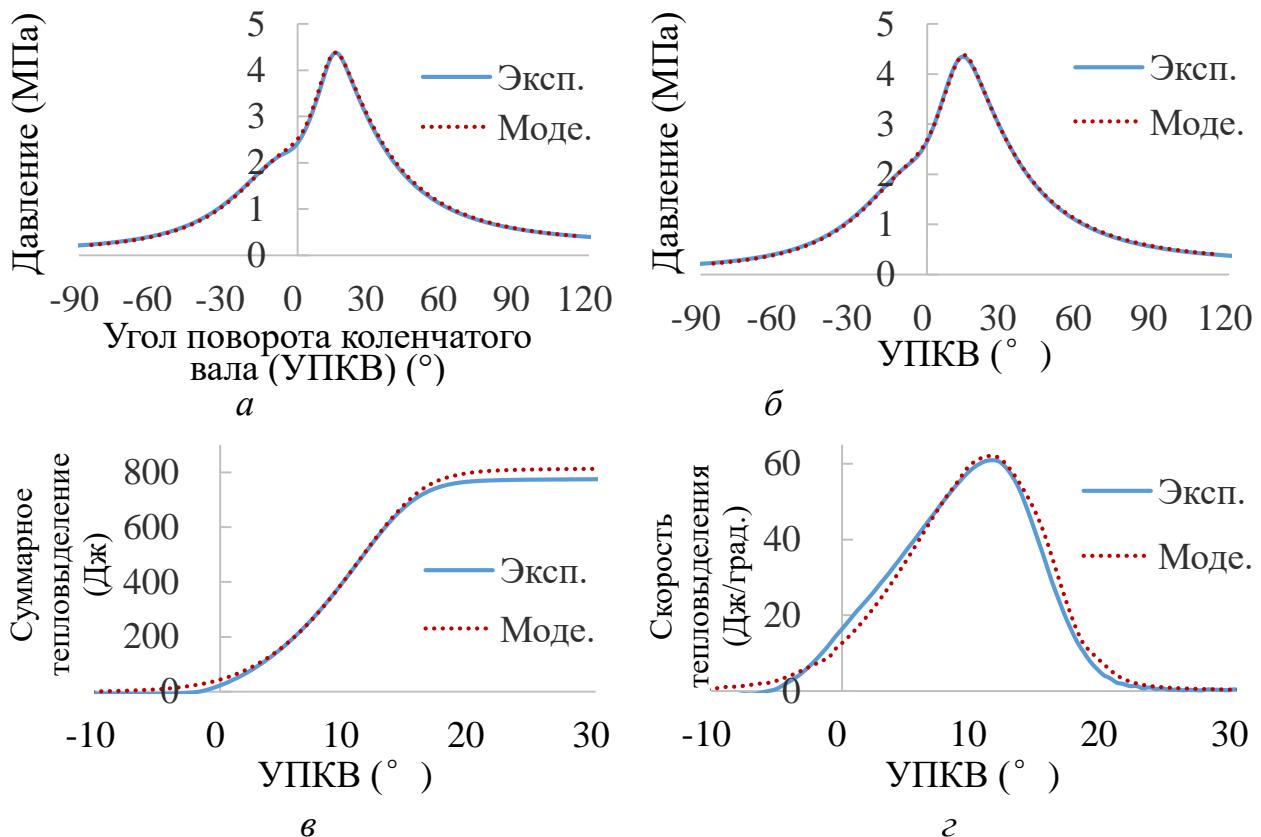


Рисунок 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных характерных параметров внутрицилиндрового процесса опытного водородного двигателя: а - давление в цилиндре на режиме $n=2000$ мин $^{-1}$, $a_B=1,67$; б - давление в цилиндре на режиме $n=3000$ мин $^{-1}$, $a_B=1,64$; в - тепловыделение в цилиндре на режиме $n=2000$ мин $^{-1}$, $a_B=1,67$; г - скорость тепловыделения в цилиндре на режиме $n=2000$ мин $^{-1}$, $a_B=1,67$

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований водородного двигателя, работающего на обедненной смеси. Экспериментальные исследования опытного водородного двигателя проводились при непосредственном участии автора диссертации на испытательном стенде в лаборатории Пекинского технологического института (Рисунок 3), созданной специально для исследования водородных двигателей. Объектом исследований является водородный двигатель с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием, созданный на базе серийного, 4-цилиндрового, атмосферного ДВС с электронным, многоточечным впрыскиванием во впускную систему. В Таблице 2 приведены технические данные экспериментального водородного двигателя. Экспериментальный стенд (Рисунок 4) с исследуемым водородным двигателем оснащен измерительной системой, позволяющей проведение всех необходимых и стандартных измерений таких параметров, как мощность и крутящий момент двигателя, расход топлива, частота вращения коленчатого вала. На стенде также установлены устройства для проведения специальных измерений, прежде всего, для индикации двигателя и определения эмиссии оксидов азота.

Таблица 2.

Технические данные экспериментального водородного двигателя

| Параметр | Значение | Параметр | Значение |
|-----------------|----------|-------------------------|----------|
| Число цилиндров | 4 | Диаметр цилиндра, D, мм | 86 |

Таблица 2. (продолжение)

| | | | |
|---|-----------|---|------------|
| Ход поршня, S , мм | 86 | Длина шатуна, l | 142, 8 |
| Степень сжатия, ϵ , - | 10 | Система охлаждения | Жидкостная |
| Номинальная мощность, N_e , кВт (при частоте вращения n , мин $^{-1}$) | 60 (5500) | Максимальный крутящий момент, M_k , Н·м (при частоте вращения n , мин $^{-1}$) | 111 (4000) |



Рисунок 3. Общий вид экспериментального стенда с водородным двигателем

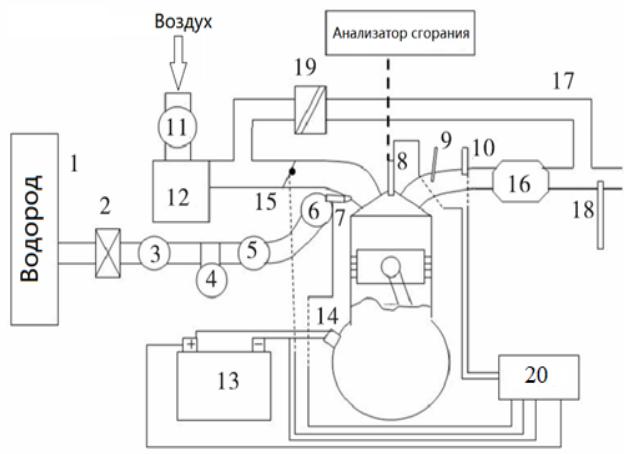


Рисунок 4. Схема экспериментального стенда с водородным двигателем:

1 - Баллон с водородом; 2 - Электромагнитный запорный клапан; 3 - Первичный редукционный клапан (15МПа/0,8МПа); 4 - Расходомер Кориолиса для водорода; 5 - Вторичный редукционный клапан (0,4~0,8 МПа); 6 - Водородная магистраль; 7 - Инжектор водорода; 8 - Датчик давления типа свечи зажигания Kistler 6117B; 9 - Датчик температуры отработавших газов; 10 - Датчик кислорода широкого диапазона; 11 - Расходомер впускного воздуха; 12 - Ресивер (бак) для постоянного давления; 13 - Аккумулятор; 14 - Датчик частоты вращения двигателя и положения (угла поворота) коленчатого вала (Kistler2613B); 15 - Электронный дроссель; 16 - Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор; 17 - Трубопровод системы РОГ; 18 - Канал отбора проб AVL-анализатора отработавших газов; 19 - Ручной клапан РОГ; 20 - Электронный блок управления (ЭБУ, ECU - Electronic Control Unit)

Индикация экспериментального водородного двигателя осуществлялась во всем диапазоне изменения режимов его работы. На Рисунке 5 в качестве примера даны индикаторные диаграммы для частот вращения коленчатого вала $n=2000$ мин $^{-1}$ (Рисунок 5, а) и $n=5000$ мин $^{-1}$ (Рисунок 5, б).

На Рисунке 6 приведена внешняя скоростная характеристика водородного двигателя, полученная при полностью открытом дросселе. Как видно, минимальный удельный эффективный расход водорода $g_e \text{ min} = 87,24 \text{ г}/(\text{kВт}\cdot\text{ч})$ достигается при $n=2500$ мин $^{-1}$, а максимальный $g_e \text{ max} = 98,4 \text{ г}/(\text{kВт}\cdot\text{ч})$ - на режиме максимальной мощности $N_e=60,6$ кВт при $n=5500$ мин $^{-1}$. На режиме холостого хода удельный расход водорода достигает 96 г/(\text{kВт}\cdot\text{ч}).

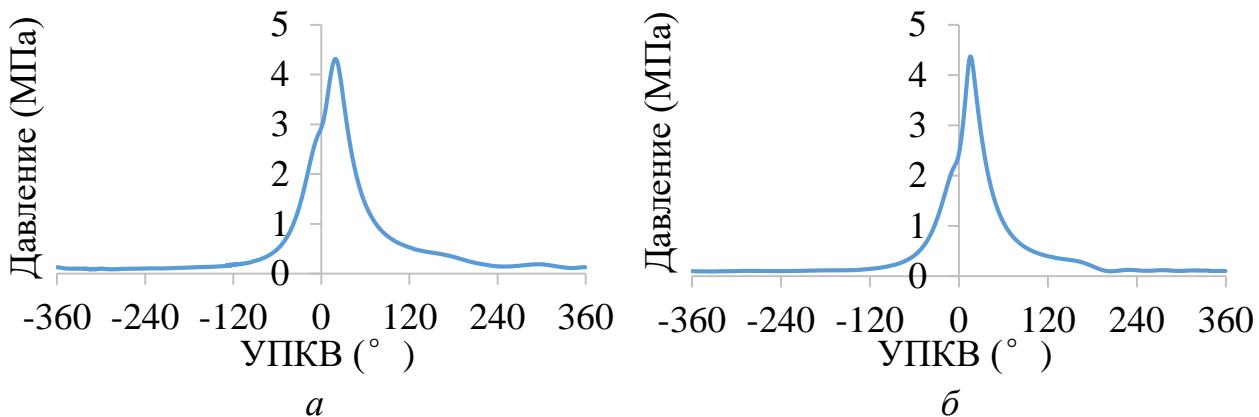


Рисунок 5. Индикаторная диаграмма водородного двигателя: а - при $n=5000$ мин $^{-1}$ (эффективная мощность $N_e=51$ кВт, крутящий момент $M_k=97,4$ Нм); б - при $n=2000$ мин $^{-1}$ (эффективная мощность $N_e=20$ кВт, крутящий момент $M_k=94,85$ Нм)

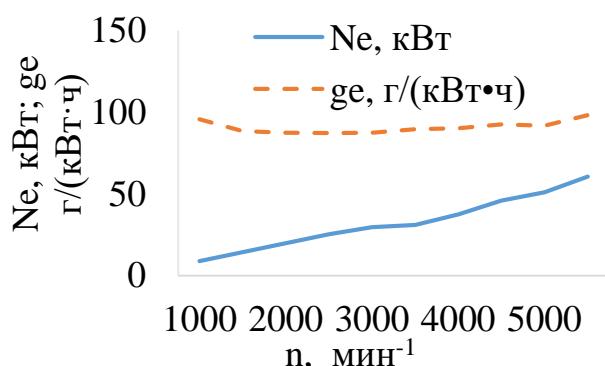


Рисунок 6. Внешняя скоростная характеристика экспериментального водородного двигателя

Они могут привести к аномальным явлениям в рабочем процессе водородного двигателя с внешним смесеобразованием, которые необходимо учесть в процессе экспериментальных исследований: 1. Воспламенению свежего заряда на такте впуска; 2. Детонацию или подобному детонации сгоранию; 3. Калильному зажиганию (преждевременному воспламенению).

На опытном водородном двигателе экспериментальные исследования были проведены на режимах $\alpha_b=1,6-1,7\approx\text{const}$ (Рисунок 7). Режим максимальной мощности $N_e=60,6$ кВт при $n=5500$ мин $^{-1}$, осуществляемый при $\alpha_b=1,35$ приводит к максимальной концентрации эмиссии оксидов азота $[\text{NO}_x]=4392$ ppm, тогда как на режиме $n=5000$ мин $^{-1}$ при $\alpha_b=1,69$ ее значение падает до $[\text{NO}_x]=1360$ ppm (Рисунок 8). Кроме того, с повышением частоты вращения коленчатого вала, когда состав водородно-воздушной смеси приближается к стехиометрическому, растет вероятность аномального сгорания. При работе на экспериментальном водородном двигателе с внешним смесеобразованием следует на всех режимах стремиться к максимальному использованию обедненных водородно-воздушных смесей ($\alpha_b>1,6$), при котором гарантируют устойчивую работу водородного двигателя во всем диапазоне скоростных режимов работы.

Теплофизические свойства водорода, как моторного топлива, такие как: высокая скорость сгорания (скорость ламинарного пламени в воздухе при $p=1.013$ бар, $t=25^\circ\text{C}$ и $\alpha_b=1$ при горении водородно-воздушной смеси примерно в 6 раз выше по сравнению с метано-воздушной (или бензино-воздушной) смесью); широкие концентрационные пределы сгорания ($\alpha_b=0,13-10$); низкое значение минимальной энергии воспламенения (0,017 мДж при $\alpha_b=1$).

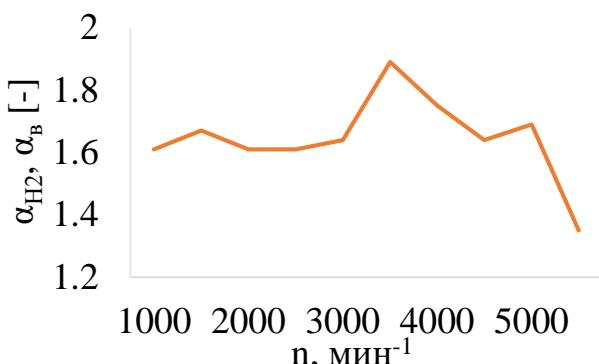


Рисунок 7. Экспериментальные значения коэффициентов избытка воздуха в зависимости от скоростного режима работы водородного двигателя

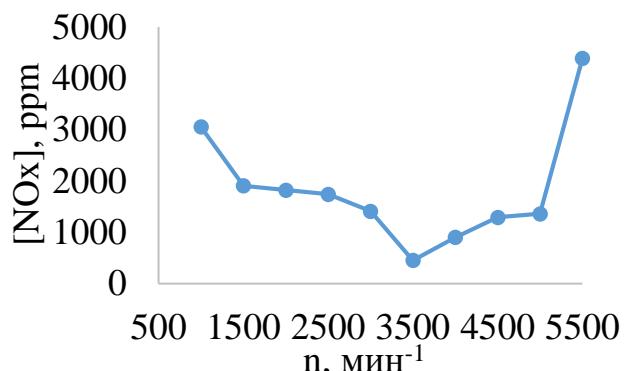


Рисунок 8. Измеренные значения содержания (ppm) оксидов азота $[NO_x]$ в зависимости от скоростного режима работы водородного двигателя

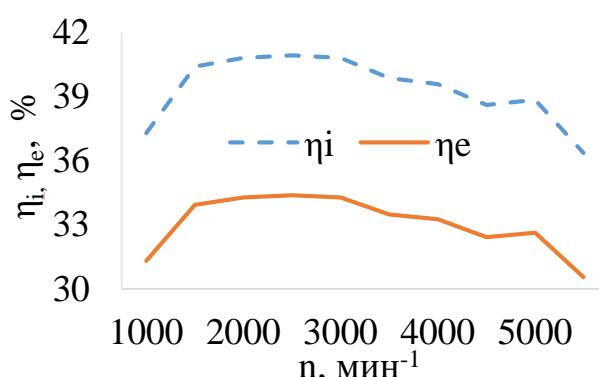


Рисунок 9. Изменение индикаторных КПД η_i (%) и эффективных КПД η_e (%) водородного двигателя в зависимости от скоростного режима работы

Изменения индикаторных η_i и эффективных η_e КПД водородного двигателя (Рисунок 9) показывают, что самое низкое значение $\eta_e = 30,55 \%$ имеется на режиме максимальной мощности $n=5500 \text{ мин}^{-1}$ при $\alpha_B=1,35$.

Таким образом, работа исследуемого водородного двигателя на режиме максимальной мощности не рекомендуется как с экологической точки зрения, так и из-за высокой вероятности аномального сгорания и низкого эффективного КПД.

Четвертая глава посвящена экспериментальным и расчетным исследованиям влияния степени РОГ на рабочий процесс и процесс образования оксидов азота в камере сгорания водородного двигателя. Экспериментальные результаты, приведенные на Рисунке 10, показывают, что применение РОГ (степень РОГ $z=15\%$) при $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ приводит к существенному сокращению эмиссии NO_x (почти в 3 раза). Рисунок 11, где приведены изменения концентраций NO_x в выпускных газах исследуемого водородного двигателя в зависимости от коэффициента избытка воздуха α_B при частоте вращения коленчатого вала $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ и степени РОГ $z=15 \%$, полученные экспериментально и моделированием, подтверждает надежность и достоверность разработанной 3D-модели внутрицилиндровых процессов. Хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений количества оксидов азота (Рисунок 12), полученное на скоростном режиме работы $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ также указывает на надежность и пригодность разработанной 3D-математической модели при исследовании экологических показателей водородного двигателя, оснащенного системой РОГ.

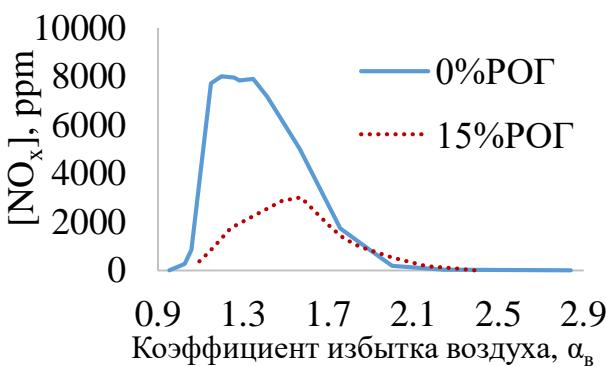


Рисунок 10. Результаты экспериментального исследования эмиссии оксидов азота в зависимости от степени РОГ (Режим работы водородного ПДВС $n=1000 \text{ мин}^{-1}$)

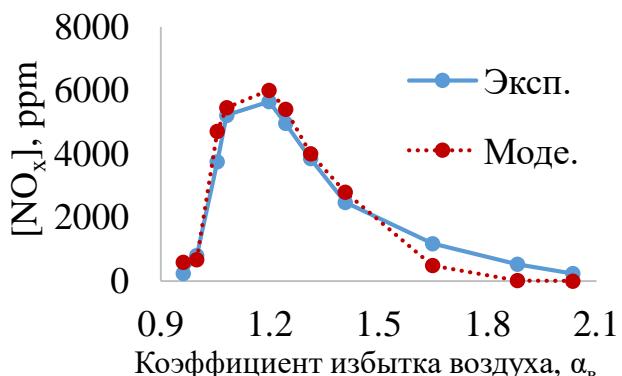


Рисунок 11. Влияние коэффициента избытка воздуха на эмиссии оксидов азота при неизменных значениях частоты вращения коленчатого вала $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ и степени РОГ $z=15 \%$

Использование в водородном двигателе РОГ оказывает влияние на параметры рабочего процесса, прежде всего, на изменение давления и температуры в цилиндре, тем самым заметно действует как на эффективные, так и на экологические показатели рабочего цикла. Исследование влияния РОГ на показатели экспериментального водородного двигателя проводились для всего диапазона изменения как скоростного, так и нагрузочного режимов. В качестве примера рассматривается влияние РОГ на индикаторные параметры водородного двигателя на двух режимах с применением обедненной смеси: $\alpha_v=1,695$ и $\alpha_v=2,0$ при частотах вращения коленчатого вала $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ и $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ соответственно.

На Рисунке 13 приведены изменения давления в цилиндре (индикаторные диаграммы) водородного двигателя, полученные непосредственным измерением с помощью пьезокварцевого датчика Kistler и моделированием на режиме $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ без РОГ ($z=0 \%$). Очевидно, что данный режим работы следует принимать в качестве базового при исследовании влияния РОГ на индикаторные показатели водородного двигателя.

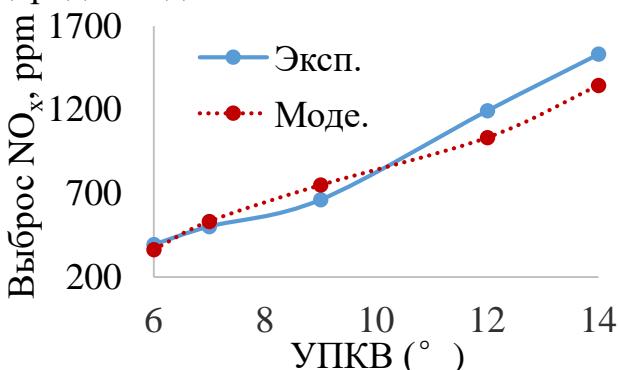


Рисунок 12. Влияние угла опережения зажигания на эмиссии оксидов азота на режиме $n=5000 \text{ мин}^{-1}$

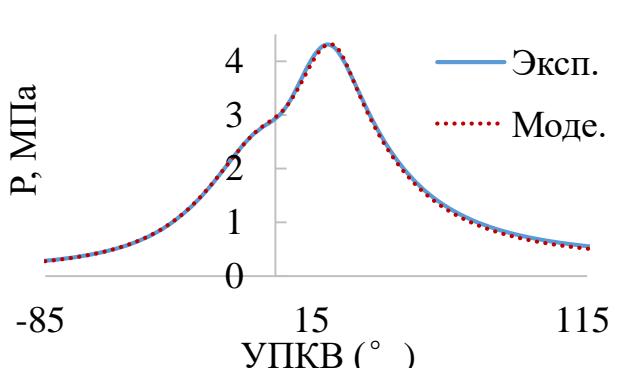


Рисунок 13. Экспериментальные и расчетные индикаторные диаграммы на режиме $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ и $\alpha_v=1,695$ без РОГ

Изменение осредненной по объему цилиндра температуры рабочего тела в зависимости от степени РОГ z при $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ и $\alpha_{v0}=1,695$ (Рисунок 14) показывает, что снижение температурного уровня цикла заметнее при высоких значениях z .

При $n=3000$ мин⁻¹ и более сильно обедненной смеси изменения температур рабочего тела носят несколько иной характер (Рисунок 15). РОГ при $\alpha_{b0}=2,0$ не способствует эффективному снижению температуры рабочего тела, наоборот, может в определенной степени увеличить образование NO_x . На этом режиме для образования NO_x при росте степени РОГ до 13,3 %, решающую роль играет подогрев свежего заряда в результате добавления высокотемпературного водяного пара, что приводит к повышению значений начальной и максимальной температур сгорания. На режиме $n=5000$ мин⁻¹ и $\alpha_{b0}=1,695$ характер влияния РОГ на максимальную температуру в водородном двигателе такой же как в традиционных ДВС (Рисунок 16) - с ростом степени РОГ происходит снижение T_z . Особенность изменения температурного уровня имеет свое отражение на динамику образования NO_x в зависимости от степени РОГ. Как видно из Рисунка 17 применение РОГ со степенью 23,8 % на режиме $n=5000$ мин⁻¹ по сравнению с режимом без РОГ приводит к снижению количества оксидов азота на 74%. При $\alpha_{b0}=2,0$ использование РОГ дает эффект только при большой степени РОГ 23,8 %. Таким образом, при высоких значениях α_b количество NO_x может быть уменьшено только тогда, когда степень РОГ достаточно велика. С другой стороны, увеличение степени РОГ может привести к снижению мощности и КПД двигателя. В связи с этим применение РОГ с целью уменьшения эмиссии NO_x на режимах низких нагрузок нецелесообразно.

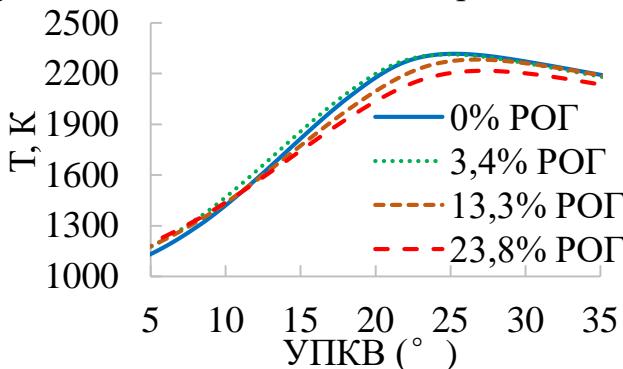


Рисунок 14. Изменение температуры рабочего тела на режиме $n=5000$ мин⁻¹ и $\alpha_{b0}=1,695$ в зависимости от степени РОГ

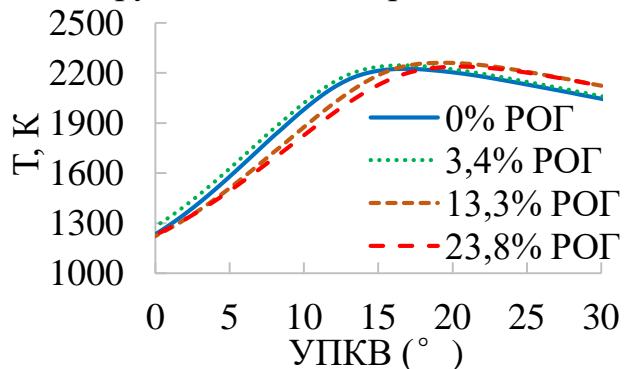


Рисунок 15. Изменение температуры рабочего тела на режиме $n=3000$ мин⁻¹ и $\alpha_{b0}=2,0$ в зависимости от степени РОГ

На Рисунке 18 приведены мгновенные температурные поля для двух случаев - без РОГ и с РОГ 23,8 % - в характерных моментах времени: в ВМТ, при максимальном давлении в цилиндре и в момент, соответствующий сгоранию 90% водорода. В начальный период сгорания, значит в ВМТ, максимальные значения локальных температур в случае применения РОГ снижаются почти на 100 градусов относительно без РОГ. Более низкая температура в начальный период сгорания при использовании РОГ способствует поддержанию относительно низкого температурного уровня в течение всего рабочего цикла и приводит к снижению оксидов азота на 74 %. На Рисунке 19 показано изменение локальных мгновенных скоростей движения рабочего тела. В целом, не отрицая роль локальных скоростей движения и турбулентности, влияние локальных температур на эмиссию оксидов азота значительно сильнее.

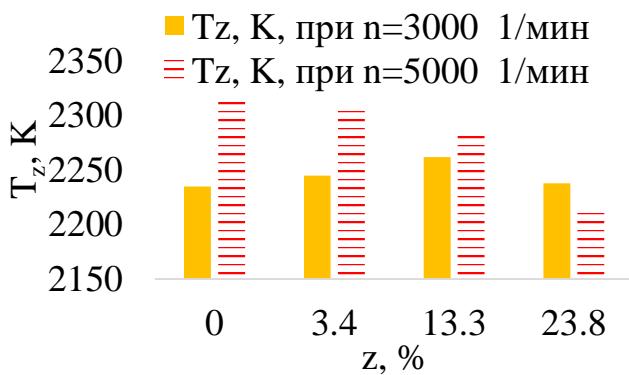


Рисунок 16. Изменения максимальной температуры рабочего цикла T_z в зависимости от степени РОГ z на режимах $n=3000$ мин $^{-1}$ и $n=5000$ мин $^{-1}$

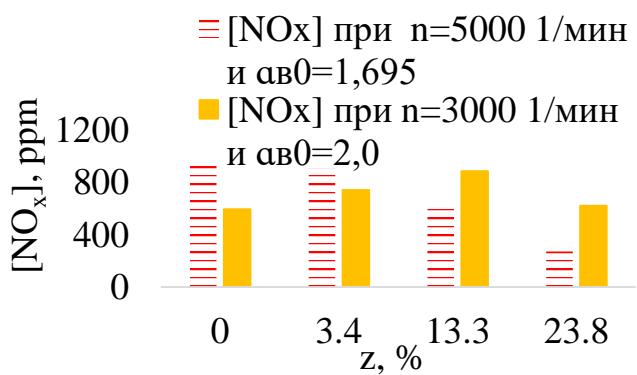


Рисунок 17. Влияние степени РОГ z на суммарное количество образования оксидов азота на режимах работы $n=3000$ мин $^{-1}$, $\alpha_{B0}=2,0$ и $n=5000$ мин $^{-1}$, $\alpha_{B0}=1,695$

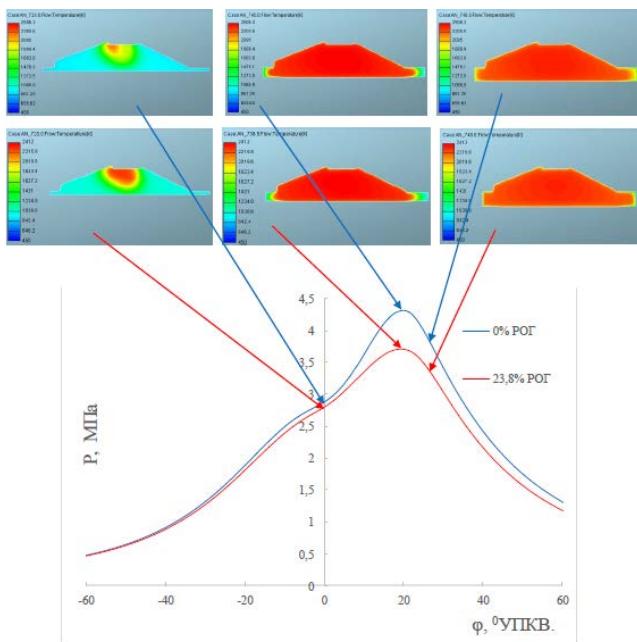


Рисунок 18. Изменение локальных мгновенных температур на режиме $n=5000$ мин $^{-1}$ в зависимости от степени РОГ

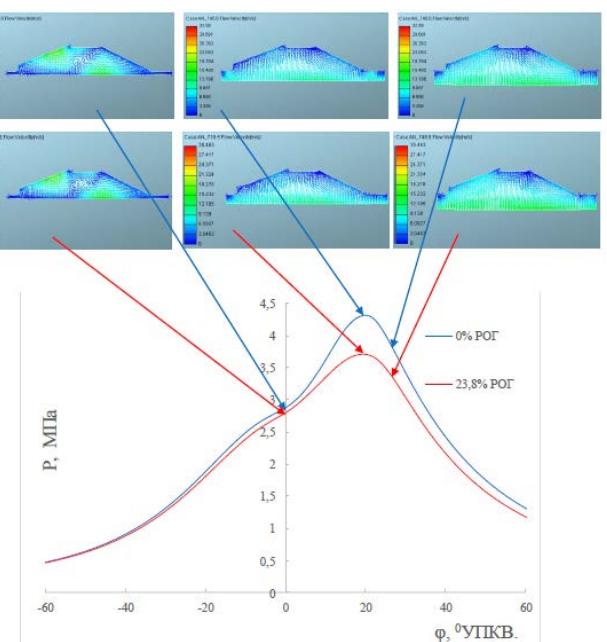


Рисунок 19. Изменение локальных мгновенных скоростей на режиме $n=5000$ мин $^{-1}$ в зависимости от степени РОГ

Изменения локальных температур и локальных скоростей движения влияют на скорость образования (Рисунок 20) и количества (Рисунок 21) оксидов азота в камере сгорания водородного двигателя. В момент достижения максимального давления в цилиндре максимальное значение мгновенной скорости образования оксидов азота с применением РОГ снижается в 3,8 раз, а максимальное мгновенное значение количества NO_x - снижается в 2,4 раза. К завершению процесса сгорания (к моменту выгорания 90% водорода), значение максимальных значений скорости образования и количества оксидов азота снижаются в 4,3 и 2,14 раз соответственно. Из Рисунков 20 и 21 подтверждается целесообразность применения РОГ в водородном двигателе с целью уменьшения эмиссии оксидов азота. Следует подчерк-

нуть, что аналогичные численные моделирования были проведены для других степеней РОГ, и они также согласуются с этими результатами. Дальнейшее увеличение степени РОГ $>23,8\%$ одновременно с уменьшением эмиссии NO_x может привести к заметному ухудшению эффективных показателей.

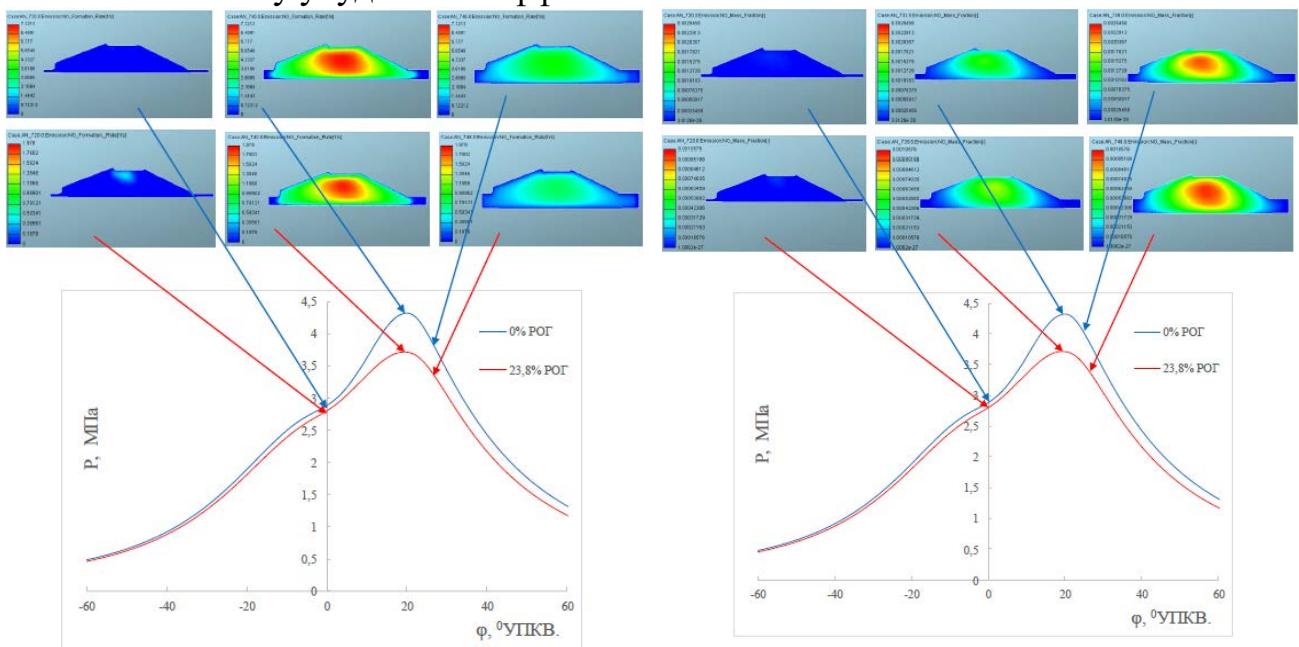


Рисунок 20. Изменение локальных мгновенных скоростей образования оксидов азота на режиме $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ в зависимости от степени РОГ

Рисунок 21. Изменение локальных мгновенных массовых долей оксидов азота на режиме $n=5000 \text{ мин}^{-1}$ в зависимости от степени РОГ

Проведение исследования показали, что эмиссию оксидов азота в водородном двигателе при правильной организации рабочего процесса и применении РОГ можно минимизировать до требований Euro-6 без установки на двигателе специальной системы нейтрализации NO_x .

Основные выводы по диссертационной работе

1. При работе поршневого водородного двигателя на смеси, состав которой приближается к стехиометрическому, повышается вероятность возникновения аномальных процессов, таких как: обратная вспышка, преждевременное воспламенение и детонация, связанных, прежде всего, с высокой температурой остаточных газов. Кроме того, высокие температуры сгорания водорода приводят к образованию NO_x , снижение которых по опыту традиционных ДВС целесообразно путем использования РОГ.

2. Впервые для исследования внутрицилиндровых процессов в водородном двигателе в 3D - постановке разработана, верифицирована и реализована математическая модель на основе фундаментальных уравнений Навье-Стокса, Фурье-Кирхгофа, Фика и неразрывности, преобразованных в форме Рейнольдса посредством осреднения по методу Фавра, и дополненных $k-\zeta-f$ -моделью турбулентности, предназначеннной для моделирования процессов в поршневых двигателях. Процесс сгорания моделируется с помощью расширенной модели когерентного пламени

(ECFM-модель), адаптированной автором для горения водорода с помощью экспериментально верифицированных параметров инициализации. Процесс образования оксидов азота моделируется с использованием расширенного термического механизма Я.Б. Зельдовича. Результаты численных экспериментов подтверждены полученными экспериментальными данными.

3. На основе экспериментальных данных, полученных в стендовых условиях работы опытного водородного двигателя, представляющего собой автомобильный, серийный, бензиновый двигатель, конвертированный на газообразный водород, проведена верификация разработанной 3D-математической модели теплофизических процессов в водородном двигателе. Для всех характерных режимов верификация модели осуществлялась в два этапа: на начальном этапе сравнивались расчетные и экспериментальные индикаторные диаграммы, а на заключительном - концентрации оксидов азота в зависимости от различных факторов.

4. При непосредственном участии автора модифицирована, переоснащена и оттестирована экспериментальная установка, созданная в лаборатории ПТИ, для исследования водородного двигателя. В стендовых испытаниях экспериментального водородного двигателя для всего диапазона режимов работы были зарегистрированы эффективные и экологические показатели: индикаторная диаграмма, коэффициент избытка воздуха, КПД двигателя, содержание оксидов азота в выпускных газах, степень РОГ и т.д.

5. Работа водородного двигателя на режиме ($N_e=60,7$ кВт при $n=5500$ мин $^{-1}$ и $\alpha_b=1,35$) с целью получения мощности, эквивалентной базовому бензиновому двигателю, не рекомендуется, как с точки зрения увеличенной эмиссии оксидов азота, так и из-за высокой вероятности аномального сгорания и относительно низкого значения эффективного КПД ($\eta_e=0,30$).

6. Установлено, что в диапазоне изменений скоростного режима работы $n=1500-5000$ мин $^{-1}$ и состава смеси $\alpha_b=1,61-1,69$ эффективный КПД экспериментального водородного двигателя принимает вполне приемлемые для двигателей, работающих по термодинамическому циклу Отто, значения $\eta_e=0,33-0,35$. В целом при работе на обедненной смеси ($\alpha_b \geq 1,6$) обеспечено предотвращение аномальных явлений и получены вполне приемлемые значения эффективных и экологических показателей.

7. Применение РОГ в водородном двигателе особенно эффективно при условии относительно низкого коэффициента избытка воздуха α_b и высокой частоты вращения ($\alpha_{b0}=1,695$ и $n=5000$ мин $^{-1}$). При этом количество NO_x уменьшается пропорционально с ростом степени РОГ, в частности, в случае $z=23,8$ % количество оксидов азота в цилиндре снижается на 74,2% и отпадает необходимость использования систем последующей обработки ОГ. На режиме с относительно высоким коэффициентом избытка воздуха и относительно низкой частотой вращения коленчатого вала ($\alpha_{b0}=2,0$ и $n=3000$ мин $^{-1}$) применение РОГ не эффективно. Предполагается, что это связано с преобладающей ролью нагрева свежего заряда после перемешивания с высокотемпературным перегретым водяным паром, приводящего к повышению начальной, а потом максимальной температуры сгорания.

8. Скорость образования NO_x , а также количество NO_x в цилиндре к моменту нахождения поршня в ВМТ ничтожно малы, как в случае без РОГ, так и при РОГ.

С развитием процесса сгорания содержание оксидов азота в цилиндре стремительно растет и к моменту времени, когда $p=p_z$, максимальные скорости образования NO_x с применением РОГ ($z=23,8\%$) снижаются в 3,8 раз, а максимальное мгновенное значение массовой доли NO_x - в 2,4 раза. К моменту выгорания 90% введенного в цилиндр водорода, использование РОГ ($z=23,8\%$) снижает максимальных значений скорости образования и количество оксидов азота в 4,3 и 2,14 раз, соответственно.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Сравнительный анализ образования оксидов азота в камерах сгорания традиционного и водородного дизелей / Цытянь Чжан [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. 2019. № 6 (72). С. 38-46 (0,70 п.л./0,25 п.л.).
2. Effect of Vortex Motion Charge on Non-Stationary Heat Transfer in the Combustion Chamber of a Hydrogen Diesel / Citian Zhang [et al.] // International Scientific Journal Problems of Mechanics. 2020. № 2 (79). Р. 37-41 (0,50 п.л./0,15 п.л.).
3. Экспериментальное исследование рабочего процесса поршневого двигателя с впрыскиванием газообразного водорода во впускную систему / Цытянь Чжан [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. 2020. № 5 (77). С. 49-61 (0,80 п.л./0,30 п.л.).
4. Локальный теплообмен в камере сгорания водородного двигателя, работающего на обедненной горючей смеси / Цытянь Чжан [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 1. С. 97-107 (0,70 п.л./0,20 п.л.).
Local Heat Exchange in the Combustion Chamber of a Hydrogen Engine Running on a Lean Fuel Mixture / Citian Zhang [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2021. № 1. Р. 79-87 (0,70 п.л./0,20 п.л.).
5. Экспериментальное исследование и 3D-моделирование рабочего процесса водородного двигателя, работающего на обедненной смеси / Цытянь Чжан [и др.] // Вестник Машиностроения. 2021. № 1. С. 28-34 (0,50 п.л./0,15 п.л.).
Experimental Study and 3D Modeling of Working Process of Hydrogen Engine Running on Lean Fuel Mixture / Citian Zhang [et al.] // Russian Engineering Research. 2021. № 1. Р. 296-301 (0,50 п.л./0,15 п.л.).
6. Influence of the exhaust gas recirculation on formation of NO_x in the hydrogen engine working on the leaked mixture (Experiment and 3D modeling) / Citian Zhang [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1100. Art. 012013. Р. 1-7 (0,60 п.л./0,20 п.л.).
7. Влияние регулируемых параметров рабочего процесса на образование оксидов азота в водородном двигателе / Цытянь Чжан [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 11. С. 27-35. (0,85 п.л./0,40 п.л.).
8. Эффективные показатели водородного двигателя с модифицированной системой топливоподачи при работе на обедненной смеси / Цытянь Чжан [и др.] // Труды НАМИ. 2021. № 3 (286). С. 57-65. (0,70 п.л./0,30 п.л.).