

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК СВОБОДНОГО ВОДОРОДА НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

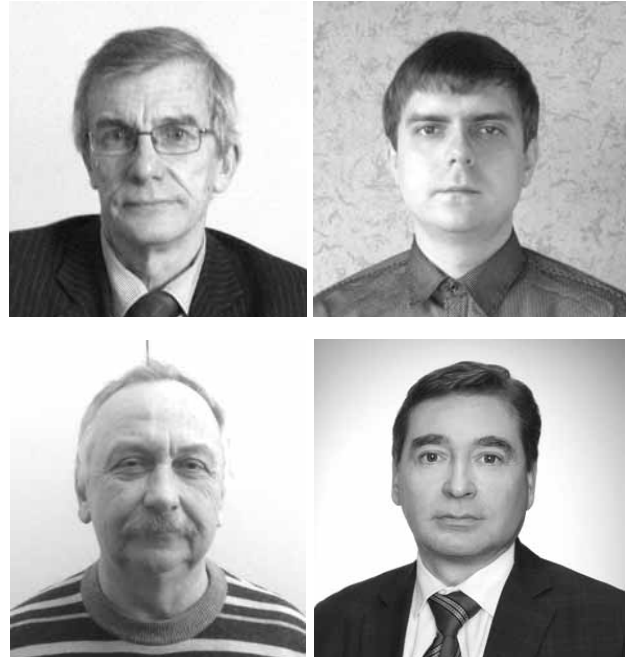
*Е.А. Федянов, д.т.н., проф., Ю.В. Левин, к.т.н.,
С.Н. Шумский, к.т.н., Е.А. Захаров, к.т.н.,
Волгоградский государственный технический университет*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния добавок свободного водорода к основному углеводородному топливу на экологические характеристики роторного двигателя Ванкеля ВАЗ-311.

В связи со сложностью хранения на борту транспортных средств достаточного количества водорода как основного топлива представляет интерес применение небольших добавок водорода к углеводородным топливам для повышения скорости и полноты сгорания. Роторно-поршневой двигатель, выполненный по схеме Ванкеля, более приспособлен для использования водорода, чем традиционные поршневые двигатели, из-за меньшей вероятности преждевременного воспламенения и обратной вспышки. Для двигателя этого типа повышение скорости распространения пламени за счет добавок свободного водорода может способствовать уменьшению свойственного им выброса продуктов неполного сгорания топлива.

Экспериментальные результаты показывают, что добавка 5 % водорода по массе позволяет улучшить экологические показатели роторного двигателя Ванкеля на режимах частичных нагрузок и холостого хода.

Роторно-поршневые двигатели (РПД) Ванкеля имеют лучшие показатели по уравновешенности и металлоемкости по сравнению с поршневыми двигателями внутреннего сгорания и, как следствие, обладают большей удельной мощностью, что позволяет рассматривать данный тип двигателя в качестве силовой установки для легкомоторной авиации [1, 2], маломерных судов и наземных транспортных средств [3–6]. Однако РПД Ванкеля обладают несколько большим расходом топлива и повышенным содержанием несгоревших углеводородов (C_xH_y) в отработавших газах. Причиной указанных недостатков является неполное сгорание топливовоздушной смеси вблизи задней по ходу вращения вершины ротора в результате направленного движения заряда, обусловленного вращением ротора [2, 6]. Как показывают исследования [6–10], в том числе проведенные



авторами [11–15], уменьшить недогорание топливовоздушной смеси у задней вершины ротора в РПД Ванкеля можно за счет использования добавок свободного водорода к основному топливу.

Двигатель Ванкеля в большей мере, чем поршневой двигатель, приспособлен к работе на водороде. В силу того, что процессы впуска и сжатия в РПД происходят в зоне статора с так называемой «холодной» стенкой, а свечи зажигания расположены в специальных предкамерах, исключается вероятность преждевременного воспламенения топливовоздушной смеси с добавками водорода.

Экспериментальные исследования по влиянию добавок водорода на экологические показатели были выполнены на односекционном РПД Ванкеля ВАЗ-311 с приведенным рабочим объемом 649 см^3 и степенью сжатия 9,3. Испытания проводились на режимах холостого хода и частичных нагрузках с частотой вращения эксцентрикового вала 2000 об/мин. При этом углы опережения зажигания на обеих свечах устанавливались оптимальными для режима работы

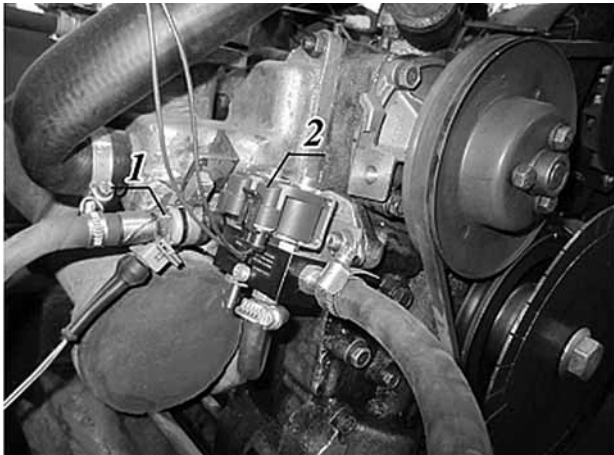


Рис. 1. Внешний вид установки форсунок:
1 — бензиновая форсунка; 2 — водородная форсунка

РПД с бензовоздушной смесью и не изменялись при использовании добавки водорода. Угол опережения зажигания для лидирующей свечи зажигания «L» составлял 26° по углу поворота эксцентрикового вала (ПЭВ) до ВМТ, для дожигающей свечи «Т» — 30° ПЭВ до ВМТ.

В качестве основного топлива использовался бензин, подаваемый через форсунку. Ось бензиновой форсунки направлена на боковое впускное окно в статоре РПД. Дополнительная газовая форсунка для подачи водорода смонтирована в непосредственной близости от впускного коллектора РПД Ванкеля (рис. 1) и соединена с водородным жиклером, установленным в стенке впускного патрубка, коротким гибким шлангом. Ось водородного жиклера направлена в сторону впускного окна РПД под острым углом к оси бензиновой форсунки. Система фазированного впрыска топлива позволяла в широких пределах варьировать момент начала и длительность впрыска топлива [14, 15].

Контроль содержания углеводородов СН и оксида углерода СО в отработавших газах РПД осуществлялся с помощью газоанализатора АСКОН-02. Забор проб газов проводился на глубине 300 мм от среза выпускного патрубка штатного глушителя, которым был оснащен двигатель ВАЗ-311 на стенде [15].

Доля режима холостого хода может достигать 35 % от общего времени работы двигателя наземного транспортного средства. Для этого режима характерна повышенная концентрация продуктов неполного сгорания в отработавших газах, что обусловлено низким значением коэффициента наполнения и высоким значением коэффициента остаточных газов. Вышеуказанные факторы также снижают скорость распространения пламени, что способствует неполноте сгорания топливовоздушной смеси. Для РПД, в отличие от поршневых двигателей, ситуация усугубляется

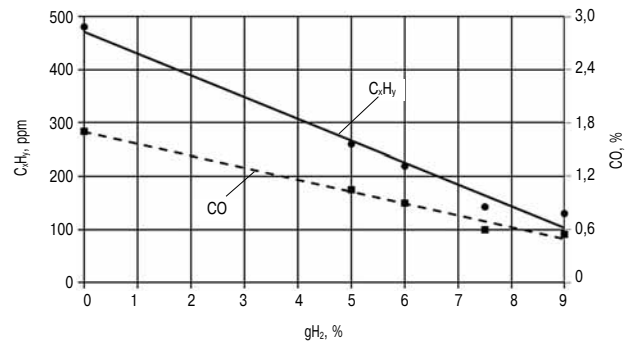


Рис. 2. Влияние массовой добавки водорода на токсичность отработавших газов РПД на холостом ходу

общим повышенным уровнем выбросов несгоревших углеводородов.

На рис. 2 представлены полученные в результате проведенных испытаний зависимости содержания СО и C_xH_y в отработавших газах РПД ВАЗ-311 от величины массовой добавки водорода на режиме холостого хода. Состав бензоводородовоздушной смеси соответствовал стехиометрическому. Однако следует отметить, что без добавок водорода двигатель работал на слегка обогащенной бензовоздушной смеси ($\alpha = 0,95$), так как при больших значениях коэффициента избытка воздуха устойчивость работы нарушалась.

Как видно из рис. 2, добавка 8 % водорода в бензовоздушную смесь приводит к снижению содержания несгоревших углеводородов в три раза, а содержания оксида углерода — в 2,8 раза. Можно отметить, что содержание несгоревших углеводородов в отработавших газах снижается по мере увеличения добавки водорода интенсивнее, чем содержание СО. Это соответствует теоретическому представлению о том, что добавка водорода в первую очередь уменьшает недогорание топливовоздушной смеси в рабочей камере РПД.

Возможность за счет добавок водорода регулировать топливopодачу на режиме холостого хода на стехиометрический состав топливовоздушной смеси позволяет использовать системы с трехкомпонентными нейтрализаторами отработавших газов для дополнительного уменьшения вредных выбросов в окружающую среду.

Проведенные эксперименты показали, что за счет добавок водорода РПД приобретает способность работать на режиме холостого хода даже при некотором обеднении топливовоздушной смеси. На рис. 3 представлены результаты исследования изменения содержания несгоревших углеводородов и оксида углерода в отработавших газах РПД, работавшего на режиме холостого хода с добавками водорода. На графике рядом с экспериментальными точками указаны значения величины добавки водорода (в %), при которых удавалось добиться устойчивой работы двигателя

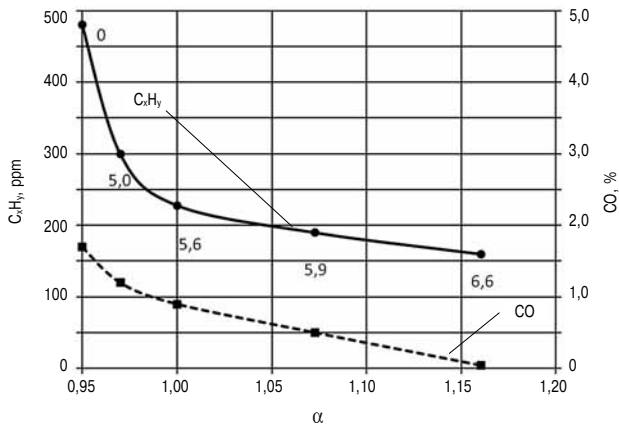


Рис. 3. Зависимость концентрации токсичных веществ от коэффициента избытка воздуха при различных добавках водорода

при соответствующем обеднении смеси. Следует отметить, что обеднение в рассматриваемых экспериментах достигалось лишь за счет уменьшения подачи бензина, в то время как абсолютное значение подачи водорода не менялось — длительность открытия водородной форсунки при всех регулировках по α оставалась неизменной.

Как видно из графика рис. 3, за счет добавок водорода удалось добиться устойчивой работы двигателя при $\alpha = 1,16$. При этом значении коэффициента избытка воздуха содержание несгоревших углеводородов в отработавших газах РПД в три раза меньше, чем при работе только на бензине с $\alpha = 0,95$, а содержание CO составляет всего 0,04 %, в то время как при работе на бензине с $\alpha = 0,95$ в отработавших газах содержалось 1,7 % оксида углерода.

Влияние добавок водорода на выбросы токсичных компонентов с отработавшими газами на нагрузочных режимах работы РПД оказалось, как и на режиме холостого хода, весьма заметным. На рис. 4 и 5 представлены построенные по результатам экспериментальных исследований зависимости концентраций несгоревших углеводородов и оксида углерода от нагрузочного режима работы РПД при частоте вращения эксцентрикового вала 2000 об/мин. Верхние кривые на рисунках построены по результатам испытаний РПД, работавшего без добавок водорода. Две других кривых на каждом из графиков получены по результатам испытаний РПД с добавкой 3 и 5 % водорода соответственно. При всех нагрузках и различных добавках водорода топливовоздушная смесь была стехиометрической.

Добавка свободного водорода в основную бензовоздушную смесь позволяет снизить содержание в отработавших газах несгоревших углеводородов и оксида углерода во всем исследованном диапазоне нагрузок при $n = 2000$ об/мин. Так, например, на режиме $p_e = 0,2$ МПа кон-

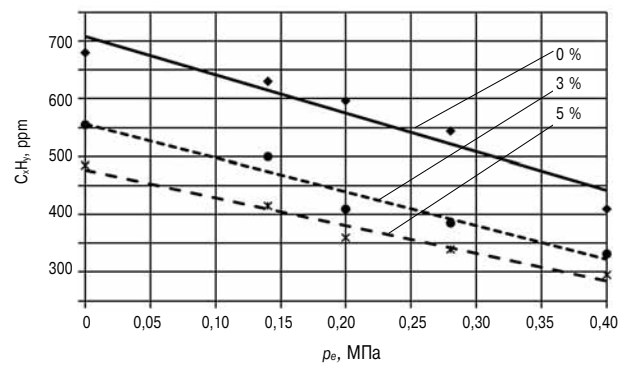


Рис. 4. Зависимость количества несгоревших углеводородов от эффективного давления ($n = 2000$ об/мин, $\alpha = 1$)

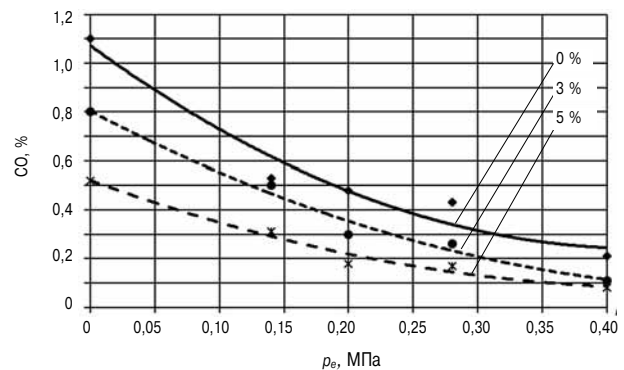


Рис. 5. Зависимость количества оксида углерода CO от нагрузочного режима работы РПД ($n = 2000$ об/мин, $\alpha = 1$)

центрация несгоревших углеводородов при добавке 5 % водорода уменьшается в 1,5 раза, а на режиме $p_e = 0,4$ МПа — в 1,55 раза. Содержание оксида углерода снижается, соответственно, в 2,3 и в 2,7 раза.

В целом проведенные стендовые испытания подтверждают положительное влияние на экологические показатели РПД добавок свободного водорода к основному топливу. Существенное сокращение концентрации несгоревших углеводородов и оксида углерода в отработавших газах на режимах холостого хода и частичных нагрузок свидетельствуют о том, что добавки водорода способствуют повышению полноты сгорания топлива в РПД. Использование добавки водорода позволяет обеспечить устойчивую работу РПД на обедненной топливовоздушной смеси на режиме холостого хода.

Литература

1. Броладзе К.Э. Многотопливные РПД «WANKEL» AG // Международный научный журнал «Воздушный транспорт». — 2013. — С. 14.
2. Boretti A., Jiang S., Scalzo J. A novel wankel engine featuring jet ignition and port or direct injection for faster and more complete combustion especially designed for gaseous fuels. — SAE Technical Paper, 2015. — №. 2015-01-0007.

3. Ribau J. et al. Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders for electric vehicles // *Energy Conversion and Management*. — 2012. — Т. 58. — С. 120–133.

4. Chen H et al. Development of Rotary Piston Engine Worldwide // *AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications*. Atlantis Press. — 2015 — С. 180–183.

5. Wakayama N. et al. Development of hydrogen rotary engine vehicle // *16th World Hydrogen Energy Conference (Lyon, France)*. — 2006.

6. Amrouche F. et al. An experimental investigation of hydrogen-enriched gasoline in a Wankel rotary engine // *International journal of hydrogen energy*. — 2014. — Т. 39, №. 16. — С. 8525–8534.

7. Fan B. et al. Effects of hydrogen blending mode on combustion process of a rotary engine fueled with natural gas/hydrogen blends // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2016. — Т. 41, №. 6. — С. 4039–4053.

8. Yang J. et al. Numerical investigation of the effects of hydrogen enrichment on combustion and emissions formation processes in a gasoline rotary engine // *Energy Conversion and Management*. — 2017. — Т. 151. — С. 136–146.

9. Su T. et al. Improving the combustion performance of a gasoline rotary engine by hydrogen enrichment at various conditions // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2017.

10. Zambalov S. D., Yakovlev I. A., Skripnyak V. A. Numerical simulation of hydrogen combustion process in rotary engine with laser ignition system // *International journal of hydrogen energy*. — 2017. — Т. 42, №. 27. — С. 17251–17259.

11. Федянов Е. А. и др. Теоретическое исследование процесса сгорания в роторно-поршневых двигателях Ванкеля с добавками водорода // *Двигателестроение*. — 2014. — №. 4. — С. 16–18.

12. Fedyanov E. A. et al. Modelling of flame propagation in the gasoline fuelled Wankel rotary engine with hydrogen additives // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — IOP Publishing, 2017. — Т. 177, №. 1. — С. 012076.

13. Федянов Е.А. и др. Способ работы роторно-поршневого двигателя внутреннего сгорания // Пат. 2546933 РФ, МПК F02B53/10. — ВолГТУ, 2015.

14. Левин, Ю.В. Улучшение топливной экономичности и экологичности роторно-поршневого двигателя за счет добавок свободного водорода к основному топливу: дис. ... канд. техн. наук 05.04.02 / Левин Юрий Васильевич. — Волгоград, 2016. — 128 с.

15. Злотин Г.Н. Особенности рабочего процесса и пути повышения энергетической эффективности роторно-поршневых двигателей Ванкеля: монография / Г. Н. Злотин, Е. А. Федянов // ВолГТУ. — Волгоград, 2010. — 119 с.

КОНФЕРЕНЦИЯ

Научно-практическая конференция «Современные теплоэнергетические установки — проблемы и перспективы развития»

17 мая 2018 г. на кафедре двигателей и тепловых установок Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева проведена научно-практическая конференция «Современные теплоэнергетические установки — проблемы и перспективы развития».

Конференция посвящена 115-летию со дня рождения профессора А.Н. Ложкина, основателя кафедры тепловых установок ВИТУ, видного советского ученого-теплоэнергетика, известного своими научными трудами в области парогазовых энергетических циклов и трансформаторов теплоты. По основным результатам научных исследований профессора А.Н. Ложкина с участием ЦКТИ им. И.И. Ползунова в 1960–1970 гг. в СССР построен ряд крупных опытных парогазовых установок, подтвердивших эффективность парогазового цикла.

В настоящее время научные результаты профессора А.В. Ложкина широко используются в современной теплоэнергетике (тепловые насосы, термохимические преобразователи и другие комбинированные энергоустановки).

Вопросы, рассмотренные на конференции

✓ Современное состояние и перспективы модернизации твердотопливных котельных МО РФ в рамках разработки Ведомственной целевой программы модернизации теплового хозяйства объектов МО РФ на период до 2019–2025 гг.

✓ Особенности проектирования теплоэнергоустановок большой мощности.

✓ Проблемы исследования дизельных энергоустановок специальных циклов.

✓ Проблемы прогнозирования надежности и оценка остаточного ресурса технических систем специального назначения.

✓ Перспективы создания и совершенствования когенерационных установок на базе поршневых ДВС. Перспективы разработки и внедрения в теплоэнергетике водородных турбогенераторных установок.

Участники конференции

Научно-педагогические работники ВИ(ИТ) ВА МТО, Военно-космическая академия им. Можайского, Торгово-промышленная палата СПб, «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» Минэнерго России, Государственный Политехнический университет, Саморегулируемая организация Балтийский строительный комплекс. ООО «Контэк-Инжиниринг», ООО «Новый Оборонный Заказ», ООО «ВТР Инжиниринг», НППО «Грантстрой», НП «Объединение энергетиков», ОАО «ВНИИ-Холодмаш», ЦКТИ, АО «Газпром промгаз», ПАО «Камчатскэнерго», ООО «Компзит-Групп», ООО «Авангард».

Результаты конференции

1. Сформирована позитивная оценка специалистов Ассоциации «Объединение энергетиков Северо-Запада» в части организации, тематики и уровня докладов конференции.

2. Принято решение о совместной организации и проведении научных конференций с Ассоциацией «Объединение энергетиков Северо-Запада» в рамках мероприятий конгрессно-выставочной тематики.

3. Выработано решение об участии кафедры совместно с профессиональным сообществом энергетиков в разработке общегосударственной терминосистемы «Техническое регулирование».