

На правах рукописи



Левин Юрий Васильевич

**УЛУЧШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ И
ЭКОЛОГИЧНОСТИ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ
ЗА СЧЕТ ДОБАВОК СВОБОДНОГО ВОДОРОДА
К ОСНОВНОМУ ТОПЛИВУ**

05.04.02 – «Тепловые двигатели»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2016

Работа выполнена на кафедре «Теплотехника и гидравлика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Федянов Евгений Алексеевич.

Официальные оппоненты: **Кульчицкий Алексей Рэмович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент,
ООО «Завод инновационных продуктов «КТЗ», г. Владимир, научно-методический отдел координации сертификационных работ, начальник;

Тихомиров Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра «Энергетические установки и тепловые двигатели», доцент.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Голыяттинский государственный университет».

Защита состоится «16» февраля 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.165.04, созданного на базе Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, ауд. 1315.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева и на сайте www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii

Автореферат разослан «__» декабря 2016 г.

Отзыв на автореферат с подписью, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.165.04, и копию по электронной почте tig@vstu.ru и ait.ngtu@gmail.com

Ученый секретарь
диссертационного совета

Лев Николаевич Орлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Роторно-поршневые двигатели (РПД) Ванкеля имеют преимущества перед поршневыми двигателями с возвратно-поступательным движением поршней по удельным показателям мощности, металлоемкости, уравновешенности, трудоемкости изготовления, однако несколько проигрывают по расходу топлива и содержанию токсичных компонентов в отработавших газах. Последним, в частности, объясняется то, что РПД Ванкеля практически не используют на автомобилях, хотя для других областей применения в мире производят широкий спектр двигателей этого типа различной мощности.

Показатели РПД можно улучшить, увеличив скорость распространения пламени при сгорании топлива. Из опыта, накопленного преимущественно для поршневых двигателей, известно положительное влияние добавок свободного водорода на скорость и полноту сгорания углеводородных топлив. Можно с уверенностью предполагать, что в РПД добавки водорода могут быть ещё более эффективными, чем в поршневых ДВС, и позволят в значительной мере устранить один из недостатков РПД, а именно, недогорание топливовоздушной смеси, обусловленное особенностями процесса распространения пламени в камерах сгорания двигателей этого типа. Улучшение топливной экономичности и экологических показателей РПД Ванкеля за счет добавок свободного водорода к основному топливу может сделать этот тип двигателя более конкурентоспособным не только в качестве силовых установок маломерных судов и легкомоторной авиации, но и в качестве силовых установок мобильных наземных машин.

Цель диссертационной работы заключается в повышении топливной экономичности и снижении содержания несгоревших углеводородов в отработавших газах РПД Ванкеля за счет использования добавок свободного водорода к основному углеводородному топливу.

Задачи исследования:

- 1) разработать математическую модель рабочего процесса РПД, позволяющую исследовать процесс распространения пламени в камере РПД с учетом добавки свободного водорода к основному топливу;
- 2) оборудовать лабораторную установку с камерой сгорания постоянного объема и экспериментально определить зависимость нормальной скорости распространения ламинарного фронта пламени от величины добавки свободного водорода в основную топливовоздушную смесь;
- 3) оборудовать стенд для испытаний РПД, работающего с добавками свободного водорода к основному топливу;
- 4) провести теоретические исследования влияния добавок свободного водорода на процесс распространения пламени в камере РПД для определения необходимой величины добавки свободного водорода для полного сгорания топливовоздушной смеси и изучить возможность уменьшения величины требуемой добавки за счет фазирования момента подачи водорода;

5) провести испытания РПД Ванкеля, работающего с добавками свободного водорода в основную бензовоздушную смесь, в том числе с фазированием момента начала подачи водорода относительно начала процесса впуска.

Методы исследования. Теоретические исследования влияния добавок водорода к основному углеводородному топливу на процесс сгорания в РПД Ванкеля с помощью математического моделирования распространения турбулентного пламени. Экспериментальные исследования на установке с камерой сгорания постоянного объема с целью получения необходимых для математического моделирования данных и стендовые испытания РПД Ванкеля с целью проверки результатов теоретических исследований.

Достоверность и обоснованность научных положений работы обуславливаются использованием фундаментальных положений термодинамики, теории ДВС при моделировании рабочего процесса РПД Ванкеля, подтверждением результатов моделирования экспериментальными данными. Экспериментальные данные получены с применением современного измерительного и газоанализирующего оборудования, в том числе с использованием системы индицирования фирмы Kistler.

Объект исследований. Односекционный роторно-поршневой двигатель ВАЗ-311 Волжского автомобильного завода.

Научная новизна работы. Впервые теоретически и экспериментально изучено влияние добавок свободного водорода в основную бензовоздушную смесь на показатели РПД Ванкеля при его работе на режимах частичных нагрузок и холостого хода. Определено минимально необходимое количество добавки водорода для полного сгорания топлива в РПД на различных режимах работы. Предложен и реализован способ расслоения топливовоздушного заряда по камере сгорания РПД с целью уменьшения величины добавки водорода, требуемой для полного сгорания основного топлива. Определены особенности влияния различных по величине добавок водорода на содержание продуктов неполного сгорания топлива в отработавших газах РПД при обеднении топливовоздушной смеси.

Практическая ценность.

1. Разработанная математическая модель рабочего процесса РПД Ванкеля с внешним смесеобразованием и искровым зажиганием, учитывающая использование добавок водорода, является инструментом для поиска путей снижения неполноты сгорания топливовоздушной смеси.

2. Использование добавок водорода может быть применено для улучшения показателей РПД по топливной экономичности и экологичности.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель, учитывающая влияние добавок свободного водорода на процесс распространения пламени по камере сгорания РПД;
- результаты экспериментальных исследований влияния добавок водорода на нормальную скорость распространения пламени исходной топливовоздушной смеси, проведенных на камере сгорания постоянного объема;

– результаты экспериментальных исследований влияния добавок водорода на удельный эффективный расход топлива и выбросы продуктов неполного сгорания РПД Ванкеля на режимах холостого хода и частичных нагрузок;

– способ фазированной подачи водорода в РПД Ванкеля на такте впуска, обеспечивающий сокращение его расхода.

Реализация результатов работы. Материалы работы используются в учебном процессе для подготовки бакалавров и магистров направления 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 43.03.01 «Сервис» при изучении дисциплин «Экология автомобильного транспорта» и «Газобаллонное оборудование автомобилей».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлены и одобрены на ежегодных научных конференциях Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград 2012–2016 гг.; международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем», г. Волгоград 2013 г.; межрегиональном форуме «Энергосбережение и энергоэффективность», г. Волгоград 2014 г.; IV международной научно-технической конференции «Резниковские чтения», г. Тольятти, 2015 г.; всероссийской научно-технической конференции для молодых учёных и студентов с международным участием, г. Пенза, 2015 г.; 2-ой молодёжной научно-практической конференции «Молодые учёные – альтернативной транспортной энергетике», г. Воронеж, 2015 г.; 2-ой Международной научной конференции «Актуальные вопросы транспорта в современных условиях», г. Саратов, 2015 г.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 8 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК, получен патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 128 страниц машинописного текста, 44 рисунка и 3 таблицы. Список литературы составляет 128 наименований, из них 55 на английском языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование темы диссертации и приведена общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены конструктивные особенности РПД Ванкеля, представлены основные преимущества и недостатки данного типа двигателя по сравнению с поршневыми двигателями. На основе результатов исследований, выполненных И.В. Зиновьевым и Е. В. Шатровым в НАМИ, М.В. Дульгером и Г.Н. Злотиным в ВолгГТУ, а также специалистами фирмы «Mazda», проанализированы причины повышенного расхода топлива и выбросов несгоревших углеводородов с отработавшими газами в РПД Ванкеля. Показаны основные способы снижения неполноты сгорания топливовоздушной смеси в РПД Ванкеля.

Исходя из исследований, выполненных на поршневых двигателях с добавками водорода коллективами научных сотрудников Волгоградского политехнического института (Ю. А. Трелин, Г. Н. Злотин, В. З. Гибадуллин), Тольяттинского государственного университета (А. П. Шайкин, Л. Н. Бортников, В. В. Смоленский, М. М. Русаков), Института проблем машиностроения Украинской Академии наук (И. Л. Варшавский, А. И. Мищенко, В. Д. Савицкий, П. М. Канило), Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов), МГТУ им. Н. Э. Баумана (Р. З. Кавтарадзе), а также в НАМИ (Е. В. Шатров, А. Ю. Раменский, М. В. Кузнецов, В. Ф. Каменев, Н. А. Хрипач), сделан вывод о том, что с учетом особенностей протекания рабочего процесса в РПД наиболее подходящим способом снижения неполноты сгорания топливовоздушной смеси является использование водорода в качестве добавки к основному углеводородному топливу.

Глава завершается формулировкой цели и задач исследования.

Во второй главе описывается математическая модель процесса сгорания в РПД, работающего с добавками водорода к основному углеводородному топливу. Математическая модель учитывает однонаправленное движение заряда, потери теплоты в стенки камеры сгорания, текущие геометрические параметры рабочей камеры и значения теплофизических характеристик топливовоздушной смеси и продуктов сгорания. Модель дополнена соотношениями, которые учитывают влияние добавок свободного водорода на скорость распространения пламени, на толщину пристеночного слоя гашения пламени, на длительность периода индукции начального очага горения.

Математическая модель базируется на следующей системе уравнений.

Уравнениях сохранения энергии в дифференциальной форме для зон исходной топливовоздушной смеси:

$$\frac{k_{ui}}{k_{ui}-1} p \frac{dV_{ui}}{d\psi} + \frac{1}{k_{ui}-1} V_{ui} \frac{dp}{d\psi} = c_{pui} \cdot T_{ui} \frac{dm_{ui}}{d\psi} - \frac{dQ_{Wui}}{\omega}, \quad (1)$$

для зон продуктов сгорания:

$$\begin{aligned} \frac{k_{bj}}{k_{bj}-1} p \frac{dV_{bj}}{d\psi} + \frac{1}{k_{bj}-1} V_{bj} \frac{dp}{d\psi} = (Q_u - Q_{diss}) \frac{dm_{bj}}{d\psi} - \frac{dQ_{Wui}}{\omega} + \\ + c_{puj} \cdot T_{uj} \frac{dm_{bj1}}{d\psi} + c_{pu(j+1)} \cdot T_{u(j+1)} \frac{dm_{bj2}}{d\psi}, \end{aligned} \quad (2)$$

где i – номер зоны исходной топливовоздушной смеси; j – номер зоны продуктов сгорания; p – давление в рабочей камере РПД; V_{ui} , m_{ui} и V_{bj} , m_{bj} – соответственно объемы и массы в i -ой зоне исходной топливовоздушной смеси и в j -ой зоне продуктов сгорания; T_{ui} – температура соответствующей зоны исходной топливовоздушной смеси; ψ – угол поворота ротора; ω – угловая скорость вращения ротора; Q_u – теплота сгорания топливовоздушной смеси; Q_W и Q_{diss} – соответственно потери теплоты в стенки камеры сгорания и на диссоциацию; k и c_p – соответственно показатель адиабаты и изобарная теплоемкость.

Уравнение сохранения объемов в дифференциальной форме:

$$\sum_1^3 \frac{dV_{ui}}{d\psi} + \sum_1^2 \frac{dV_{bj}}{d\psi} = \frac{dV_{\Sigma}}{d\psi}, \quad (3)$$

где V_{Σ} – объем всей камеры сгорания при текущем положении ротора.

Предполагается отсутствие утечек заряда через уплотнительные элементы ротора, в результате чего масса смеси в рабочей полости двигателя считается фиксированной и определяется исходя из уравнения сохранения массы:

$$\sum_{i=1}^3 m_{ui} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 m_{bij} = m_a, \quad (4)$$

где m_a – общая масса заряда в рабочей камере двигателя.

Уравнения состояния для зон исходной топливовоздушной смеси и продуктов сгорания:

$$p \cdot V_u = m_u \cdot R_u \cdot T_u, \quad (5)$$

$$p \cdot V_b = m_b \cdot R_b \cdot T_b. \quad (6)$$

Система уравнений (1) – (6) решается относительно неизвестных функций методом Рунге-Кутты. При этом увеличение массы продуктов сгорания и соответственно уменьшение массы свежего заряда определяются путем моделирования процесса распространения турбулентного пламени.

Для описания процесса распространения пламени в рабочей камере РПД применяется модель «погружения». Турбулентные моли характерного масштаба «погружаются» из свежей смеси во фронт пламени, где происходит их сгорание по поверхностному механизму с ламинарной скоростью w_n . Размер сгорающих молей при этом соответствует микромасштабу Тейлора λ_t , который в свою очередь пропорционален интегральному масштабу турбулентности L_t . Передняя граница пламени принимается как сглаженная поверхность, огибающая максимально выступающие очаги пламени.

Характерное время τ_b выгорания турбулентных молей находится следующим образом:

$$\tau_b = \frac{\lambda_t}{w_n}, \quad (7)$$

Исходя из найденного значения τ_b , скорость выгорания топливовоздушной смеси во фронте пламени находится по формуле:

$$\frac{dm_b}{d\psi} = \frac{m_e - m_b}{\omega \cdot \tau_b}, \quad (8)$$

где m_e – масса свежего заряда, погружаемого во фронт пламени; m_b – масса продуктов сгорания; ω – угловая скорость вращения ротора.

С целью определения массы заряда, погруженной во фронт пламени, предварительно определяется скорость погружения исходной смеси во фронт пламени:

$$\frac{dm_e}{d\psi} = \frac{\rho_u \cdot A_f \cdot (w' + w_n)}{\omega}, \quad (9)$$

где ρ_u и w_n – соответственно плотность и нормальная скорость распространения ламинарного пламени исходной смеси; A_f и w' – площадь фронта пламени и интенсивность турбулентных пульсаций.

В свою очередь интенсивность турбулентных пульсаций пропорциональна средней скорости потока:

$$w' = C_1 \cdot |\bar{w}| \cdot \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0,5}, \quad (10)$$

где \bar{w} – средняя скорость потока в сечении камеры сгорания на границе фронта пламени; p и p_a – соответственно текущее давление в рабочей камере и давление в начале такта сжатия, при этом отношение $\left(\frac{p}{p_a} \right)^{0,5}$ учитывает уменьшение микромасштаба турбулентности при сжатии; C_1 – константа порядка 0,1.

Скорости распространения ламинарного пламени для каждой из зон исходной топливоздушной смеси в камере сгорания РПД вычисляются на основе значений скорости сгорания при нормальных условиях:

$$w_n = w_{n0} \left(\frac{p}{p_o} \right)^{-0,25} \left(\frac{T_u}{T_o} \right)^{1,8}, \quad (11)$$

где w_{n0} – нормальная скорость распространения ламинарного пламени; p_o и T_o – соответственно давление и температура при нормальных условиях.

Влияние добавок водорода на величину нормальной скорости сгорания топливоздушной смеси w_{no} учитывали пересчетом нормальной скорости распространения пламени в исходной углеводородовоздушной смеси по формуле:

$$w_{no} = w_{nCH} \cdot (1 - g_{H_2}) + w_{nH_2} \cdot g_{H_2}, \quad (12)$$

где w_{nCH} , w_{nH_2} – нормальные скорости пламени углеводородного топлива и чистого водорода; g_{H_2} – величина массовой добавки водорода.

Основанием аддитивного принципа определения нормальной скорости распространения пламени в топливоздушной смеси углеводородного топлива с водородом послужили результаты проведенных нами экспериментальных исследований в камере сгорания постоянного объема.

Особенностью воспламенения рабочей смеси в РПД является то, что начальный очаг формируется в предкамере, а воспламенение основной массы топливоздушной смеси осуществляется высокотемпературным факелом горящих газов, истекающим из предкамеры в рабочую полость. При искровом зажигании в предкамере РПД бензоводородовоздушных смесей соотношение длительностей первой и второй стадий периода индукции меняется в зависимости от содержания водорода. Длительность первой стадии, для которой химическая активность водорода и его каталитическое действие на процесс воспламенения играет более важную роль, чем для стадии распространения турбулентного пламени, сокращается с увеличением доли водорода быстрее, чем длительность второй стадии.

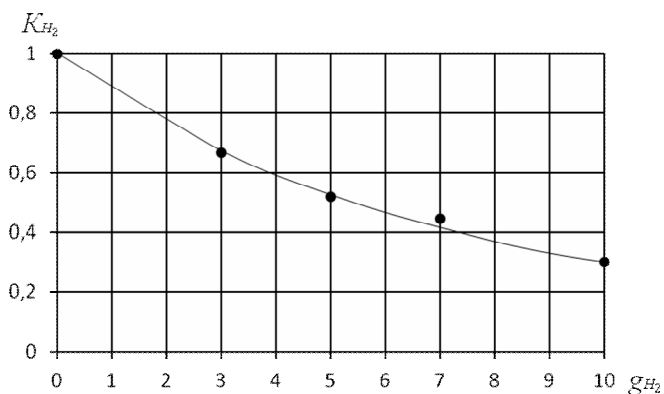


Рисунок 1. Зависимость поправочного коэффициента от величины добавки водорода

Для того чтобы учесть в математической модели отмеченную особенность влияния добавок водорода на начальный период процесса сгорания в РПД, введен дополнительный множитель K_{H_2} , представляющий собой некоторую функцию от величины добавки водорода (см. рис. 1). Вид этой функции был определен на основе обработки индикаторных диаграмм, полученных нами для одного и того же режима

работы РПД на стехиометрических топливовоздушных смесях с различными по величине добавками водорода:

$$K_{H_2} = 0,9 \cdot e^{-0,15 \cdot g_{H_2}} + 0,1. \quad (13)$$

Таким образом, с учетом поправочного коэффициента длительность периода индукции в предкамере РПД моделируется следующим образом:

$$\varphi_{L,T} = C_2 \cdot K_{H_2} \frac{\sqrt[3]{\omega}}{\sqrt{w_{n0} \cdot p^{0,88} \cdot T_u^{0,9} \cdot q_u}}, \quad (14)$$

где q_u – удельная теплота сгорания топливовоздушной смеси; множитель C_2 больше единицы и учитывает насколько общая продолжительность периода индукции превышает длительность его второй стадии для бензовоздушной смеси.

Каждый факел пламени, истекающий из предкамеры, образует центр воспламенения, от которого пламя распространяется в продольном и поперечном направлениях по поверхности ротора. При вращении ротора положение центров воспламенения относительно поверхности ротора остается неизменным.

В предлагаемой модели распространения турбулентного пламени в РПД определяются текущие значения объемов каждой из зон, исходя из значений координат центров воспламенения и масс заряда, выгоревших в соответствующих фронтах, что позволяет найти положения передних и задних границ всех фронтов пламени. Всё это возможно благодаря удобному геометрическому моделированию рабочей камеры РПД.

В третьей главе приведено описание испытательного стенда с РПД ВАЗ-311 и стенда с камерой сгорания постоянного объема. Испытательный стенд оснащен комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющей регистрировать величину крутящего момента, частоту вращения эксцентрикового вала, расходов воздуха и топлива, и др. параметров РПД. Индицирование РПД осуществлялось с помощью неохлаждаемого пьезоэлектрического датчика-свечи фирмы Kistler (тип 6118В). Сигнал с датчика давления поступал на один канал аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а другие каналы АЦП поступали сигналы с датчика ВМТ и датчика момента подачи искры на дожигающую свечу зажигания. Полученные сигналы

записывались и обрабатывались на ЭВМ с помощью программного обеспечения Power Graf Analysis и Microsoft Excel.

В четвертой главе изложены результаты теоретического исследования влияния добавок водорода на процесс сгорания в РПД Ванкеля.

Верификация математической модели процесса сгорания в РПД проводилась путем сопоставления индикаторных диаграмм, полученных, с одной стороны, расчетом по разработанной математической модели и, с другой, индицированием РПД ВАЗ-311 на испытательном стенде.

На рис. 2 представлены расчетные и индикаторные диаграммы без добавки водорода и с массовой добавкой водорода 5% для режима осредненного ездового городского цикла: $n = 2000$ об/мин, $p_e = 0,2$ МПа, $\alpha = 1$.

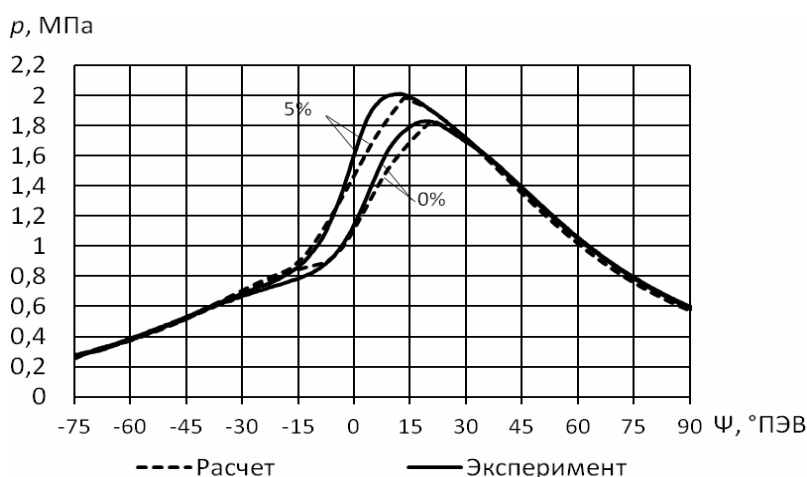


Рисунок 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных на режиме осредненного ездового цикла

В результате анализа соответствия расчетных и экспериментально полученных диаграмм сделан вывод о том, что отклонение расчетных значений текущих давлений от экспериментально наблюдаемых не превышает 8%.

Результаты теоретических исследований показали, что добавляя свободный водород к основной топливовоздушной смеси

можно не только существенно уменьшить недогорание топливовоздушной смеси вблизи задней вершины ротора, но и, при некоторой величине добавки, полностью его устранить. На рис. 3 показано, как в зависимости от количества добавленного водорода распространяются по отношению к передней и задней вершинам ротора фронты пламени, инициированные двумя свечами зажигания.

При массовой добавке водорода в 16% фронт пламени достигает задней вершины до завершения рабочего такта, обеспечивая при этом полное сгорание топливовоздушной смеси до открытия выпускного окна ($\psi = 300^\circ$ ПЭВ).

Результаты моделирования рабочего процесса РПД показали, что величина добавки свободного водорода, которая позволяет полностью устранить недогорание топливовоздушной смеси у задней вершины ротора, меняется в зависимости от режима работы РПД и степени обеднения топливовоздушной смеси и превышает 10% от массы основного топлива. Необходимость столь значительных добавок водорода усложняет практическую реализацию генерирования и хранения такого количества водорода непосредственно на борту транспортного средства. Для уменьшения количества свободного водорода, обеспечивающего полное сгорание топливовоздушной смеси, рассматривалась возможность ис-

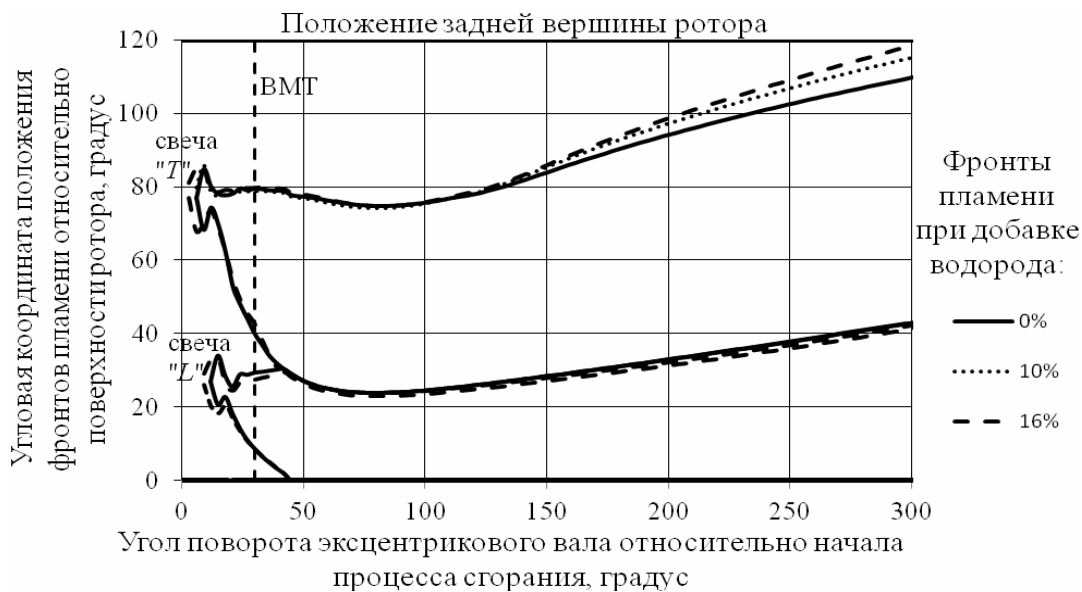


Рисунок 3. Распространение фронтов пламени по рабочей камере РПД в зависимости от величины добавки водорода на режиме среднего городского ездового цикла ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,2 \text{ МПа}$, $\alpha=1$)

пользования добавки водорода с расслоением его концентрации по рабочей камере РПД.

Расслоение водородной добавки по объему рабочей камеры можно осуществить за счет фазированной подачи водорода на такте впуска. Сместив начало подачи водорода относительно начала такта впуска, то есть относительно момента открытия впускного окна, можно сконцентрировать добавку водорода в той части рабочей камеры, которая примыкает к задней вершине ротора, где изначально и происходит неполное сгорание топливовоздушной смеси.

Проведенное математическое моделирование процесса сгорания бензовоздушной смеси с добавкой свободного водорода, сконцентрированной в указанной выше зоне, показало, что за счет неравномерного распределения добавки по объему рабочей камеры можно обеспечить полное сгорание при существенно меньших количествах добавляемого водорода по сравнению с вариантом равномерного распределения водорода по всему объему рабочей камеры.

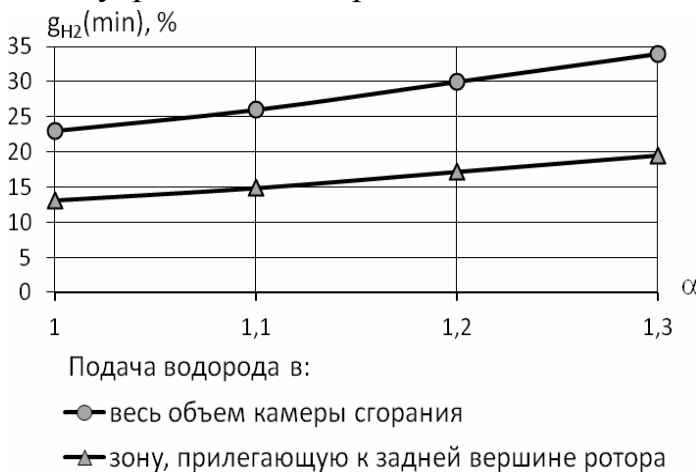


Рисунок 4. Сравнение минимально необходимой добавки водорода в процентах от основной массы топлива при различных условиях подачи водорода ($n = 2000 \text{ об/мин}$ и $\varphi_{др} = 100 \%$)

На рис. 4 показаны для сравнения две зависимости от коэффициента избытка воздуха минимально необходимых для полного сгорания топливовоздушной смеси в камере РПД добавок водорода. Одна из них получена при условии равномерного распределения водорода по камере, а вторая соот-

ветствует расслоенной добавке водорода. Как видно, во втором случае эффект полного сгорания достигается при добавках водорода, которые примерно 1,8 раза меньше, чем в первом случае.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований РПД Ванкеля с добавками водорода на режимах частичных нагрузок и холостого хода. Влияние добавок свободного водорода к основному углеводородному топливу на топливную экономичность РПД оценивалось по значениям удельного эффективного расхода топлива.

На рис. 5 приведены полученные в ходе испытаний РПД нагрузочные характеристики по величине удельного эффективного расхода топлива при различных значениях добавок свободного водорода. Добавка 5 % водорода на режимах малых нагрузок ($p_e = 0,14 - 0,28$ МПа) снижает удельный расход топлива на 4,2 %. По мере повышения нагрузки эффект от добавки водорода увеличивается: при $p_e = 0,4$ МПа, как видно из рис. 5, величина удельного эффективного расхода топлива снижается за счет добавки 5% водорода на 5,7%. Ослабление влияния добавок водорода на величину удельного эффективного расхода топлива по мере уменьшения нагрузки связано с тем, что снижается вклад от недогорания топлива в общей величине потерь, обуславливающих ухудшение топливной экономичности двигателя на малых нагрузках: по мере снижения нагрузки все большая доля потерь оказывается следствием дросселирования на впуске.

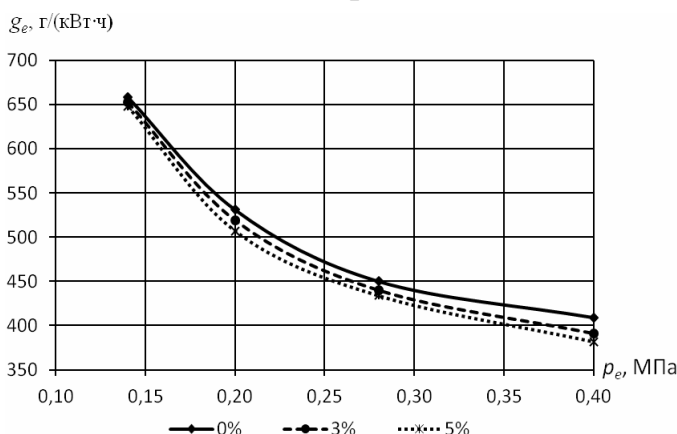


Рисунок 5. Зависимость удельного расхода топлива от эффективного давления ($n = 2000$ об/мин, $\alpha = 1$) при различных добавках свободного водорода

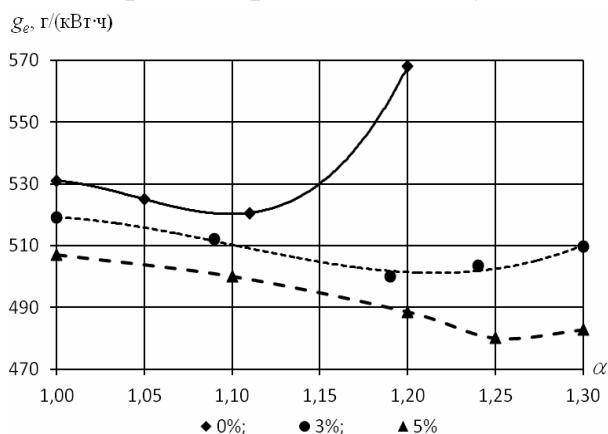


Рисунок 6. Зависимость удельного расхода воздуха от коэффициента избытка воздуха с различными добавками водорода при $n = 2000$ мин⁻¹, $p_e = 0,2$ МПа

На рис. 6 приведены результаты испытаний РПД при обеднении топливовоздушной смеси. Испытания проведены на режиме, соответствующем осредненному городскому испытательному циклу. Как видно из рис. 6, с увеличением добавки водорода предел эффективного обеднения заметно смещается в сторону обеднения топливовоздушной смеси. То, что при добавках водорода предел эффективного обеднения выражен не так ярко, свидетельствует о положительном влиянии водорода на межцикловую стабильность процесса сгорания – доля «плохих» циклов при добавке водорода нарастает не так интенсивно, как при работе без этой добавки.

На рис. 7 представлены полученные в результате проведенных испытаний зависимости содержания CO и C_xH_y в отработавших газах РПД ВАЗ-311 от величины массовой добавки водорода на режиме холостого хода. Состав бензовоздушной смеси соответствовал стехиометрическому. Добавка 8 % водорода в бензовоздушную смесь приводит к снижению содержания несгоревших углеводородов в 3 раза, а содержания оксида углерода – в 2,8 раза.

Влияние добавок водорода на выбросы несгоревших углеводородов с отработавшими газами на нагрузочных режимах работы РПД оказалось, как и на режиме холостого хода, весьма заметным. Как видно из рис. 8, за счет добавки 5 % водорода содержание несгоревших углеводородов в отработавших газах уменьшилось в исследованном диапазоне нагрузок в 1,45 ... 1,55 раза.

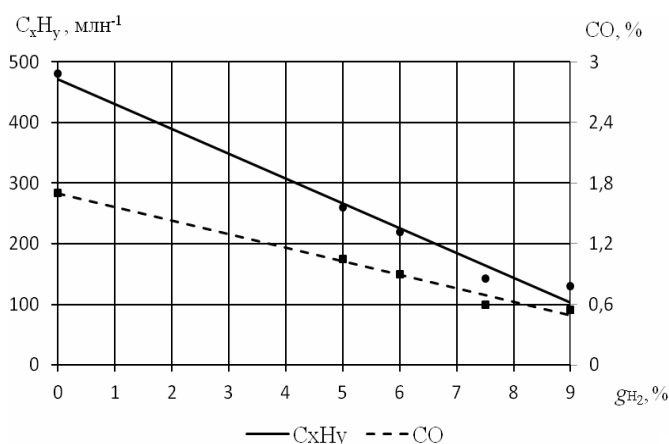


Рисунок 7. Влияние массовой добавки водорода на токсичность отработавших газов РПД на холостом ходу

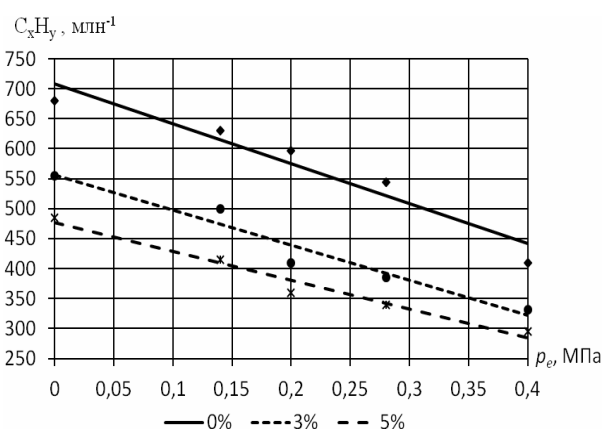


Рисунок 8. Зависимость количества несгоревших углеводородов от эффективного давления ($n = 2000$ об/мин, $\alpha = 1$)

Оценка возможностей дополнительного снижения содержания токсичных компонентов на нагрузочных режимах работы двигателя с добавками водорода была проведена за счет обеднения топливовоздушной смеси. За исходную точку был взят осредненный режим городского испытательного цикла: $p_e = 0,2$ МПа при $n = 2000$ мин⁻¹. Коэффициент избытка воздуха в исходной точке соответствовал стехиометрическому составу. Обеднение в ходе этих опытов достигалось уменьшением подачи бензина, при этом соответствующим образом уменьшалась и подача водорода с тем, чтобы не изменялась доля добавляемого водорода. При такой методике проведения экспериментов среднее эффективное давление по мере обеднения снижалось по сравнению с его значением в исходной точке (рис. 9). Без добавок водорода обеднение смеси от стехиометрии до $\alpha = 1,2$ привело к падению p_e на 25%. С добавками 3 и 5% водорода, соответственно, среднее эффективное давление снизилось при таком же обеднении на 13,5 и 9%.

На рис. 10 представлены построенные на основе результатов рассматриваемых опытов зависимости содержания несгоревших углеводородов величины коэффициента избытка воздуха. Как видно из рис. 10, содержание несгоревших углеводородов в отработавших газах РПД уменьшается по мере обеднения топливовоздушной смеси практически линейно как без добавок водорода, так и с

добавками. То обстоятельство, что наклон прямых на рис. 10 один и тот же и, следовательно, при всех значениях α добавка водорода снижает содержание C_xH_y в одно и то же число раз, свидетельствует о том, что причины, в силу которых содержание C_xH_y в ОГ уменьшается по мере обеднения топливовоздушной смеси, не связаны с добавками водорода.

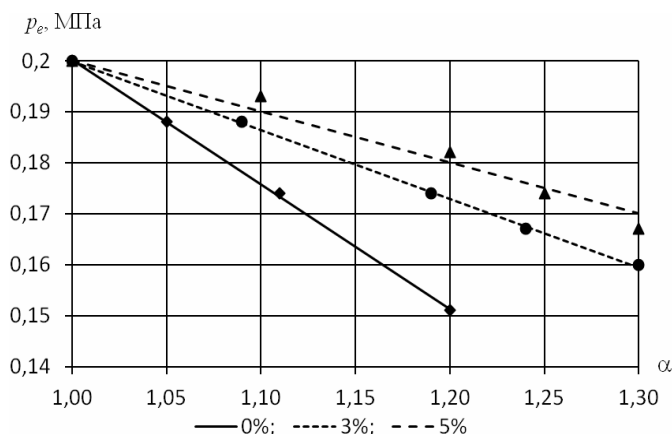


Рисунок 9. Зависимость эффективного давления от коэффициента избытка воздуха при различных добавках водорода ($n=2000$)

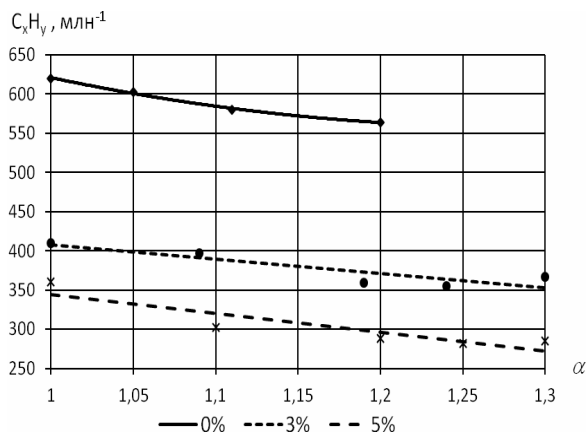


Рисунок 10. Зависимость выбросов несгоревших углеводородов от коэффициента избытка воздуха ($n=2000$ об/мин)

Экспериментальные исследования с подачей водорода, фазированной относительно подачи основного топлива, были проведены на режиме осредненного ездового городского цикла. Состав топливовоздушной смеси в камере сгорания поддерживался стехиометрическим, среднее по камере значение массовой добавки водорода составляло 2%. Момент начала впрыскивания и длительность впрыскивания бензина не менялись. Момент открытия газовой форсунки варьировали, изменяя тем самым фазу подачи водорода относительно фазы подачи бензина.

На рис. 11 показан график изменения удельного эффективного расхода топлива от момента начала подачи водорода относительно начала открытия впускного окна рабочей кромкой ротора ψ .

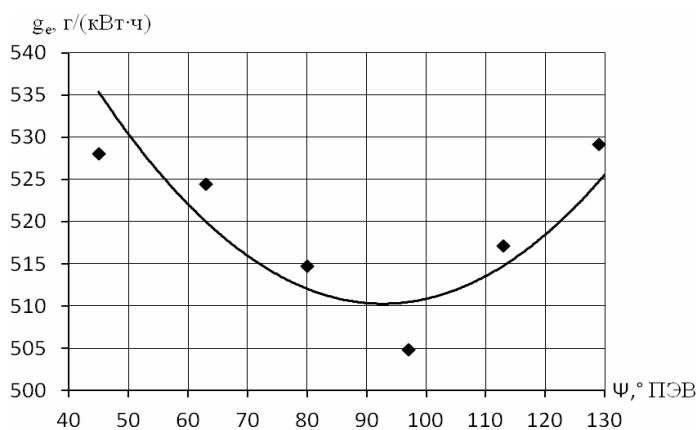


Рисунок 11. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от момента подачи водорода относительно начала такта впуска

Видно, что минимальный удельный эффективный расход топлива достигается при значениях угла ψ , лежащих в интервале от 90 до 100 град. ПЭВ.

При оптимальном фазировании момента подачи водорода величина эффективного удельного расхода топлива уменьшается дополнительно на 4,2 % по сравнению с одновременной подачей бензина и водорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований показана возможность улучшения показателей РПД Ванкеля за счет добавок свободного водорода к основной бензовоздушной смеси. При массовой добавке свободного водорода в количестве 5% удельный эффективный расход топлива с учетом расхода водорода снижается на осредненном режиме городского ездового цикла на 4,2 %, а содержание несгоревших углеводородов в отработавших газах двигателя уменьшается в 1,5 раза.

2. Создана и верифицирована математическая модель процесса распространения пламени в камере сгорания РПД Ванкеля, позволяющая учитывать добавку свободного водорода к основной топливовоздушной смеси. Теоретические исследования, выполненные с помощью указанной математической модели, позволили исследовать степень влияния различных по величине добавок свободного водорода на полноту сгорания топливовоздушной смеси в РПД Ванкеля и оценить для различных режимов работы двигателя величину добавки свободного водорода, при которой пламя охватывает весь объем камеры.

3. На основе экспериментов, проведенных в условиях камеры сгорания постоянного объема, установлено, что нормальная скорость распространения ламинарного пламени в топливовоздушных смесях с добавкой свободного водорода может быть найдена как «средневзвешенная» величина, исходя из массовых долей основного топлива и свободного водорода и значений для них нормальных скоростей распространения пламени.

4. Оборудован испытательный стенд с РПД ВА3-311, позволяющий определять показатели двигателя, в том числе экологические, и проводить его индентификацию при работе с различными по величине добавками свободного водорода к основной бензовоздушной смеси.

5. Проведенные экспериментальные исследования влияния добавок водорода на показатели РПД ВА3-311 при его работе на режиме холостого хода и частичных нагрузок позволяют сделать следующие выводы:

5.1. Добавка свободного водорода в основную бензовоздушную смесь позволяет уменьшить величину удельного эффективного расхода топлива и снизить содержание в отработавших газах несгоревших углеводородов и оксида углерода во всем исследованном диапазоне нагрузок и частот вращения. На режиме $p_e = 0,2$ МПа и $n = 2000$ мин⁻¹ удельный эффективный расход топлива при добавке 5% водорода уменьшается на 4,2 %, а на режиме $p_e = 0,4$ МПа и $n = 2000$ мин⁻¹ – на 5,7 %. Содержание несгоревших углеводородов снижается, соответственно, в 1,5 и в 1,55 раза.

5.2. Добавка свободного водорода к основной бензовоздушной смеси позволяет повысить предел эффективного обеднения. При добавке 5% свободного водорода предел эффективного обеднения достигается при $\alpha = 1,25$, в то время как без добавки свободного водорода он равен 1,12.

5.3. Добавка свободного водорода положительно влияет на уровень межциклового неидентичности рабочего процесса. При работе РПД на стехиометри-

ческой топливовоздушной смеси добавка водорода в 5 % улучшает цикловую нестабильность на 26,9 %, а при значении $\alpha = 1,2$ – на 59,8 %.

6. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что путем фазирования момента начала впрыскивания водорода относительно начала такта впуска, следствием чего является повышенная концентрация водорода вблизи задней по ходу вращения вершины ротора, можно уменьшить количество добавляемого водорода при сохранении достигаемых значений эффективного удельного расхода топлива и содержания токсичных компонентов в отработавших газах. Предложенный способ работы РПД с фазированием подачи водорода относительно начала такта впуска защищен патентом на изобретение.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

В ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Экспериментальные исследования процесса сгорания пропан-бутановоздушных смесей с добавками водорода / Е.А. Федянов, Е.А. Захаров, Ю.В. Левин, Д.С. Гаврилов // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. - 2013. - № 2, вып. 2. - С. 111-116.

2. Левин, Ю.В. Влияние добавки водорода на процесс сгорания в роторно-поршневых двигателях Ванкеля / Ю.В. Левин, Е.А. Захаров, Е.А. Федянов // Известия ВолгГТУ. Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 12 (115). - С. 35-36.

3. Влияние добавок синтез-газа на скорость распространения пламени при горении пропан-бутановой смеси / Е.А. Федянов, Е.А. Захаров, Ю.В. Левин, В.Н. Кузьмин, Д.С. Гаврилов // Известия ВолгГТУ. Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». Вып. 5: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ.- Волгоград, 2013. - № 12 (115).- С. 17-19.

4. Левин, Ю.В. Теоретическое исследование влияния добавок водорода на процесс распространения пламени в роторно-поршневых двигателях Ванкеля / Ю.В. Левин, Е.А. Федянов // Известия ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы". Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 3 (130). - С. 58-60.

5. Федянов, Е.А. Использование водорода в роторно-поршневых двигателях Ванкеля в качестве добавки к основному углеводородному топливу / Е.А. Федянов, Е.А. Захаров, Ю.В. Левин // Известия ВолгГТУ. Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». Вып. 6: межвуз. сб. науч. ст./ ВолгГТУ. – Волгоград, 2014.- № 18 (145).- С. 39-41.

6. Теоретическое исследование процесса сгорания в роторно-поршневых двигателях Ванкеля с добавками водорода / Е.А. Федянов, Ю.В. Левин, Е.А. Захаров, Е.М. Иткис // Двигателестроение. – 2014. - № 4. - С. 16-18.

7. Влияние добавки водорода на показатели роторно-поршневого двигателя Ванкеля / Е.А. Федянов, Ю.В. Левин, С.Н. Шумский, В.А. Алексейчук // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 11. - Волгоград, 2015. - № 5 (165). - С. 65-68.

8. Федянов, Е.А. Моделирование периода индукции при искровом зажигании бензовоздушных смесей с добавками водорода в роторно-поршневом двигателе Ванкеля / Е.А. Федянов, Е.М. Иткис, Ю.В. Левин // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 11. - Волгоград, 2015. - № 5 (165). - С. 61-64.

Патент на изобретение: № 2546933 РФ, МПК F02B53/10. Способ работы роторно-поршневого двигателя внутреннего сгорания / Е.А. Федянов, Е.А. Захаров, Ю.В. Левин, Е.М. Гольденберг; ВолгГТУ. – 2015.

Подписано в печать 13.12.2016 г. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано в типографии ИУНЛ Волгоградского государственного технического университета. 400005, г. Волгоград, просп. им. В.И. Ленина, 28, корп. №7.