

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ СЖАТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА

© 2016

**В.В. Смоленский**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления»  
**Н.М. Смоленская**, кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры «Общая и теоретическая физика»  
**Д.А. Павлов**, кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой «Энергетические машины и системы управления»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** водород; сжатый природный газ; метан; процесс сгорания; двигатель внутреннего сгорания (ДВС); холостой ход.

**Аннотация:** Режимы глубокого дросселирования, к которым относятся и режимы холостого хода (ХХ), являются самыми продолжительными по времени при эксплуатации автомобиля в условиях города. Однако эффективность рабочего процесса на режимах глубокого дросселирования остается еще на достаточно низком уровне, в связи с высоким разряжением на впуске и значительной долей остаточных газов. Статья посвящена оценке влияния водорода на неравномерность протекания процесса сгорания сжатого природного газа (СПГ) в двигателе на режимах ХХ через оценку изменения показателя политропы как параметра, отображающего направление и интенсивность теплообменных процессов. Также в статье рассмотрена возможность определения количества остаточных газов и их доли в рабочей смеси. Проведенные экспериментальные исследования по изучению влияния водорода на неравномерность циклов на режиме ХХ двигателя ВАЗ-2111 показали уменьшение разброса по максимальному давлению в цилиндре двигателя при увеличении доли водорода с 0 до 6 % в газовом топливе. Подробное изучение влияния водорода на неравномерность циклов проводилось для трех стехиометрических составов смеси СПГ с долей водорода 0, 4 и 6 %, в которых были выбраны по три последовательных цикла, наиболее отражающих неравномерность работы двигателя. Исследования показателя политропы на выбранных циклах позволили определить количество остаточных газов и их долю в рабочей смеси, а также показали значительное влияние полноты сгорания в предшествующем цикле на протекание термодинамических процессов на такте сжатия и эффективность процесса сгорания в последующем цикле. Полученные результаты позволяют оценить влияние добавки водорода на процесс сгорания СПГ и сделать вывод, что добавка 6 % водорода позволяет лучше инициировать процесс воспламенения, тем самым предотвращая пропуски зажигания, и значительно уменьшает количество циклов с неполным сгоранием, повышая эффективность рабочего процесса на режимах ХХ.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс сгорания в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) на режимах глубокого дросселирования в условиях быстроизменяющихся температуры, давления и объема в значительной мере зависит от химической активности рабочей смеси [1–5], которая, в свою очередь, зависит не только от соотношения окислителя и горючего, но и от количества и химической активности остаточных газов, доля которых может превышать долю горючей смеси [6–9]. Исследования, посвященные выявлению условий повышения эффективности процесса сгорания забалластированной горючей смеси за счет применения химических активаторов горения, являются актуальными и несут практическую значимость [10–13].

Цель работы – исследование влияния водорода на условия протекания процесса сгорания сжатого природного газа (СПГ) в двигателе ВАЗ-2111 на режимах холостого хода как наиболее сложных и неравномерных режимах работы двигателя.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились на кафедре «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета на моторном стенде, оснащенный оборудованием, пре-

дусмотренным ГОСТ 14846-81. Для иллюстрации на рис. 1 представлена фотография моторного стенда с двигателем ВАЗ-2111.

Дополнительно моторный стенд и двигатель оснащались системой индицирования производства ООО «МВГ» (г. Санкт-Петербург) и системой газового анализа на базе газоанализатора фирмы «Мета» (г. Жигулевск).

Система индицирования включала в себя тензометрический датчик давления ДМВГ с собственной частотой 20 кГц. Для определения положения коленчатого вала использовался оптический датчик, а регистрация данных проводилась на систему сбора данных L-783M производства L-Card.

Исследования проводились на режимах холостого хода путем снятия регулировочных характеристик по составу смеси. Состав смеси варьировался от коэффициента избытка воздуха  $\alpha=0,7$  до максимально возможного «обеднения» смеси ( $\alpha=1,3\div 1,5$ ). Угол опережения зажигания выбирался оптимальным, исходя из условия минимального расхода топлива.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных стендовых испытаний двигателя ВАЗ-2111 была получена регулировочная характеристика холостого хода по составу смеси при

работе на СПГ и при добавке водорода 4 и 6 % от массы топлива, при варьировании положением дроссельной заслонки и оптимальном угле опережения зажигания. Результаты изменения расхода воздуха представлены на рис. 2.



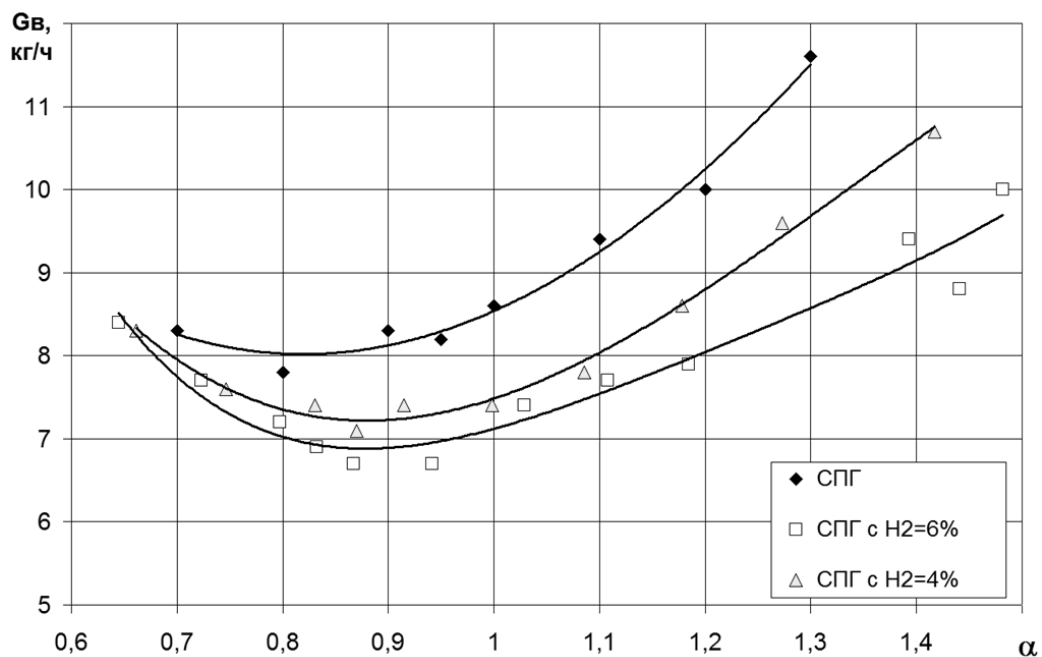
**Рис. 1.** Двигатель VAZ-2111 с распределенным впрыском топлива

Из рис. 2 видно, что расход воздуха минимален в области коэффициентов избытка воздуха 0,8–0,9 (это объясняется максимальными скоростями сгорания), тем самым позволяя больше закрывать дроссельную заслонку. Оценивая влияние водорода на изменение расхода воздуха, следует отметить, что водород значительно повышает химическую активность горючей смеси, что отражается в уменьшении оптимального угла опережения зажигания (УОЗ) с 38° поворота коленчатого вала (ПКВ) при работе на СПГ до 35 и 25° ПКВ при работе на СПГ с добавкой водорода 4 и 6 % соответственно, при стехиометрическом составе смеси [14–15]. Это позволяет полностью закрыть дроссельную заслонку на данном составе смеси, создав разрежение во впускном коллекторе  $\Delta p=0,62 \text{ кг/см}^2$  при работе на СПГ и  $\Delta p=0,66 \text{ кг/см}^2$  при работе на СПГ с добавкой водорода 4 и 6 % соответственно, и обеспечить минимальные расходы топлива и воздуха.

Рассматривая влияние добавки водорода на разрежение во впускном коллекторе, видим (рис. 2), что, несмотря на значительные изменения положения дроссельной заслонки, давление уменьшилось не столь значительно, в связи с низкой плотностью водорода, что положительно сказалось на изменении насосных потерь при закрытии дроссельной заслонки.

На рис. 3, 4 и 5 представлены осциллограммы индикаторного давления для стехиометрического состава смеси, на которых отмечены по три последовательных цикла для дальнейшей оценки.

Выбранные последовательные циклы приведены для детального анализа на рис. 6, 7 и 8, где показано, что максимальное давление в цикле с пропуском зажигания без водорода больше, чем в цикле с долей водорода 4 %, что говорит о большем количестве рабочей смеси в цилиндре двигателя.



**Рис. 2.** Зависимость расхода воздуха от состава смеси на режиме холостого хода

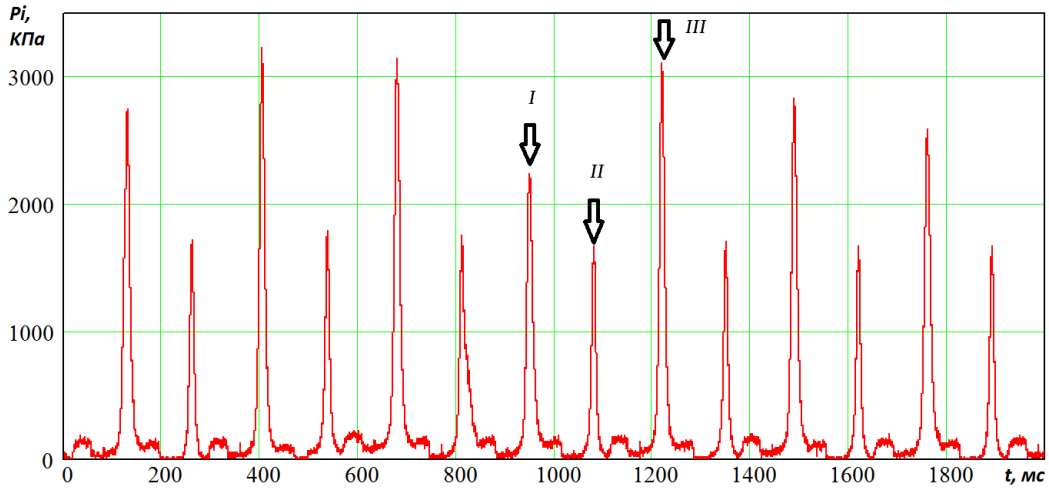


Рис. 3. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ

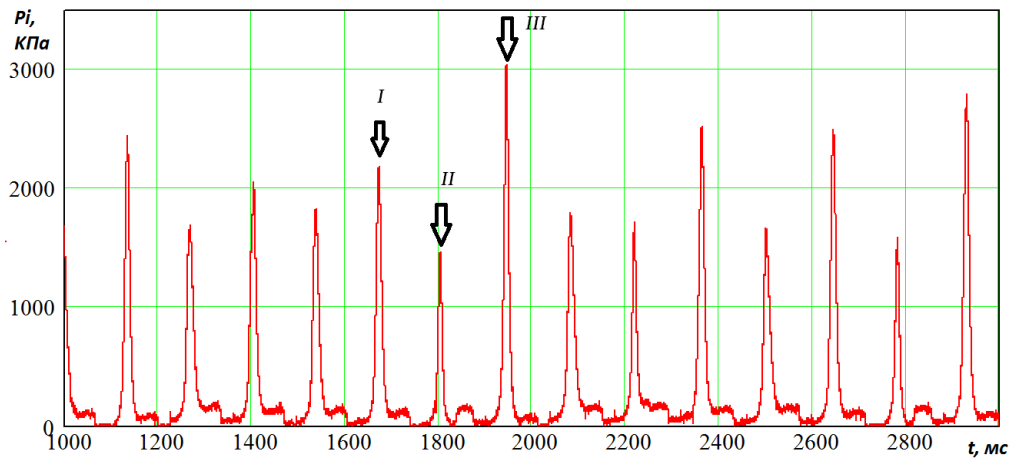


Рис. 4. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ с добавкой 4 % водорода

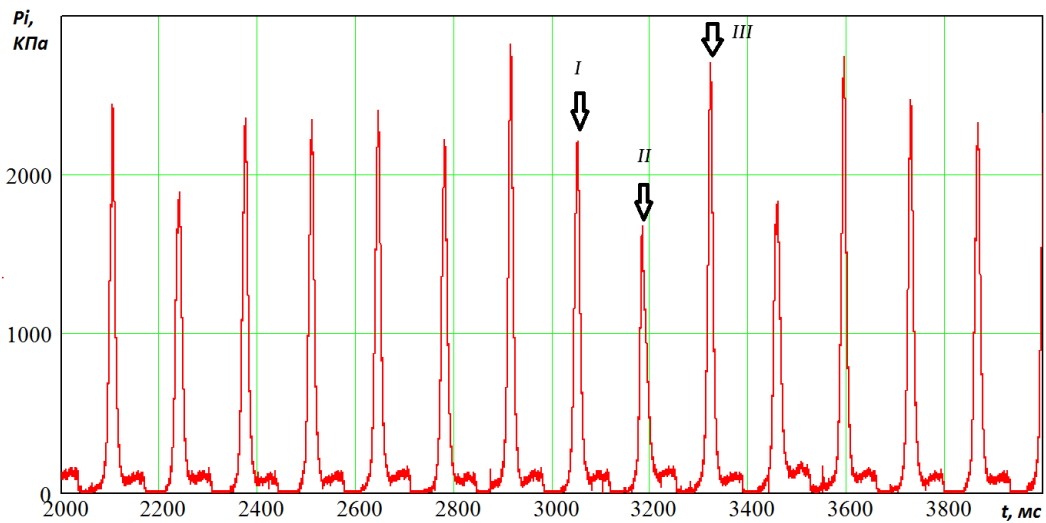


Рис. 5. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ с добавкой 6 % водорода

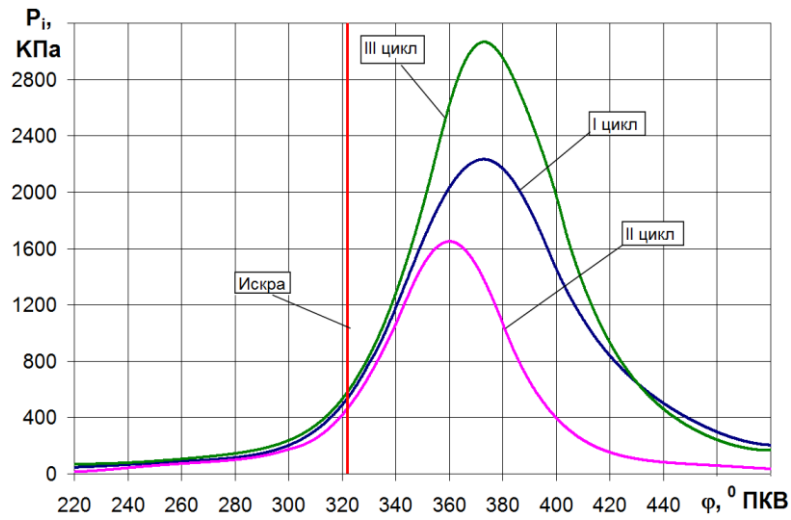


Рис. 6. Индикаторное давление на рассматриваемых циклах для СПГ

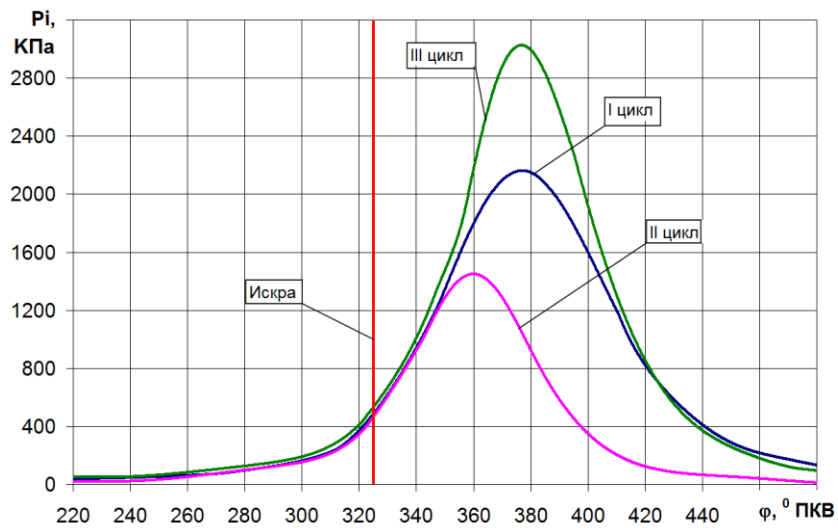


Рис. 7. Индикаторное давление на рассматриваемых циклах для СПГ с добавкой 4 % водорода

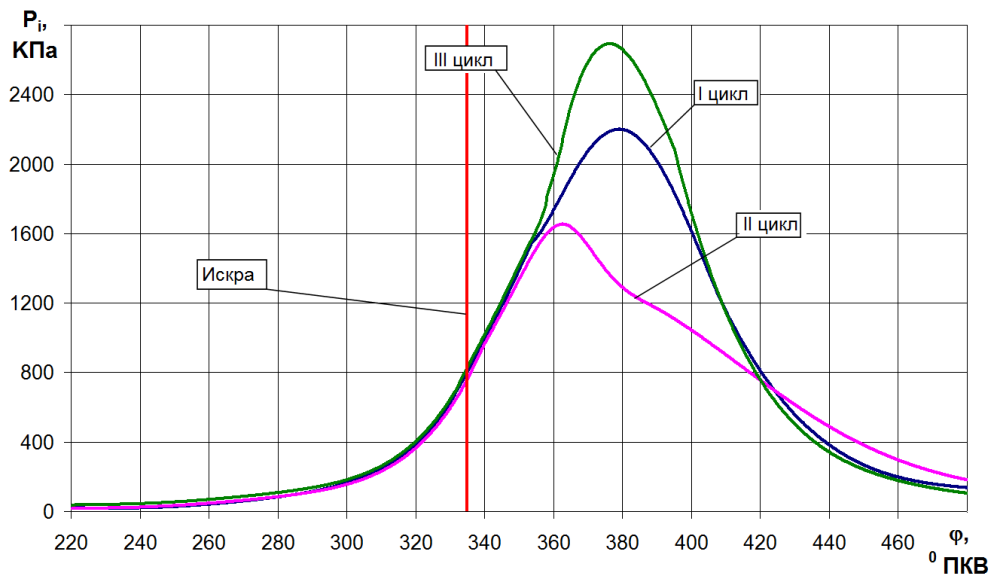


Рис. 8. Индикаторное давление на рассматриваемых циклах для СПГ с добавкой 6 % водорода

Одним из основных параметров, характеризующих протекание процесса сгорания, является характеристика тепловыделения. А для адекватной оценки характеристики тепловыделения в процессе сгорания необходимо знать массу рабочего тела [13; 16] с учетом количества остаточных газов, ведь иначе в первом законе термодинамики будет два неизвестных – температура и количество рабочей смеси.

$$Q = \Delta U + A,$$

где  $Q$  – количество подведенной теплоты;  
 $\Delta U$  – изменение внутренней энергии;  
 $A$  – совершенная работа.

Особенно важно определить массу рабочего тела с учетом количества остаточных газов для режимов глубокого дросселирования, где доля остаточных газов имеет величину, соизмеримую с долей свежей смеси. Вес рабочего тела можно определить из уравнения состояния:

$$p \cdot V = Z_r(p, T) \cdot G_{PT} \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

где  $p$  – текущее давление;  
 $V$  – текущий объем;  
 $T$  – текущая температура;  
 $R$  – газовая постоянная смеси газов;  
 $G_{PT}$  – вес рабочего тела;  
 $Z_r(p, T)$  – коэффициент сжимаемости реального газа.

Для определения действительного количества рабочей смеси необходимо решить уравнение состояния (1) в точке, где показатель политропы равен показателю адиабаты, а следовательно, теплообмен со стенками цилиндра отсутствует:  $dQ=0$ ; тогда можно принять, что температура рабочей смеси равна температуре стенки цилиндра, которая, в свою очередь, равна температуре охлаждающей жидкости. Тогда масса остаточных газов будет находиться по формуле:

$$m_{ост} = m_{PT} - m_{возд} - m_{топл}, \quad (2)$$

где  $m_{PT}$  – масса рабочего тела;  
 $m_{возд}$  – масса воздуха;  
 $m_{топл}$  – масса топлива.

Текущую температуру в цилиндре двигателя при угле поворота коленчатого вала  $\varphi$  можно определить по формуле:

$$T_\varphi = \frac{p_\varphi \cdot V_\varphi}{Z_r(p, T) \cdot G_{PT} \cdot R}.$$

Газовая постоянная определяется как сумма индивидуальных газовых постоянных компонентов топливно-воздушной смеси (ТВС) и сгоревшей смеси:

$$Ri_{смеси} = \frac{Ri_1 \cdot m_1 + Ri_2 \cdot m_2 + \dots + Ri_n \cdot m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n},$$

где  $Ri_i$  – индивидуальная газовая постоянная  $i$ -й компоненты;  
 $m_1 + m_2 + \dots + m_n$  – масса каждой компоненты газовой смеси.

На основании анализа характеристик часового расхода воздуха, водорода и СПГ получим среднюю цикловую массу компонентов рабочего тела на рассматриваемых режимах работы, приведенную в таблице 1, где также указаны масса рабочей смеси, определенная по формуле (1), и масса остаточных газов, определенная по формуле (2).

Полученные результаты по оценке массы рабочей смеси на рассматриваемых режимах холостого хода показывают значительное содержание остаточных газов в ней. При этом масса остаточных газов при работе на СПГ меньше, чем при работе на СПГ с добавкой 4 % водорода, что связано с большим открытием дроссельной заслонки и, как следствие, меньшим перепадом давления на впуске. А уменьшение массы остаточных газов на одинаковом положении дроссельной заслонки при увеличении доли водорода связано с меньшим разрежением из-за низкой плотности водорода.

Анализ изменения показателя политропы позволяет определить направление и интенсивность протекания теплообменных процессов и показать влияние химического состава рабочего тела на эффективность использования теплоты, получаемой вследствие сгорания топлива [16–19]. Проведенный анализ изменения показателя политропы в рассматриваемых циклах показал, что на впуске в циклах, как правило, наблюдаются высокие значения показателя политропы вследствие понижения температуры рабочего тела из-за разрежения газа, что приводит к значительному нагреву от стенок цилиндра двигателя и камеры сгорания. Исключением являются циклы, которые следуют за циклами с частичным сгоранием, где температура остаточных газов значительна, что повышает температуру свежей смеси. Анализ изменения политропы в процессе расширения показал, что циклы под номером III для каждого режима работы имеют большие величины показателя политропы расширения вследствие более быстрого сгорания и, следовательно, большей интенсивности теплоотвода в стенку. Для циклов с пропуском зажигания характерны значения показателя политропы расширения, близкие к показателю адиабаты, что показывает практически полное отсутствие теплового обмена между стенкой и рабочим телом. Исключением является цикл с частичным

Таблица 1. Средняя цикловая масса компонентов рабочего тела на рассматриваемых режимах работы

$\alpha$	$m_{H_2}$ , Г	$m_{СПГ}$ , Г	$m_{в}$ , Г	$m_{гор. смеси}$ , Г	$m_{раб. смеси}$ , Г	$m_{ост. газ}$ , Г	$\gamma_g$
1	0	0,00615	0,08432	0,0905	0,212	0,121	1,34
1	0,000198	0,00480	0,07255	0,0775	0,208	0,130	1,67
1	0,000294	0,00433	0,07255	0,0772	0,194	0,116	1,50

Таблица 2. Средние показатели политропы сжатия и расширения на рассматриваемых режимах работы

$\alpha$	$G_{m(H_2)}$ , кг/ч	№ цикла	Средний показатель политропы сжатия	Средний показатель политропы расширения
1	0	I	1,531	1,730
		II	1,820	1,472
		III	1,501	1,841
1	0,02	I	1,462	1,760
		II	1,801	1,423
		III	1,602	2,066
1	0,03	I	1,474	1,841
		II	1,802	1,035
		III	1,751	2,020

сгоранием (II цикл при работе на СПГ с 6 %  $H_2$ ), где наблюдается частичное сгорание топлива в процессе расширения, что соответствует подводу теплоты при расширении, поэтому показатель политропы близок к единице и значительно ниже показателя адиабаты. Полученные средние показатели политропы в рассматриваемых циклах приведены в таблице 2.

Средний показатель политропы определялся по индикаторной диаграмме по формуле:

$$n = \log \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \left( \frac{P_1}{P_2} \right),$$

где  $p_1$ ,  $V_1$  и  $p_2$ ,  $V_2$  – давление и объем в начале и в конце рассматриваемого участка индикаторной диаграммы.

Средний показатель политропы сжатия определялся на участке от 220 до 320° ПКВ, а средний показатель политропы расширения – на участке от 400 до 480° ПКВ.

Обобщая полученные результаты по анализу влияния добавки водорода в СПГ на неравномерность протекание процесса сгорания, следует отметить значительное повышение равномерности процесса сгорания, как это видно при добавке 4 %, а добавка уже 6 % водорода в СПГ приводит к тому, что полные пропуски зажигания полностью отсутствуют. Следовательно, состав остаточных газов и состав рабочего тела при добавке 6 % водорода более постоянны и не будут так сильно отличаться от цикла к циклу в зависимости от качества протекания процесса сгорания в предыдущем цикле, так как в цикле с полным сгоранием остаточные газы состоят в основном из продуктов сгорания, а в цикле за пропуском зажигания остаточные газы имеют значительное количество несгоревшей ТВС. Тем самым в цикле за пропуском зажигания повышается концентрация горючей смеси, что позволяет провести процесс сгорания с большими значениями максимального давления, как это наблюдается при работе на СПГ [19; 20].

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали значительное влияние добавки водорода в СПГ на снижение межциклового неравномерности действительных циклов ДВС на режимах холостого хода. Установлено, что добавка 6 % водорода от массы топлива делает возможным более быстрое и стабильное сгорание, что отражается

в уменьшении оптимального угла опережения зажигания с 38 до 25° ПКВ при большем угле закрытия дроссельной заслонки, обеспечивающей увеличение разрежения во впускном коллекторе с  $\Delta p=0,62$  кг/см<sup>2</sup> до  $\Delta p=0,66$  кг/см<sup>2</sup>. Добавка водорода позволяет снизить расход воздуха и топлива, несмотря на большую забластированную рабочую смеси остаточными газами, что предполагает повышение термодинамической эффективности рабочего процесса двигателя. Также в работе показано, что показатель политропы сжатия на исследуемых режимах значительно выше принятых значений для работы ДВС на полной нагрузке.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-38-00331.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shaikin A.P., Galiev I.R. On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings // *Technical Physics*. 2016. Vol. 61. № 8. P. 1206–1208.
2. Gortyshov Y.F., Gureev V.M., Misbakhov R.S., Gumerov I.F., Shaikin A.P. Influence of fuel hydrogen additives on the characteristics of a gas-piston engine under changes of an ignition advance angle // *Russian Aeronautics*. 2009. Vol. 52. № 4. P. 488–490.
3. Каменев В.Ф., Фомин В.М., Хрипач Н.А., Лежнев Л.Ю. Исследования энергетических и экологических показателей работы автомобильного двигателя на бензородородных топливных композициях // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2005. № 9. С. 16–23.
4. Ивашин П.В., Рамазанов М.П., Твердохлебов А.Я., Шайкин А.П., Ясников И.С. Об оценке работы цикла ДВС ионизационным зондом // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2013. № 3-2. С. 122–127.
5. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Бобровский И.Н. Исследование основных характеристик сгорания в поршневых двигателях с внешним смесеобразованием // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2010. № 4. С. 94–98.
6. Каменев В.Ф. Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1996. 454 с.

7. Кутенёв В.Ф., Фомин В.М., Каменев В.Ф. Улучшение эффективности работы двигателя с искровым зажиганием в период холодного пуска и прогрева путем использования химически активных веществ // Труды НАМИ. 2013. № 252. С. 42–61.
8. Хрипач Н.А., Каменев В.Ф., Фомин В.М., Аleshин С.В. Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термохимическим генерированием водородного топлива // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2006. № 4. С. 45–50.
9. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Shaikin A.P. The composition of combustion products formed from gasoline-hydrogen-air mixtures in a constant-volume spherical chamber // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2011. Vol. 5. № 1. P. 75–83.
10. Шайкин А.П., Смоленский В.В. Основные направления и перспективы создания энергоэффективных двигателей для транспортных средств // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1-9. С. 2261–2265.
11. Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М., Смоленский В.В. Применение водорода для повышения полноты сгорания ТВС на режимах пуска и прогрева // Естественные и технические науки. 2013. № 1. С. 346–350.
12. Смоленский В.В., Смоленская Н.М. Применение добавки водорода для создания энергоэффективных двигателей для транспортных средств // Автотранспортное предприятие. 2010. № 10. С. 50–54.
13. Корнеев Н.В., Смоленская Н.М. Модель средней скорости распространения фронта пламени природного газа с добавками водорода для одноцилиндровой установки УИТ–85 имитирующей режимы холодного хода // Естественные и технические науки. 2014. № 9-10. С. 167–171.
14. Шайкин А.П., Галиев И.Р. Связи скорости распространения пламени метановодородного топлива ДВС с параметрами ионизационного тока и концентрацией водорода // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 2. С. 87–91.
15. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р., Дерячев А.Д. К вопросу о взаимосвязи турбулентной скорости распространения и ионизации метановодородного пламени // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 1. С. 51–54.
16. Nemati A., Fathi V., Barzegar R., Khalilarya S. Numerical investigation of the effect of injection timing under various equivalence ratios on energy and exergy terms in a direct injection SI hydrogen fueled engine // International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38. № 2. P. 1189–1199.
17. Teh K.-Y., Miller S.L., Edwards C.F. Thermodynamic requirements for maximum internal combustion engine cycle efficiency. Part 1: Optimal combustion strategy // International Journal of Engine Research. 2008. Vol. 9. № 6. P. 449–465.
18. Chintala V., Subramanian K.A. Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis // Energy. 2014. № 67. P. 162–175.
19. Li Y., Jia M., Chang Y., Kokjohn S.L., Reitz R.D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes // Applied Energy. 2016. № 180. P. 849–858.
20. Zhao Z., Wang S., Zhang S., Zhang F. Thermodynamic and energy saving benefits of hydraulic free-piston engines // Energy. 2016. № 102. P. 650–659.

#### REFERENCES

1. Shaikin A.P., Galiev I.R. On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings. *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 8, pp. 1206–1208.
2. Gortyshov Y.F., Gureev V.M., Misbakhov R.S., Gumerov I.F., Shaikin A.P. Influence of fuel hydrogen additives on the characteristics of a gas-piston engine under changes of an ignition advance angle. *Russian Aeronautics*, 2009, vol. 52, no. 4, pp. 488–490.
3. Kamenev V.F., Fomin V.M., Khripach N.A., Lezhnev L.Y. Investigations of energetic and ecology indices of hydrogen-gasoline mixture fueled vehicle engine. *Mezhdunarodny zhurnal Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2005, no. 9, pp. 16–23.
4. Ivashin P.V., Ramazanov M.P., Tverdokhlebov A.Ya., Shaikin A.P., Yasnikov I.S. Evaluation of internal combustion engine cycle work using an ionic current sensor. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2013, no. 3-2, pp. 122–127.
5. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Bobrovsky I.N. Research of combustion key features in piston engines with outward mixing. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 4, pp. 94–98.
6. Kamenev V.F. *Nauchnye osnovy i puti sovershenstvovaniya toksicheskikh kharakteristik avtomobilnykh dvigateley s iskrovym zazhiganiem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific foundations and the ways to improve toxic characteristics of the automobile spark-ignition engines]. Moscow, 1996. 454 p.
7. Kutenev V.F., Fomin V.M., Kamenev V.F. Improving the efficiency of spark-ignition engine during cold start and warm-up by the use of chemically active substances. *Trudy NAMI*, 2013, no. 252, pp. 42–61.
8. Khripach N.A., Kamenev V.F., Fomin V.M., Aleshin S.V. Thermodynamic analysis of the engine operating cycle with thermochemical generation of hydrogen fuel. *Mezhdunarodny zhurnal Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2006, no. 4, pp. 45–50.
9. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Shaikin A.P. The composition of combustion products formed from gasoline-hydrogen-air mixtures in a constant-volume spherical chamber. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 75–83.
10. Saykin A.P., Smolensky V.V. Main directions and prospects of creation of energy efficient engines for transport vehicles. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2010, vol. 12, no. 1-9, pp. 2261–2265.
11. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Smolensky V.V. The use of hydrogen to increase the completeness of combustion of fuel air mixture to start mode and heating. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 1, pp. 346–350.

12. Smolensky V.V., Smolenskaya N.M. Application of hydrogen agent to create power efficient engines for vehicles. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2010, no. 10, pp. 50–54.
13. Korneev N.V., Smolenskaya N.M. The model of average velocity of propagation of flame-front of natural gas with hydrogen agents for UIT-85 single-cylinder device imitating no-load conditions. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 9-10, pp. 167–171.
14. Shaikin A.P., Galiev I.R. Relationship of flame propagation velocity for methane-hydrogen fuel of the internal combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*, 2016, no. 2, pp. 87–91.
15. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Deryachev A.D. On the issue of relationship of turbulent velocity of spreading and ionization of methane-hydrogen flame. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 51–54.
16. Nemati A., Fathi V., Barzegar R., Khalilarya S. Numerical investigation of the effect of injection timing under various equivalence ratios on energy and exergy terms in a direct injection SI hydrogen fueled engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, no. 2, pp. 1189–1199.
17. Teh K.-Y., Miller S.L., Edwards C.F. Thermodynamic requirements for maximum internal combustion engine cycle efficiency. Part 1: Optimal combustion strategy. *International Journal of Engine Research*, 2008, vol. 9, no. 6, pp. 449–465.
18. Chintala V., Subramanian K.A. Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis. *Energy*, 2014, no. 67, pp. 162–175.
19. Li Y., Jia M., Chang Y., Kokjohn S.L., Reitz R.D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes. *Applied Energy*, 2016, no. 180, pp. 849–858.
20. Zhao Z., Wang S., Zhang S., Zhang F. Thermodynamic and energy saving benefits of hydraulic free-piston engines. *Energy*, 2016, no. 102, pp. 650–659.

#### THE STUDY OF HYDROGEN INFLUENCE ON THE IRREGULARITY OF BEHAVIOR OF COMPRESSED NATURAL GAS COMBUSTION IN INTERNAL-COMBUSTION ENGINES AT NO-LOAD CONDITIONS

© 2016

**V.V. Smolenskiy**, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Energy machines and control systems”

**N.M. Smolenskaya**, PhD (Engineering), senior lecturer of Chair “General and theoretical physics”

**D.A. Pavlov**, PhD (Engineering), Head of Chair “Energy machines and control systems”

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

**Keywords:** hydrogen; compressed natural gas; methane; combustion process; internal-combustion engine (ICE); idle.

**Abstract:** Deep choke modes that include the no-load conditions are the most long lasting while operating a car in the city environment. However, the efficiency of work process at the deep choke modes remain low due to high intake depression and the large proportion of residual gases. The paper covers the evaluation of the hydrogen influence on the irregularity of compressed natural gas (CNG) combustion behavior in the engine at the no-load conditions through the assessment of change of the polytropic index as the parameter displaying the direction and the intensity of heat-exchange processes. The paper considers the feasibility to determine the quantity of residual gases and their proportion in working mixture. Carried out experimental study of the hydrogen influence on the cycles irregularity at the idle modes of the VAZ-2111 engine showed the decrease of variation of maximum pressure in the engine cylinder when increasing the proportion of hydrogen in gas fuel from 0 up to 6 %. The authors carried out the detailed study of hydrogen influence on the cycles' irregularity for three stoichiometric ratios of the CNG mixture with the hydrogen proportion of 0, 4 and 6 %, three the most representative successive cycles displaying the irregularity of engine operation were selected for each of them. The study of the polytropic index on the selected cycles allowed determining the quantity of the residual gases and their proportion in working mixture and showed the significant influence of quality of combustion in the previous cycle on the thermodynamic processes behavior within the compression stroke and the combustion process efficiency in the next cycle. The obtained results allow evaluating the influence of hydrogen addition on the CNG combustion process and concluding that the addition of 6 % hydrogen allows better initiating the ignition process, thereby, preventing the ignition failures and decreases significantly the number of incomplete combustion cycles increasing the efficiency of working process at the idle modes.