

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК ВОДОРОДА НА ПОКАЗАТЕЛИ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ОБЕДНЕННЫХ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

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

Использование добавок свободного водорода к основному топливу в роторно-поршневых двигателях Ванкеля является эффективным способом решения проблемы неполного сгорания топливоздушных смеси, свойственной этим двигателям. На кафедре «Теплотехника и гидравлика» Волгоградского государственного технического университета проводятся исследования по организации рабочего процесса двигателя Ванкеля при использовании водородосодержащих добавок к основному топливу. Добавка свободного водорода к основному топливу позволяет уменьшить величину удельного эффективного расхода топлива и снизить содержание в отработавших газах несгоревших углеводородов и оксида углерода при обеднении топливоздушной смеси. Экспериментальные исследования показывают, что добавки небольших (до 5 %) порций водорода к основной топливоздушной смеси позволяют добиться устойчивой работы роторного двигателя Ванкеля при коэффициенте избытка воздуха 1,3.

Двигатели Ванкеля, представляющие собой роторно-поршневой двигатель (РПД), работают по принципу четырехтактного цикла, благодаря вращению ротора и эксцентрикового вала. По сравнению с традиционными поршневыми двигателями в двигателе Ванкеля отсутствуют кривошипно-шатунный и газораспределительный механизмы, в результате чего он имеет более простую конструкцию и меньшее количество деталей [1, 2].

Особенность конструкции РПД Ванкеля позволяет рассматривать данный тип двигателя в качестве силовой установки для легкомоторной авиации, маломерных судов и наземных транспортных средств [3–5]. Хотя в настоящее время в автомобилестроении не возникает новых предложений о широкомасштабном применении РПД, интерес к этим двигателям вновь повысился в связи с развитием гибридных силовых установок. РПД позволяют получить более компактную и легкую конструкцию такой установки [6]. Вследствие меньшей массы эксплуатационный



расход топлива транспортным средством может оказаться меньшим, чем в случае применения обычного поршневого двигателя. Кроме того, в составе гибридной силовой установки РПД может работать на одном практически установившемся режиме, соответствующим наименьшему удельному расходу топлива. Однако широкому применению РПД в автомобилестроении препятствует то, что эти двигатели имеют несколько больший эксплуатационный расход топлива и повышенное количество несгоревших углеводородов в отработавших газах по сравнению с поршневыми двигателями в результате неполного сгорания топливоздушной смеси [1, 3, 5].

Процесс распространения пламени в РПД имеет ряд особенностей, обусловленных, в первую очередь, формой камеры сгорания. Вытянутая серповидная форма камеры сгорания увеличивает расстояние, которое необходимо пройти фронту пламени от свечи зажигания до вершин ротора. В результате вращения ротора в рабочей камере РПД создается однонаправленное движение топливоздушного заряда, которое препятствует распространению фронта пламени от свечи зажигания в сторону задней, по ходу вращения, вершины ротора. В тоже время, направленное движение заряда способствует быстрому сгоранию топлива у передней вершины ротора.

Для того чтобы существенно уменьшить недогорание топлива в РПД Ванкеля, необходимо добиться полного охвата пламенем топливовоздушной смеси, находящейся у задней вершины ротора. Принципиально существуют два пути решения такой задачи. Первый путь основан на сокращении расстояния, которое должен преодолеть фронт пламени от источника зажигания до задней вершины ротора. Второй путь заключается в увеличении тем или иным способом скорости распространения пламени в сторону задней вершины ротора.

Установка дополнительной свечи зажигания является в современных конструкциях РПД Ванкеля основным способом уменьшения неполноты сгорания топлива. Применению этого способа способствует конструкция двигателя — вытянутая вдоль грани ротора рабочая камера позволяет легко разместить в статоре две свечи зажигания, одна из которых оказывается смещенной ближе к передней, а другая — ближе к задней вершинам ротора в момент зажигания топливовоздушной смеси. К сожалению, как показывают исследования [7, 8], установка дополнительной, так называемой дожигающей свечи, смещенной в сторону задней вершины ротора, не решает в полной мере проблему неполноты сгорания. На большинстве режимов работы РПД фронт пламени, распространяющийся от дожигающей свечи, не успевает достичь задней вершины ротора, до начала выпуска.

Показатели РПД можно улучшить, увеличив скорость распространения пламени при сгорании топлива. Состав топливовоздушной смеси подразумевает, в первую очередь, соотношение между топливом и воздухом, однако в более широком смысле необходимо учитывать и вид самого топлива. Если рассматривать РПД, работающие на бензине, то соотношение между топливом и воздухом на всех скоростных и нагрузочных режимах близко к стехиометрическому, т. е. такому при котором нормальная скорость распространения пламени максимальна. Увеличить скорость распространения пламени и, как следствие, уменьшить недогорание топливовоздушной смеси и расход топлива можно за счет использования добавок такого активного, с точки зрения горения, газа как водород [9–12].

На базе роторно-поршневого двигателя ВАЗ-311 были проведены экспериментальные исследования влияния добавок водорода к бензовоздушной смеси на основные показатели двигателя [13–17]. Приведенный рабочий объем данного двигателя составляет 649 см^3 , степень сжатия — 9,3. Испытания проводились на режиме $n = 2000 \text{ об/мин}$, $p_e = 0,2 \text{ МПа}$, который примерно соответствует осредненному режиму работы ав-

томобильного двигателя в городском испытательном цикле. При этом углы опережения зажигания на обеих свечах устанавливались оптимальными для работы РПД на бензовоздушной смеси и не изменялись при использовании добавки водорода. Угол опережения зажигания для лидирующей свечи зажигания «L» составлял 26 град по углу поворота эксцентрикового вала (ПЭВ) до ВМТ, для дожигающей свечи «Т» — 30 град ПЭВ до ВМТ.

Подача водорода осуществлялась через дополнительную форсунку во впускной коллектор РПД. Система фазированного впрыска топлива позволяет в широких пределах варьировать момент начала и длительность впрыска топлива [17].

Влияние добавок свободного водорода к основному углеводородному топливу на топливную экономичность РПД оценивали в ходе экспериментальных исследований по значениям удельного эффективного расхода топлива и эффективного КПД двигателя (рис. 1). Обе указанные величины, как известно, однозначно связаны между собой.

При работе РПД с добавками водорода величину удельного расхода топлива определяли с учетом величины добавки свободного водорода:

$$g_e = \frac{G_6 + G_{H_2} \cdot H_{uH_2} / H_{u6}}{N_e}, \quad (1)$$

где G_6 , G_{H_2} — соответственно массовые расходы бензина и водорода, кг/с; H_{u6} , H_{uH_2} — соответственно низшие теплоты сгорания бензина и водорода; N_e — эффективная мощность двигателя.

Формула (1) учитывает различие значений низшей теплоты сгорания для бензина и водорода и дает значение g_e , приведенное к условиям работы на бензине без добавок водорода.

Эффективный КПД определяли следующим образом:

$$\zeta_e = \frac{N_e}{G_6 \cdot H_{u6} + G_{H_2} \cdot H_{uH_2}}. \quad (2)$$

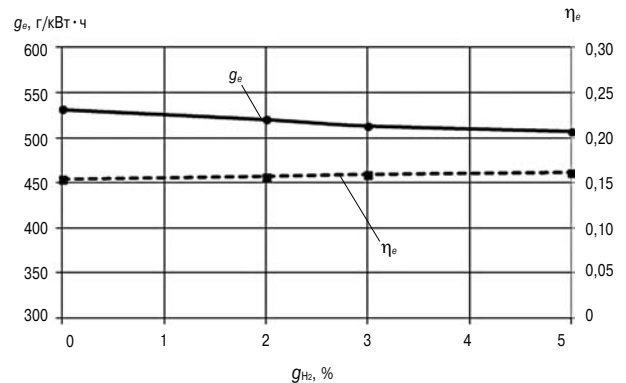


Рис. 1. Зависимость эффективных показателей от величины добавки водорода на режиме $n = 2000 \text{ об/мин}$, $p_e = 0,2 \text{ МПа}$

Отметим, что в ходе испытаний на данном режиме длительности впрыскивания водорода и бензина подбирались таким образом, чтобы в камеру РПД поступала топливовоздушная смесь стехиометрического состава.

Анализ результатов испытаний показал, что массовая добавка свободного водорода 5 % на данном режиме позволяет снизить удельный расход топлива на 4,2 %.

На рис. 2 приведены результаты испытаний РПД при обеднении топливовоздушной смеси. Испытания также проводились на режиме $n = 2000$ об/мин, $p_e = 0,2$ МПа. Как видно из рисунка, с увеличением добавки водорода предел эффективного обеднения заметно смещается в сторону обеднения топливовоздушной смеси. Если без добавок водорода четко выраженный предел эффективного обеднения достигается уже при $\alpha = 1,1-1,12$, то при добавке 5 % водорода этот предел равен примерно 1,25 и выражен уже не столь ярко, как без добавки водорода.

Как известно, существование предела эффективного обеднения связано с резким нарастанием доли рабочих циклов с вялым затянутым сгоранием, а также с появлением пропусков воспламенения. 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.

Представляет интерес оценка возможностей дополнительного снижения содержания токсичных компонентов на нагрузочных режимах работы двигателя за счет обеднения топливовоздушной смеси. Такая оценка была проведена на основе результатов измерения содержания несгоревших углеводородов и оксида углерода в отработавших газах РПД ВА3-311 при различных регулировках

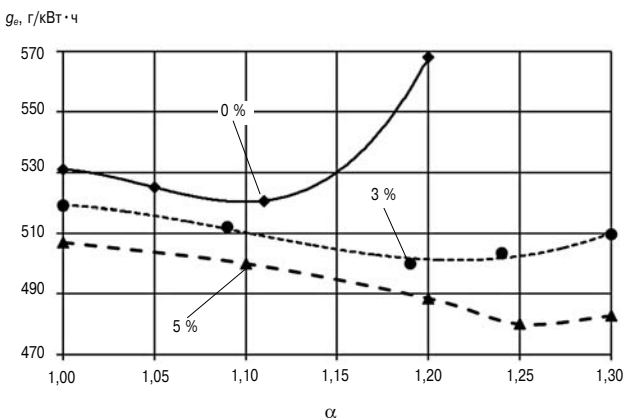


Рис. 2. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от коэффициента избытка воздуха с различными добавками водорода при $n = 2000$ об/мин

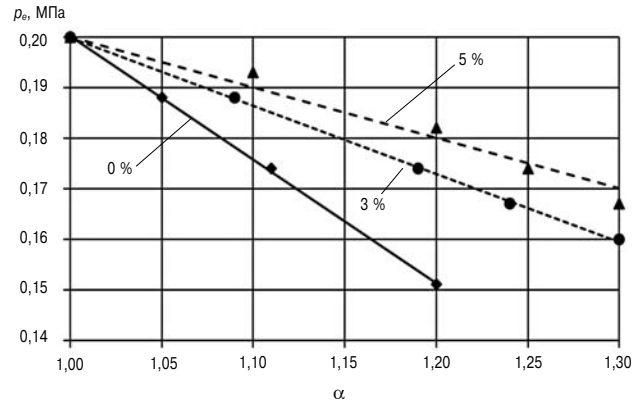


Рис. 3. Зависимость среднего эффективного давления от коэффициента избытка воздуха при различных добавках водорода

по величине коэффициента избытка воздуха. За исходную точку был взят режим, который соответствовал в среднем режиму работы автомобильного двигателя в условиях городского движения: $p_e = 0,2$ МПа при $n = 2000$ об/мин. 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. 3). Без добавок водорода обеднение смеси от стехиометрии до предела эффективного обеднения ($\alpha = 1,2$) снижало p_e на 25 %. С добавками 3 и 5 % водорода, соответственно, среднее эффективное давление при таком же обеднении было на 13,5 и 9 % соответственно меньше, чем на стехиометрической топливовоздушной смеси.

На рис. 4 и 5 представлены построенные на основе результатов рассматриваемых опытов зависимости содержания несгоревших углеводородов и оксида углерода от величины коэффициента избытка воздуха.

Как видно из рис. 4, содержание несгоревших углеводородов в отработавших газах РПД уменьшается по мере обеднения топливовоздушной смеси практически линейно как без добавок водорода, так и с добавками.

Абсолютное значение величины, на которую снижается содержание несгоревших углеводородов в ОГ, от добавок водорода не зависит: при обеднении от стехиометрии до $\alpha = 1,2$ содержание C_xH_y во всех трех случаях, представленных на графике, уменьшилось примерно на 50 ppm. Однако относительная величина снижения содержания C_xH_y в ОГ при добавках водорода больше, так как

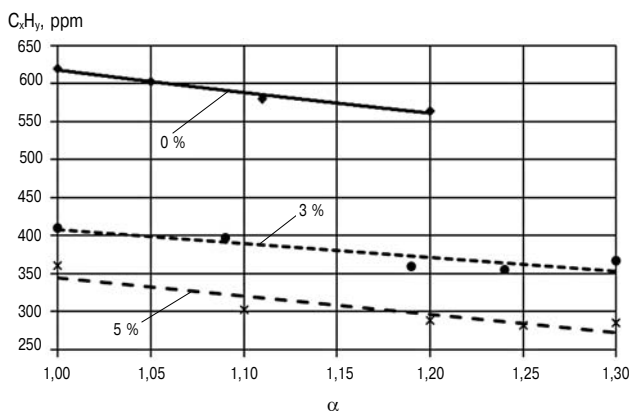


Рис. 4. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов от коэффициента избытка воздуха при различных добавках водорода

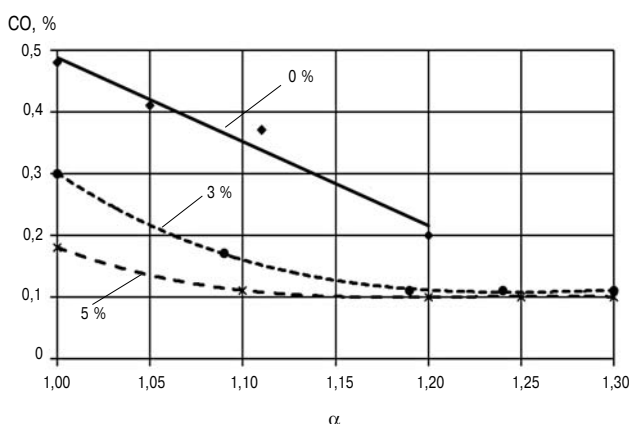


Рис. 5. Зависимость концентрации оксида углерода от коэффициента избытка воздуха при различных добавках водорода

меньше содержание этого компонента ОГ в исходной точке. То обстоятельство, что наклон прямых на рис. 4 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 топливоздушной смеси, не связаны с добавками водорода.

Содержание оксида углерода в ОГ по мере обеднения топливоздушной смеси, как видно из рис. 5, также уменьшается как с добавками водорода, так и без них. При работе без добавок водорода полученную зависимость содержания CO от α в исследованном диапазоне изменения последнего можно считать линейной. При работе с добавками водорода возможные пределы обеднения существенно шире. В этих пределах содержание CO снижается при обеднении от стехиометрии до $\alpha = 1,2$, а при обеднении большем, чем $\alpha = 1,2$, содержание оксида углерода в ОГ остается практически неизменным. Обращает

на себя внимание то обстоятельство, что содержание CO перестает меняться, когда значение оказывается выше, чем предел эффективного обеднения при работе без добавок водорода.

Проведенные экспериментальные исследования влияния добавок водорода на показатели РПД ВАЗ-311 при его работе с обеднением топливоздушной смеси позволяют сделать следующие выводы:

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. На режиме $p_e = 0,2$ МПа и $n = 2000$ об/мин удельный эффективный расход топлива при добавке 5 % водорода уменьшается на 4,2 %. Содержание несгоревших углеводородов снижается, соответственно, в 1,5 и в 1,55 раза.

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.

Литература

1. Hu C. et al. Development of Rotary Piston Engine Worldwide // AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications (IEA 2015). Atlantis Press, 2015.
2. Pulkrabek W.W. Engineering fundamentals of the internal combustion engine. 2004.
3. Amrouche F. et al. Extending the lean operation limit of a gasoline Wankel rotary engine using hydrogen enrichment // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Т. 41. № 32. С. 14261–14271.
4. Wakayama N. et al. Development of hydrogen rotary engine vehicle // 16th World Hydrogen Energy Conference (Lyon, France, 2006). 2006.
5. 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.
6. 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.
7. Kawahara N. et al. Cycle-resolved measurements of the fuel concentration near a spark plug in a rotary engine using an in situ laser absorption method // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. Т. 31. №. 2. С. 3033–3040.
8. Зиновьев И.В. Особенности процесса сгорания в роторно-поршневом двигателе и некоторые пути его совершенствования: дисс. ... канд. тех. наук 05.04.02. Москва, 1983.

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*. 2018. Т. 43. №. 3. С. 1902–1908.
10. *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.
11. *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.
12. *Shi C. et al.* Combined influence of hydrogen direct-injection pressure and nozzle diameter on lean combustion in a spark-ignited rotary engine // *Energy Conversion and Management*. 2019. Т. 195. С. 1124–1137.
13. *Федянов Е.А. и др.* Влияние добавок свободного водорода на экологические показатели роторно-поршневого двигателя // *Двигателестроение*. 2018. № 2. С. 35–38.
14. *Levin Y.V., Prikhodkov K.V., Fedyanov E.A.* Influence of Hydrogen Additives on Cycle-to-Cycle Variability of Working Process of Rotary Engine // *International Conference on Industrial Engineering*. Springer, Cham, 2019. С. 617–624.
15. *Федянов Е.А., Левин Ю.В., Шумский С.Н.* Использование фазированной подачи малых добавок водорода для улучшения показателей роторного двигателя Ванкеля // *Двигателестроение*. 2020. № 2. С. 9–12.
16. Левин Ю.В. Улучшение топливной экономичности и экологичности роторно-поршневого двигателя за счет добавок свободного водорода к основному топливу: дисс. ... канд. техн. наук 05.04.02. Волгоград, 2016. 128 с.
17. Улучшение топливной экономичности и экологических показателей роторно-поршневых двигателей: монография / Е.А. Захаров, Ю.В. Левин, Е.А. Федянов, С.Н. Шумский; ВолгГТУ. Волгоград, 2020. 152 с.