

УДК 621.437

Е. А. Федянов, Ю. В. Левин, Е. А. Захаров, В. А. Алексейчук

**Улучшение показателей роторно-поршневого двигателя Ванкеля за
счет фазированной подачи водорода**

Волгоградский государственный технический университет

Е. А. Fedyanov, Y. V. Levin, E. A. Zakharov, V. A. Alekseichuk

**Improvements of indicators of rotary-piston Wankel engine due to phased
hydrogen supply**

Volgograd State Technical University

В последнее время водород рассматривается в качестве альтернативного топлива для силовых установок транспортных средств. Двигатель Ванкеля наиболее приспособлен для использования водорода, чем традиционные поршневые двигатели, из-за меньшей вероятности преждевременного воспламенения и обратной вспышки. Добавка водорода помогает уменьшить неполное сгорание топлива вблизи вершин ротора. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований рабочего процесса роторно-поршневого двигателя Ванкеля ВАЗ-311 с фазированной подачей добавки водорода. Улучшение экологических и экономических показателей роторно-поршневого двигателя можно добиться за счет изменения момента подачи водорода.

Ключевые слова: роторно-поршневой двигатель Ванкеля, фазированный впрыск топлива, добавка водорода.

Recently hydrogen is considered as an alternative fuel for vehicles power unit. Wankel engine is more suited for hydrogen using than conventional piston engines due to less probability of pre-ignition or backfire. Hydrogen additive helps to decrease incompleteness of combustion in the volumes near an apex of the rotor. The results of experimental research workflow rotary-piston engine VAZ-311 with phased hydrogen additive supply are presented. Improving the

environmental and economic performance of the rotary-piston engine can be achieved by changing the time of hydrogen supply.

Keywords: rotary-piston Wankel engine, phased injection, the addition of hydrogen.

Роторно–поршневые двигатели (РПД) Ванкеля имеют лучшие показатели по уравновешенности и металлоемкости по сравнению с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ПДВС) 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, обусловленное вращением ротора [2, 6]. Как показывают исследования [6–8], в том числе проведенные нами [9, 10], 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 ПДВС, приспособлен к работе на водороде. Отсутствие в конструкции РПД Ванкеля выпускного клапана почти полностью исключает вероятность преждевременного воспламенения водорода.

Особенности конфигурации камеры сгорания и направленного движения заряда в РПД Ванкеля позволяют осуществить расслоение топливовоздушного заряда за счет фазированной подачи водорода и бензина на такте впуска. Подачу водорода при этом необходимо осуществлять таким образом, чтобы топливовоздушная смесь, обогащенная водородом, располагалась преимущественно в зоне, прилегающей к задней вершине ротора,

где изначально и происходит неполное сгорание топливовоздушной смеси [11].

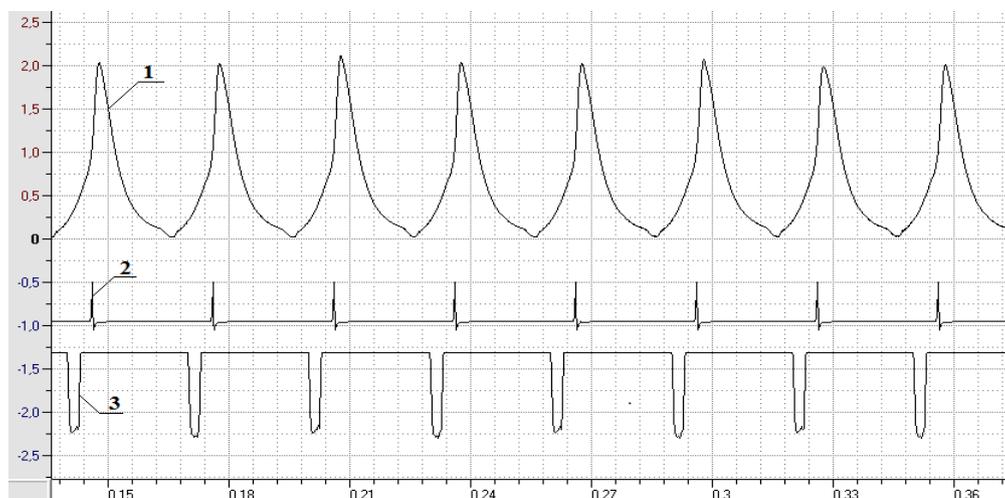
С целью определения оптимального момента подачи водорода на такте впуска были проведены экспериментальные исследования на односекционном РПД ВАЗ-311. РПД Ванкеля ВАЗ-311 с рабочим объемом 649 см³ и степенью сжатия 9,3 был установлен на испытательном стенде, оснащенном комплексом необходимой измерительной аппаратурой. Подача водорода, как и подача бензина, осуществлялась с помощью форсунок, установленных во впускном коллекторе РПД. Система управления впрыскиванием позволяла в широких пределах варьировать моментами начала и длительностью впрыскивания обеих форсунок.

Испытания проводились на осредненном режиме для городского испытательного цикла: $n = 2000$ мин⁻¹, $p_e = 0,2$ МПа. Момент опережения зажигания для лидирующей свечи «L» составлял 26 град. по углу поворота эксцентрикового вала (ПЭВ) до ВМТ, для дожигающей свечи «T» — 30 град. ПЭВ до ВМТ. Запись давления в камере сгорания РПД осуществлялась с помощью пьезоэлектрического датчика фирмы «Kistler» (тип 6118B), встроенного в свечу зажигания «L». Помимо давления на другие каналы АЦП подавались импульсы с водородной форсунки и датчика положения ВМТ. Пример записи сигналов представлен на рис. 1.

Топливоздушная смесь в камеру сгорания подавалась стехиометрического состава, величина массовой добавки водорода при этом составляла 2%. Момент подачи и длительность открытия бензиновой форсунки не менялся.

В таблице 1 приведены результаты испытаний с расслоением топливовоздушного заряда. В каждом опыте изменялся момент начала подачи водорода (Ψ_1) относительно начала открытия впускного окна рабочей кромкой ротора по углу ПЭВ. Запись сигналов с водородной форсунки и датчика ВМТ позволила определить момент начала подачи водорода по

углу ПЭВ относительно ВМТ (Ψ_2) для соседней рабочей камеры по ходу вращения ротора.



1 — запись давления в рабочей камере РПД; 2 — отметка ВМТ;

3 — сигнал с водородной форсунки

Рис. 1. Пример записи сигналов РПД

Таблица 1

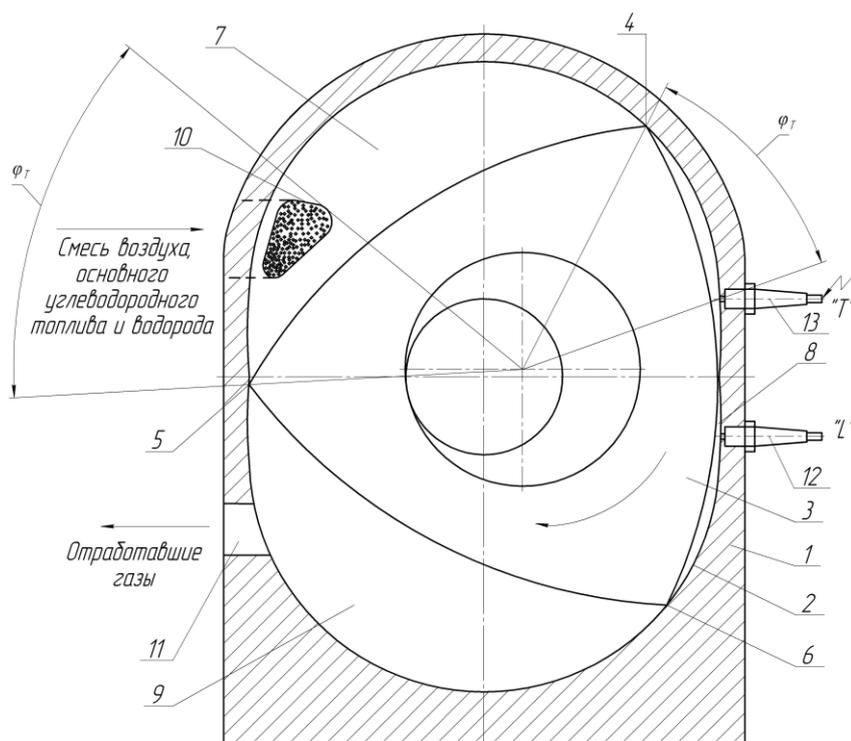
Результаты испытаний с расслоением топливоздушной смеси

Ψ_1° ПЭВ от начала впуска	Ψ_2° ПЭВ до ВМТ	C_xH_y , млн ⁻¹	CO, %	g_e , г/(кВт·ч)
45	105	500	0,4	526,9
63	87	484	0,38	524,4
80	70	452	0,33	514,7
97	53	419	0,28	504,8
113	37	422	0,32	517,1
129	21	460	0,35	529,1

Из таблицы 1 видно, что изменение момента подачи водорода позволяет не только улучшить экологические характеристики РПД, но и повысить топливную экономичность. Оптимальным моментом подачи водорода по углу поворота эксцентрикового вала для режима осредненного городского ездового цикла является 97° после начала такта впуска, что соответствует 53° ПЭВ до ВМТ для соседней камеры. Величина эффективного

удельного расхода при этом уменьшилась на 4,2 %, а количество несгоревших углеводородов с отработавшими газами сократилось на 16,2 %.

При подаче водорода и бензина следует учитывать транспортную задержку от форсунок до кромки впускного окна РПД. Момент поступления водорода в рабочую камеру РПД через впускное окно смещается ещё ближе к ВМТ. В этом случае начало попадания топливовоздушной смеси, обогащенной водородом, в рабочую камеру РПД совпадает с моментом подачи искры на дожигающую свечу зажигания «Т» (φ_T) в соседней, по ходу вращения ротора, камере (см. рис. 2). Если водород будет поступать рань-



1 — статор; 2 — эпитрохоидная поверхность; 3 — ротор; 4, 5, 6 — вершины ротора; 7, 8, 9 — рабочие камеры РПД; 10 — боковое впускное окно; 11 — выпускное окно; 12 — лидирующая свеча зажигания «L»; 13 — дожигающая свеча зажигания «Т»

Рис. 2. Момент начала подачи водорода при расслоении топливовоздушного заряда в РПД Ванкеля

ше момента времени подачи искры на дожигающую свечу «Т», то это приведёт к повышенному расходу водорода, а если позже – к неполному сгоранию основной топливовоздушной смеси у задней вершины ротора из-за недостатка добавки водорода.

Подача водорода в конце такта впуска позволяет при сохранении положительного эффекта уменьшить расход водорода, что важно в связи со сложностью генерации и хранения большого количества водорода на борту наземных транспортных средств.

Литература:

[1] Броладзе К.Э. *Многотопливные РПД «WANKEL» AG*. Международный научный журнал «Воздушный транспорт», 2013, №1 (8), с. 16-36.

[2] Boretti A. *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., Silva C., Brito F. P., Martins J. *Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders for electric vehicles*. Energy Conversion and Management, 2012. Т. 58, p. 120-133.

[4] Chen H., Pan C., Xu X., Zhang X., Xu H. *Development of Rotary Piston Engine Worldwide*. AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications. Atlantis Press, 2015, p. 180 – 183.

[5] Wakayama N., Morimoto K., Kashiwagi A., Saito T. *Development of hydrogen rotary engine vehicle*. 16th World Hydrogen Energy Conference, Lyon, France, 2006.

[6] Amrouche F., Erickson P., Park J., Varnhagen S. *An experimental investigation of hydrogen-enriched gasoline in a Wankel rotary engine*. International Journal of Hydrogen Energy, 2014. Т. 39, p. 8525 – 8534.

[7] Fan B., Pan J., Yang W., Zhu Y., Chen W. *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, p. 4039-4053.

[8] Amrouche F., Erickson P. A., Park J. W., Varnhagen S. *Extending the lean operation limit of a gasoline Wankel rotary engine using hydrogen enrichment*. International Journal of Hydrogen Energy, 2016. Т. 41, №. 32, p. 14261-14271.

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

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

[11] Федянов Е.А., Захаров Е.А., Левин Ю.В., Гольденберг Е.М. *Способ работы роторно-поршневого двигателя внутреннего сгорания*. Пат. 2546933 РФ, МПК F02B53/10, ВолгГТУ, 2015.