

## ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ ОТ СОСТАВА СМЕСИ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ В ДВИГАТЕЛЕ, РАБОТАЮЩЕМ НА ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

*Н.М. Смоленская*

*Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия*

Режим холостого хода для двигателей с искровым зажиганием характеризуется значительной неравномерностью протекания процесса сгорания, которая обуславливается тем, что свежая горючая смесь сильно разбавляется остаточными газами. Характеристика горючести этих газов, в значительной мере определяется предшествующим циклом сгорания. Исследования состояли из стендовых испытаний на двигателе ВАЗ-2111 на режиме холостого хода и термодинамического анализа трех последовательных индикаторных диаграмм, полученных экспериментально, отражающих цикл до пропуска зажигания, цикл с пропуском и цикл после пропуска зажигания. В результате термодинамического анализа определены характеристики изменения работы и внутренней энергии цикла для каждого интервала индикаторной диаграммы размером в один градус поворота коленчатого вала. На основании этого получена характеристика активного тепловыделения для всех исследуемых циклов. Представленные результаты термодинамического анализа процесса сгорания позволяют с большей точностью оценить влияние состава газового топлива на характеристику тепловыделения, так как анализ изменения внутренней энергии проводился по авторской методике, позволяющей провести её оценку без определения температуры и количества рабочего тела, которые при сильном дросселировании являются практически неизвестными параметрами. Полученные результаты показали влияние состава газового топлива и пропуска зажигания на активное тепловыделение и эффективность повышения стабильности сгорания на экономичность работы двигателя. В связи с этим работа посвящена анализу характеристики тепловыделения при экспериментальных исследованиях новых альтернативных газовых топлив, состоящих из природного газа и водорода, который позволит лучше понять и быстрее перейти к этапу проектирования новых двигателей с повышенной эффективностью процесса сгорания на режиме холостого хода. Это является безусловно важной задачей, так как современные тенденции по снижению токсичности автомобильных ДВС заставляют переходить на газовые виды топлива.

*Ключевые слова: сжатый природный газ, водород, процесс сгорания, характеристика тепловыделения, ДВС, холостой ход.*

### **Введение**

Анализ термодинамической эффективности реального процесса в двигателях с искровым зажиганием при подаче топлива во впускной коллектор связан со многими трудностями, особенно при работе на газовых топливах, которые значительно влияют на газодинамические условия потока на впуске, при этом вытесняют часть воздуха, что сказывается на условиях наполнения цилиндра. Это приводит к тому, что многие исследователи проводят оценку термодинамических параметров процесса сгорания, связанных с определением характеристики тепловыделения лишь с косвенной оценкой количества остаточных газов [1–3], что недопустимо при работе на альтернативных газовых топливах и на режимах дросселирования [4–6]. При этих условиях доля остаточных газов может достигать от 20 до 120 % от массы свежей смеси, тем самым делая анализ температуры и, следовательно, доли тепла, направленной на повышение внутренней энергии, недоступным для адекватного анализа, что приводит к неточностям в определении характеристики тепловыделения. Это отражается в отсутствии пояснения, как получена та или иная характеристика тепловыделения, приведенная в большинстве научных работ [3, 7, 8].

В то же время постоянное ужесточение норм к токсичности отработавших газов приводит к тому, что все больше автопроизводителей начинают выпускать модели автомобилей на природном газе, а в дальнейшем и на природном газе с добавками водорода как более экологичном топливе.

В связи с этим разработка подхода для оценки термодинамических процессов при работе на газовом топливе и при любых параметрах дросселирования, а также выявление возможностей повышения эффективности рабочего процесса за счет добавки водорода в природный газ является актуальной задачей проводимых научных исследований [9–11].

Соответственно, целью проводимых исследований являлась апробация нового подхода для оценки изменения внутренней энергии при анализе действительной индикаторной диаграммы двигателя с искровым зажиганием при подаче газового топлива во впускной коллектор, а также выявление влияния водорода на повышение термодинамической эффективности рабочего процесса.

Статья состоит из: введения, где обосновывается актуальность проводимых исследований; описания экспериментального оборудования и методики проведения экспериментальных работ; теоретического раздела, где приведены основные расчетные формулы; аналитического раздела, где проводится анализ полученных расчетных и экспериментальных параметров, отражающих протекание процесса сгорания и влияние на него состава газового топлива; даны основные выводы по работе; приведено обсуждение полученных результатов и анализ их практического применения; выражена благодарность за финансирование проводимых работ за счет средств ГРАНТа РФФИ; приведен перечень используемой литературы.

### 1. Экспериментальное оборудование

Экспериментальные исследования проводились на моторном стенде с двигателем ВАЗ-2111, оснащенный оборудованием, предусмотренным ГОСТ 14846-81. 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 ( $\alpha = 1,3-1,5$ ). Угол опережения зажигания выбирался оптимальным из условия минимального расхода природного газа на режиме. Водород подавался во впускной трубопровод с постоянным расходом 0,02 или 0,03 кг/ч.

В работе исследовалось влияние водорода на условия протекания процесса сгорания сжатого природного газа (СПГ) в двигателе ВАЗ-2111 на режиме холостого хода, как наиболее сложного и неравномерного режима работы двигателя [5, 12].

На рис. 1–3 представлены осциллограммы индикаторного давления для стехиометрического состава смеси, на которых отмечены в качестве примера по три последовательных цикла для дальнейшей оценки. На остальных режимах работы аналогично проведен выбор рассматриваемых циклов.

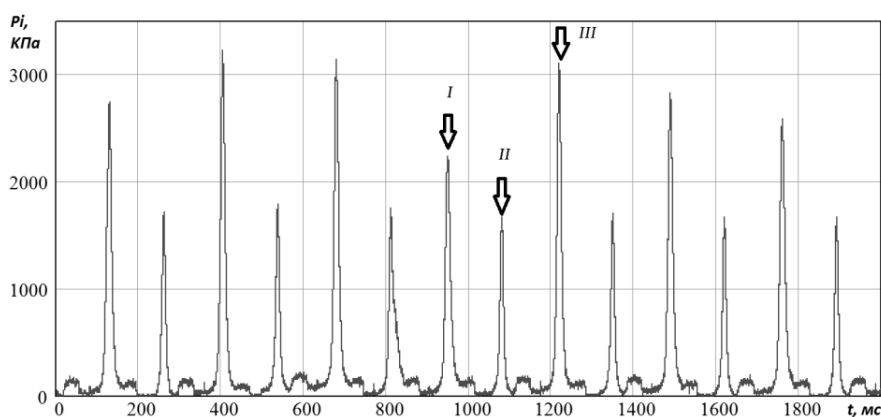


Рис. 1. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$

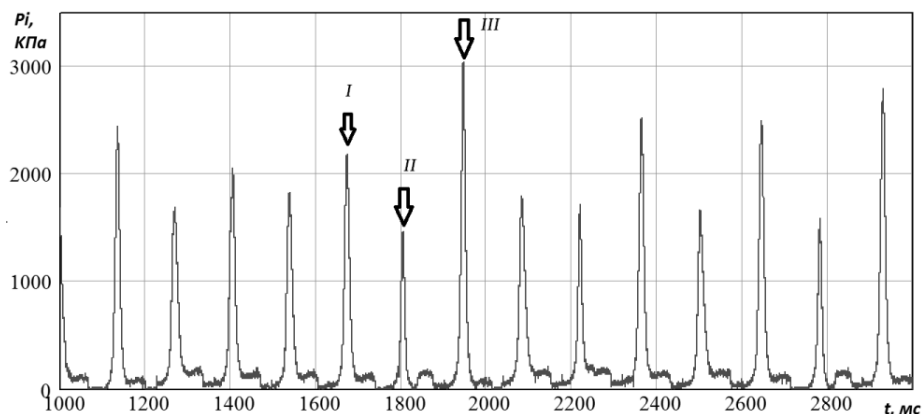


Рис. 2. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ с добавкой 0,02 кг/ч водорода при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,02$

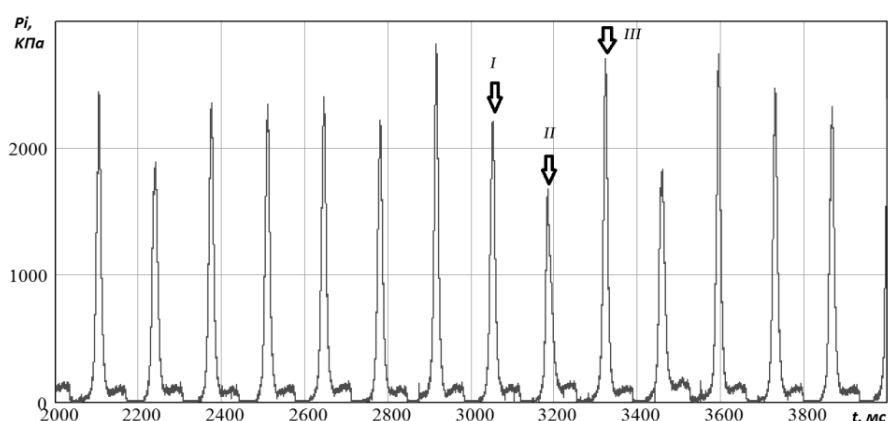


Рис. 3. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ с добавкой 0,03 кг/ч водорода при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,02$

Представленные на рис. 1–3 примеры осциллограмм давления являются характерными для рассматриваемых составов смеси и режимов работы двигателя. Видно, что при работе на СПГ для всех коэффициентов избытка воздуха характерно наличие большого числа пропусков зажигания, как правило один пропуск, а в следующем за ним цикле уже полное сгорание. При работе на СПГ с добавкой 0,02 кг/ч водорода наблюдается подобная картина, но в большинстве случаев мы видим после полного сгорания уже не пропуск зажигания, который можно характеризовать как отсутствие повышения давления над компрессорной линией, а некоторое повышение давления от начала процесса сгорания, связанное с последующим затуханием пламени. Но уже при добавке 0,03 кг/ч водорода мы можем констатировать полное отсутствие чистых пропусков зажигания, имеются лишь циклы с разной полнотой сгорания топлива.

### 2. Расчетные зависимости

Теоретический анализ предложенного подхода для термодинамического анализа действительного цикла ДВС.

Количество выделившейся теплоты в цикле (I) распределяется следующим образом:

$$Q_{\text{цикл}} = Q_{\text{акт}} + Q_{\text{O}} + Q_{\text{нд}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{акт}}$  – теплота, затрачиваемая на повышение внутренней энергии ( $\Delta U$ ) и совершение работы ( $A$ );  $Q_{\text{O}}$  – теплота, потерянная вследствие теплопередачи в стенки цилиндра;  $Q_{\text{нд}}$  – теплота, потерянная на недогорание из-за недостатка кислорода при работе на обогащенном топливе.

$$Q_{\text{акт}} = A + \Delta U, \quad (2)$$

$$A = PdV. \quad (3)$$

Внутренняя энергия определяется по формуле:

$$U = \frac{m}{\mu} \cdot C_V \cdot T, \quad (4)$$

где  $C_V$  – средняя молярная теплоемкость при постоянном объеме;  $T$  – температура;  $m/\mu$  – количество молей газа.

Температура определяется из уравнения состояния, с учетом сжимаемости реального газа:

$$T = \frac{P \cdot V}{\frac{m}{\mu} \cdot Z_r(p, T) \cdot R_\mu}, \quad (5)$$

где  $Z_r(p, T)$  – коэффициент сжимаемости реального газа;  $R_\mu = 8314$  Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная;  $m = m_b + m_t + m_\gamma$  – масса рабочего тела, кг, состоящая из  $m_b$  – массы воздуха,  $m_t$  – массы топлива,  $m_\gamma$  – массы остаточных газов;  $\mu$  – средняя молярная масса.

При таком подходе возникают сложности по достоверному определению массы рабочего тела, так как масса остаточных газов неизвестна.

Выразим внутреннюю энергию, как это показано в выражении (3):

$$U = \frac{m}{\mu} \cdot C_V \cdot T = \frac{m}{\mu} \cdot C_V \cdot \frac{P \cdot V}{\frac{m}{\mu} \cdot Z_r(p, T) \cdot R_\mu} = \frac{C_V \cdot P \cdot V}{Z_r(p, T) \cdot R_\mu}, \quad (6)$$

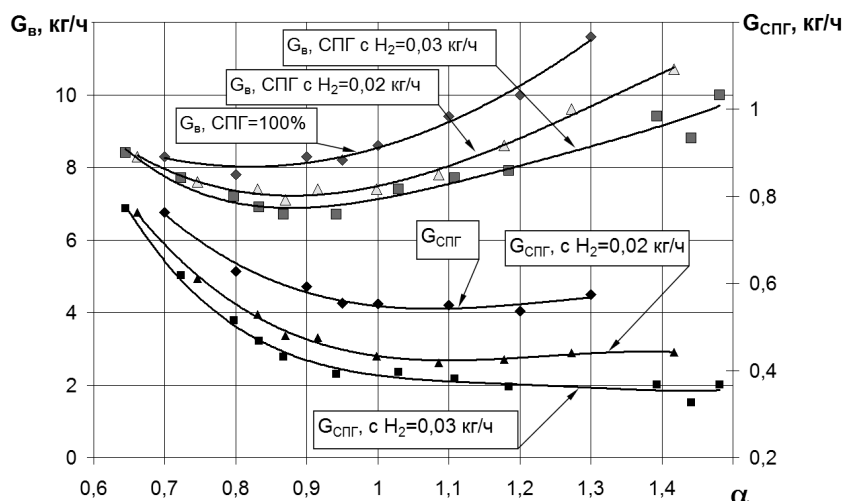
Изменение внутренней энергии на участке будет определяться из выражения (4):

$$\Delta U = \frac{(C_{V1} + C_{V2}) \cdot (V_1 + V_2) \cdot (P_2 - P_1)}{2 \cdot 2 \cdot R_\mu} \cdot \frac{2}{[Z_r(p, T)_1 + Z_r(p, T)_2]}. \quad (7)$$

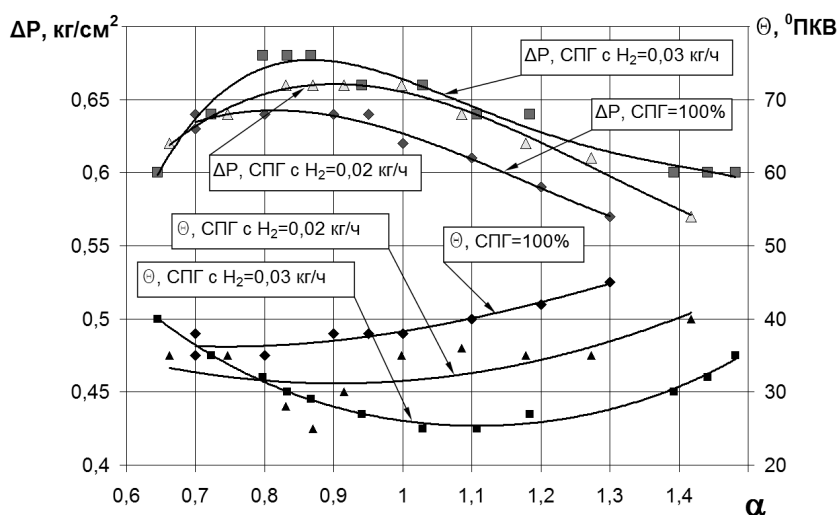
В этом выражении средние молярные теплоемкости для исследуемого диапазона температур изменяются от значений 22 на сжатии и до 30 кДж/(кмоль·град) при сгорании. Коэффициент сжимаемости изменяется в пределах от 0,98 до 1 на сжатии и от 1,12 до 1,2 при сгорании [4]. Таким образом, наличие некоторой неточности в определении данных величин не приводит к значительному росту погрешности определения внутренней энергии. Проведенный анализ показал, что при таком подходе неточность оценки внутренней энергии при неизвестной массе рабочего тела не превышает 3%. Это говорит о целесообразности применения данного подхода для термодинамического анализа процессов сжатия, расширения и сгорания.

### 3. Экспериментальные исследования

В результате проведенных стендовых испытаний по оценке влияния состава газового топлива на параметры тепловыделения в двигателе ВАЗ-2111 получены следующие регулировочные параметры его работы, которые приведены на рис. 4 и 5. На рис. 4 приведена характеристика изменения часового расхода воздуха при варьировании составом смеси и соответствующая характеристика расхода природного газа при работе на СПГ и на СПГ с добавкой водорода 0,02 и 0,03 кг/ч. Оценивая влияние состава смеси на эффективность работы двигателя, следует отметить, что для СПГ и для СПГ с добавкой водорода 0,02 кг/ч характерен примерно постоянный расход природного газа в зоне бедных смесей, начиная со стехиометрического состава. А для СПГ с добавкой водорода 0,03 кг/ч наблюдается некоторое снижение расхода СПГ при обеднении смеси, что характеризуется большей стабильностью процесса сгорания, меньшим количеством пропусков зажигания или циклов с неполным сгоранием. Количество подведенной энергии с топливом определяли как произведение низшей теплотворной способности топлива (природного газа 48,2 МДж/кг, водорода 120 МДж/кг) на часовой расход. Рассматривая график изменения расхода воздуха, видно, что с обогащением смеси более 0,85 по коэффициенту избытка воздуха, наблюдается увеличение расходных характеристик, что связано с ухудшением условий протекания процесса сгорания и увеличением количества циклов с пропуском зажигания и неполным сгоранием топлива. При снятии регулировочной характеристики по составу смеси на режиме холостого хода изменялись характеристики дросселирования и оптимальный по расходу СПГ угол опережения зажигания, которые приведены на рис. 5. Оценивая изменение разряжения за дроссельной заслонкой при изменении состава смеси, можно отметить, что при работе на СПГ наблюдается меньшее разряжение, что связано с большим открытием дроссельной заслонки. Оптимальный по расходу природного газа угол опережения зажигания ( $\Theta$ ) в зоне бедных смесей уменьшается при увеличении количества водорода в топливе, а в зоне богатых смесей влияние водорода на изменение оптимального угла опережения зажигания заметно уменьшается.



**Рис. 4.** Зависимость часового расхода воздуха и природного газа от коэффициента избытка воздуха при различной подаче водорода для двигателя ВАЗ-2111 на режиме холостого хода



**Рис. 5.** Изменение оптимального УОЗ и разряжения за дроссельной заслонкой на режиме холостого хода двигателя ВАЗ-2111 от коэффициента избытка воздуха при работе на СПГ и на СПГ с добавками водорода

В результате проведенного термодинамического анализа индикаторных диаграмм [13–17], получены характеристики количества активно выделившегося тепла в процессе сгорания. Где  $Q_{акт}$  – это сумма изменения работы и внутренней энергии от начала процесса сгорания до его окончания. Она характеризует количество активно выделившейся энергии от момента воспламенения в течение всего процесса сгорания.

Масса рабочего тела в цилиндре двигателя определялась из уравнения состояния, с учетом следующих допущений, а именно: было принято, что в процессе сжатия текущий показатель политропы сжатия изменяется в значительном интервале, где имеется точка равенства с показателем адиабаты. Считаем, что в ней температура рабочего тела равна температуре стенки, а остальные параметры уравнения состояния нам известны [18].

Количество остаточных газов определялось как разница между массой рабочего тела и массой свежей смеси. 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 СПГ с добавкой 0,02 кг/ч 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.

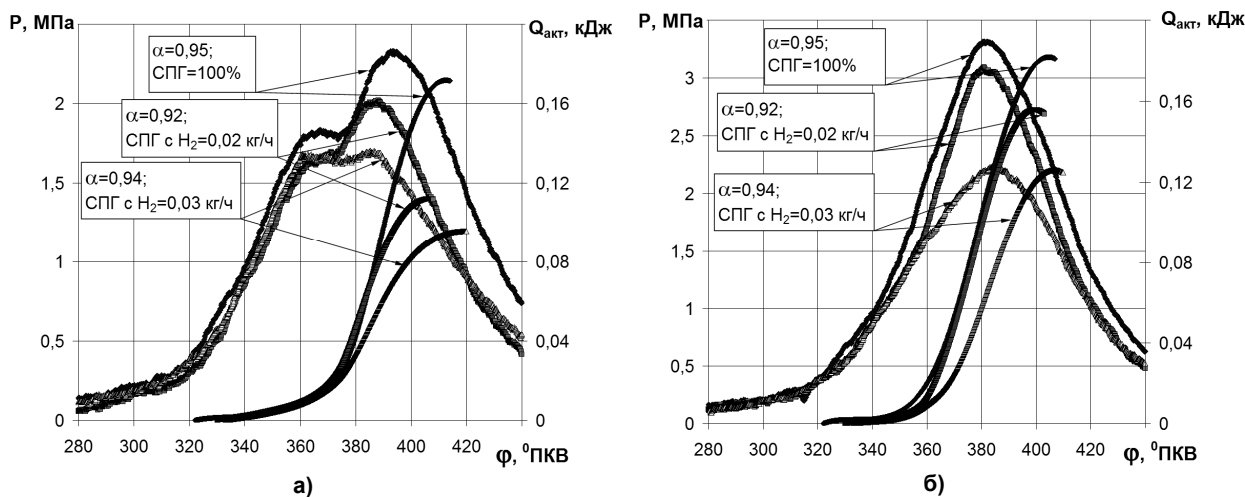


Рис. 6. Индикаторное давление и количество активно выделившейся энергии в рассматриваемых циклах при коэффициенте избытка воздуха, близким к  $\alpha = 0,95$ : а – в первом цикле, б – в третьем цикле

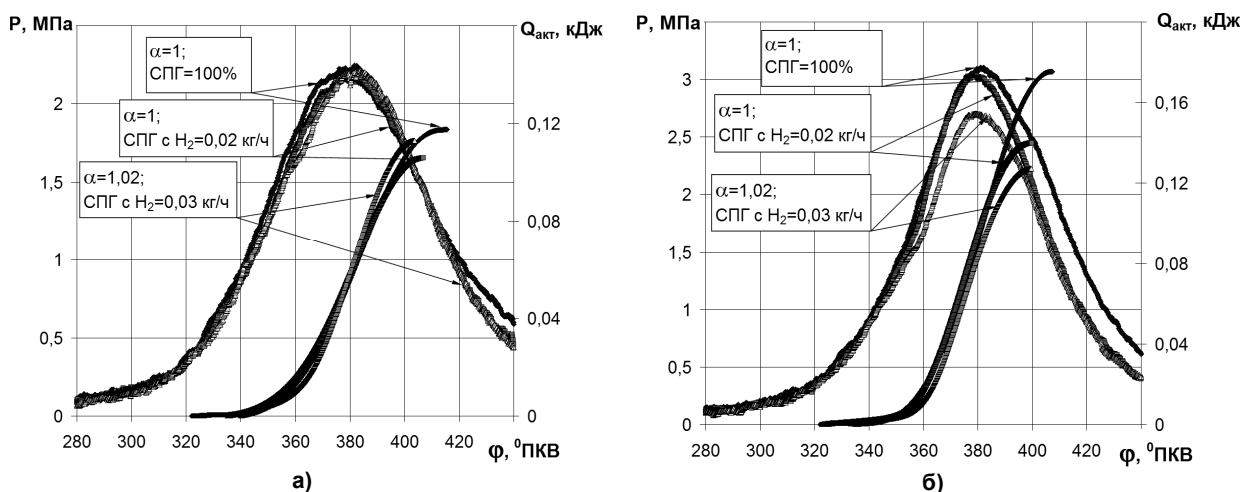


Рис. 7. Индикаторное давление и количество активно выделившейся энергии в рассматриваемых циклах при коэффициенте избытка воздуха, близким к  $\alpha = 1$ : а – в первом цикле, б – в третьем цикле

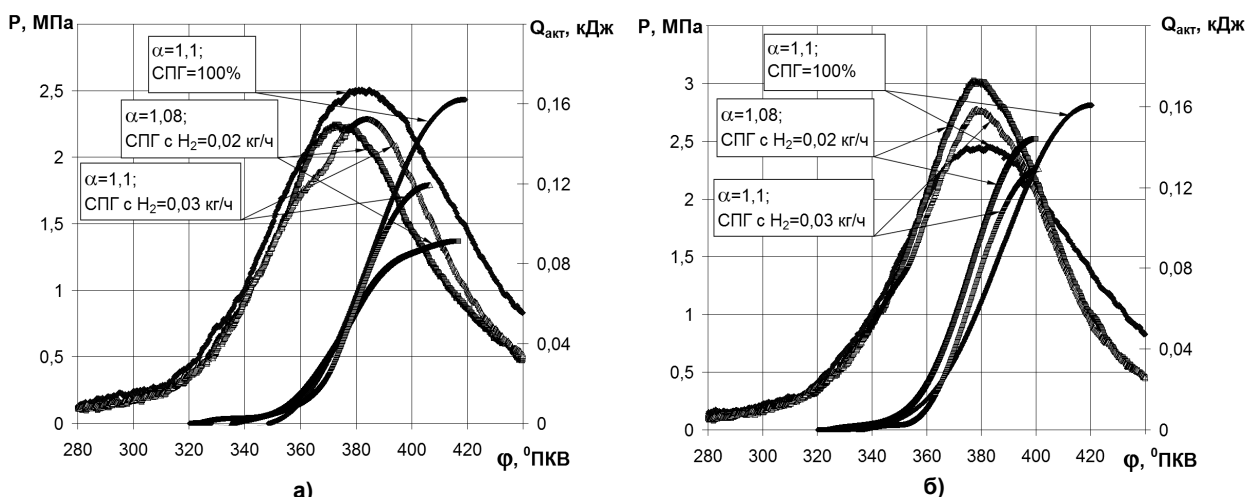


Рис. 8. Индикаторное давление и количество активно выделившейся энергии в рассматриваемых циклах при коэффициенте избытка воздуха, близким к  $\alpha = 1,1$ : а – в первом цикле, б – в третьем цикле

На рис. 6–8 представлена оценка изменения индикаторного давления и количества активно выделившейся энергии у первого и третьего рассматриваемых циклов для коэффициентов избытка воздуха 0,95, 1 и 1,1 соответственно. Первый цикл характеризуется, как правило, предшест-

## Расчет и конструирование

вующим циклом с полным сгоранием, а третий цикл – это цикл после пропуска зажигания для СПГ и для СПГ с 0,02 кг/ч водорода или неполного сгорания для СПГ с 0,03 кг/ч водорода.

Как уже отмечалось, при значительном дросселировании на холостом ходу в цилиндре двигателя находится большое количество остаточных газов, составляющих от 70 до 140 % от массы свежей смеси, в зависимости от положения дроссельной заслонки и разрежения во впускном коллекторе [18–20]. При этом состав остаточных газов зависит от полноты протекания процесса сгорания в предшествующем цикле, так остаточные газы становятся насыщенными свежей горючей смесью при пропуске зажигания, а при неполном сгорании топлива остаточные газы насыщены активными компонентами продуктов неполного сгорания и свежей несгоревшей смесью, что повышает энергоемкость горючей смеси в следующем цикле, в котором происходит полный цикл сгорания. Рассматривая характеристику активного тепловыделения, мы можем отметить, что для циклов с практически инертными остаточными газами, после полного сгорания, имеющими нормальное сгорание, характерно максимальное количество активно выделившейся теплоты от 0,10 до 0,12 кДж. Циклы с количеством активно выделившейся энергии менее 0,10 кДж имеют признаки неполного сгорания и отношение активно выделившейся энергии к энергии, введенной с топливом в цилиндр, с учетом потерянной теплоты, из-за недостатка кислорода, составляет от 0,4 до 0,55 кДж. В циклах с максимальным количеством активно выделившейся теплоты от 0,10 до 0,12 кДж этот показатель уже находится в диапазоне от 0,6 до 0,8 кДж. В то же время циклы, имеющие активные остаточные газы, насыщенные горючим после пропуска зажигания, имеют значения максимального количества активно выделившейся теплоты от 0,145 до 0,21 кДж, что составляет от 0,74 до 0,97 кДж в отношении активно выделившейся энергии к энергии введенной с топливом в цилиндр. Причем большие величины характерны при работе на СПГ, так для богатых смесей с коэффициентом избытка воздуха около 0,7 при работе на СПГ это значение достигает 0,95–1,1 кДж. Также при работе на СПГ с добавкой 0,03 кг/ч водорода, где отсутствуют полные пропуски зажигания, значения максимального количества активно выделившейся теплоты для третьих циклов после неполного сгорания находится в диапазоне 0,125 до 0,145 кДж, тем самым показывая, что вклад продуктов неполного сгорания, внесенный с остаточными газами, не превышает 15–20 %, в то время, как при работе на СПГ с добавкой 0,02 кг/ч водорода этот вклад составляет уже 30–20 %. Это говорит о том, что при работе на СПГ имеется четкое деление на циклы с полным сгоранием, а за ними всегда следует цикл с практически полным пропуском зажигания. В то же время как при работе на СПГ с добавкой водорода, даже в циклах с видимым пропуском зажигания, имеется большая степень окисленности горючего в остаточных газах последующего цикла.

Поэтому приведем сравнение максимальных значений количества активно выделившейся теплоты в зависимости от коэффициента избытка воздуха и количества добавляемого водорода в СПГ (рис. 9).

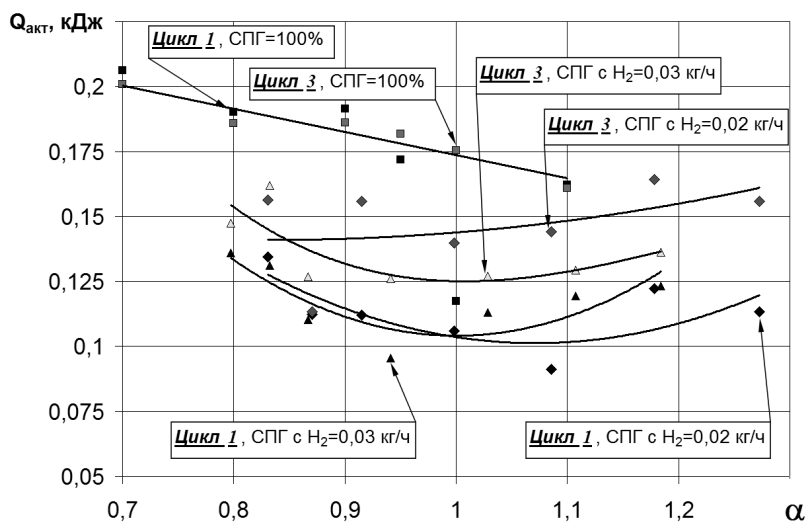


Рис. 9. Сравнение максимальных значений количества активно выделившейся теплоты в зависимости от коэффициента избытка воздуха и количества добавляемого водорода в СПГ

Анализируя полученные результаты и данные, приведенные на рис. 9, можно выделить четыре зоны, характеризующиеся по качественному составу отработавших газов и эффективностью протекания процесса сгорания. Первая зона – циклы с количеством активно выделившейся энергии менее 0,10 кДж, это циклы после полного сгорания, но за счет добавки водорода в них сформировалась зона горения, которая обеспечивает долю активно выделившейся энергии в размере 0,45 – 0,55 кДж от энергии введенной с топливом, а с учетом тепловых потерь в стенку это 75–85 % полноты окисления топлива. После них следует цикл также с неполным сгоранием до тех пор, пока не произойдет срыв с пропуском зажигания. Вторая зона – циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,10 до 0,12 кДж, это циклы в которых сформировался нормальный фронт пламени, обеспечивающий полное сгорание. Третья зона – это циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,125 до 0,165 кДж, в них обязательно предшествующий цикл имел пропуск зажигания или неполное сгорание, они характерны при работе на СПГ с добавками водорода. Четвертая зона – это циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,16 до 0,21 кДж, что характерно для циклов после полного пропуска зажигания при работе на СПГ. Также следует отметить, что чем стабильнее протекает процесс сгорания с меньшим количеством пропусков зажигания или циклов с неполным сгоранием, то для обеспечения устойчивой работы на режиме холостого хода требуется меньшее количество энергии, подводимой с топливом, тем самым обеспечивается снижение расхода топлива и работу с цикловой активно выделившейся энергией в размере 0,1–0,125 кДж. Также замечено, что количество энергии, требуемое для работы на холостом ходу, примерно постоянно и определяется только стабильностью процесса сгорания. Увеличение расхода топлива на богатых смесях связано с наличием потерь теплоты из-за недостатка кислорода, а общее количество выделившейся энергии принципиально не меняется.

#### **Выводы**

1. Предложено оценивать изменение внутренней энергии при анализе диаграммы давления действительного цикла ДВС не по изменению температуры, которая сама является расчетной величиной со значительной погрешностью, а по параметрам, имеющим большую достоверность, а именно по объему и давлению, с учетом изменения теплоемкости и сжимаемости рабочего тела.
2. Показана целесообразность и эффективность применения предложенного подхода для оценки термодинамических процессов в двигателях с искровым зажиганием на газовом топливе при подаче топлива во впускной трубопровод.
3. Добавка водорода в СПГ в размере 0,02 и 0,03 кг/ч повышает стабильность процесса сгорания, что сказывается на снижении расхода топлива и на количестве подведенной энергии с топливом для обеспечения стабильной работы двигателя на режиме холостого хода. При этом отмечено, что добавка 0,03 кг/ч полностью устраняет циклы с пропуском зажигания, возможно лишь наличие циклов с частичным сгоранием.
4. Характеристика активного тепловыделения в большей степени зависит от состава и степени окисленности остаточных газов, так как количество используемой энергии, для обеспечения стабильной работы на режиме холостого хода, примерно постоянно и зависит в большей степени от межцикловой неравномерности работы двигателя.

#### **Обсуждение и применение**

Основными проблемами, имеющими место при анализе циклов на режиме холостого хода ДВС, конвертированного на природный газ, являются высокая неравномерность протекающих циклов и высокая неравномерность количества рабочего тела в цилиндре двигателя на одном режиме работы, в связи с межцикловой неоднородностью состава и количества остаточных газов. Полученные результаты имели бы большую наглядность при обработке не 3 последовательных циклов, а всех сорока, которые фиксировались при эксперименте. Работа двигателя на природном газе более эффективна при использовании больших значений степени сжатия, а при использовании его в бензиновых двигателях, конвертированных для работы на природном газе, его эффективность заметно снижается. Поэтому перспективно провести подробный анализ тепловыделения при работе двигателя со степенью сжатия 15–17 кДж, где будут лучшие условия для воспламенения и сгорания природного газа, а следовательно влияние водорода может быть менее заметно.

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



### Литература

1. The composition of combustion products formed from gasoline-hydrogen-air mixtures in a constant-volume spherical chamber / L.N. Bortnikov, D.A. Pavlov, M.M. Rusakov, A.P. Shaikin // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. – 2011. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 75–83. DOI: 10.1134/S1990793111010039
2. Influence of fuel hydrogen additives on the characteristics of a gas-piston engine under changes of an ignition advance angle / Y.F. Gortyshov, V.M. Gureev, R.S. Misbakhov, I.F. Gumerov, A.P. Shaikin // *Russian Aeronautics*. – 2009. – Vol. 52. – Iss. 4. – P. 488–490. DOI: 10.3103/S1068799809040199
3. Кавтарадзе, П.З. Теория поршневых двигателей. Спец. главы: учебник для вузов / П.З. Кавтарадзе. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
4. Fu, J.Q. Energy and exergy analysis on gasoline engine based on mapping characteristics experiment / Fu J.Q. et al. // *Appl Energy*. – 2013. – Vol. 102. – P. 622–30. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.013>.
5. Coney, M.W. A thermodynamic analysis of a novel high efficiency reciprocating internal combustion engine – the isoengine / M.W. Coney, C. Linnemann, H.S. Abdallah // *Energy*. – 2004. – Vol. 29. – Iss. 12–15. – P. 2585–600. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.05.014>.
6. Smolenskaya, N.M. Research of polytropic exponent changing for influence evaluation of actual mixture composition on hydrocarbons concentration decreasing on deep throttling operation / N.M. Smolenskaya, V.V. Smolenskii, I. Bobrovskij // *IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 50. – 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012016
7. Вибе, И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя / И.И. Вибе. – Свердловск: Машиз, 1962. – 271 с.
8. Heywood, J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill / J.B. Heywood. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 931 p.
9. Smolenskaya, N.M. Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel / N.M. Smolenskaya, N.V. Korneev // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 66. – 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012016
10. Кутенёв, В.Ф. Улучшение эффективности работы двигателя с искровым зажиганием в период холодного пуска и прогрева путем использования химически активных веществ / В.Ф. Кутенёв, В.М. Фомин, В.Ф. Каменев // *Труды НАМИ*. – 2013. – № 252. – С. 42–61.
11. Корнеев, Н.В. Модель средней скорости распространения фронта пламени природного газа с добавками водорода для одноцилиндровой установки УИТ-85 имитирующей режимы холостого хода / Н.В. Корнеев, Н.М. Смоленская // *Естественные и технические науки*. – 2014. – № 9–10. – С. 167–171.
12. Применение водорода для повышения полноты сгорания ТВС на режимах пуска и прогрева / Л.Н. Бортников, Д.А. Павлов, М.М. Русаков, В.В. Смоленский // *Естественные и технические науки*. – 2013. – № 1. – С. 346–350.
13. 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 / A. Nemati, V. Fathi, R. Barzegar, S. Khalilarya // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – Vol. 38. – Iss. 2. – P. 1189–1199. – <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.083>.
14. Sipeng, Zhu. Thermodynamic analysis of an in-cylinder waste heat recovery system for internal combustion engines / Sipeng Zhu, Kangyao Deng, Shuan Qu // *Energy*. – 2014. – Vol. 67. – Iss. 1. – P. 548–556. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.006>.
15. Chintala, V. Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis / V. Chintala, K.A. Subramanian // *Energy*. – 2014. – Vol. 67. – P. 162–175. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.094>.
16. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes / Li Y., Jia M., Chang Y. et al. // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 180. – P. 849–858. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.038>
17. Thermodynamic and energy saving benefits of hydraulic free-piston engines / Z. Zhao, S. Wang, S. Zhang, F. Zhang // *Energy*. – 2016. – Vol. 102. – P. 650–659. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.018>.

18. Смоленский, В.В. Исследование влияния водорода на неравномерность протекания процесса сгорания СПГ в ДВС на режимах холостого хода / В.В. Смоленский, Н.М. Смоленская, Д.А. Павлов // Вектор науки ТГУ. – 2016. – № 4 (38). – С. 52–59.

19. Исследования энергетических и экологических показателей работы автомобильного двигателя на бензоводородных топливных композициях/ В.Ф. Каменев, В.М. Фомин, Н.А. Хрипач, Л.Ю. Лежнев // Междунар. науч. журн. Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 9. – С. 16–23.

20. Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термохимическим генерированием водородного топлива / Н.А. Хрипач, В.Ф. Каменев, В.М. Фомин, С.В. Алешин // Междунар. науч. журн. Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 4. – С. 45–50.

**Смоленская Наталья Михайловна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая и теоретическая физика», Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, nata\_smolenskaya@mail.ru.

*Поступила в редакцию 22 ноября 2017 г.*

DOI: 10.14529/engin170403

## DEPENDENCE OF CHARACTERISTICS OF HEAT EXCHANGE FROM MIXTURE OF MIXTURE ON DRY WALK IN ENGINE WORKING ON GAS FUEL

*N.M. Smolenskaya, nata\_smolenskaya@mail.ru*  
*Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation*

The idling mode for spark-ignition engines is characteristic, a significant uneven flow of the combustion process. Which is due to the fact that a fresh combustible mixture is strongly diluted with residual gases. The characteristics of flammability are largely determined by the preceding combustion cycle. The studies consisted of bench tests on the VAZ-2111 engine at idle and thermodynamic analysis of three successive indicator diagrams, obtained experimentally, reflecting the cycle before ignition was missed, a cycle with a pass and a cycle after ignition was missed. As a result of the thermodynamic analysis, the characteristics of the change in the work and the internal energy of the cycle for each interval of the indicator chart of one degree of rotation of the crankshaft are determined. On the basis of this, the characteristic of active heat release was obtained for all the investigated cycles. The presented results of the thermodynamic analysis of the combustion process make it possible to estimate with more accuracy the effect of the composition of gas fuel on the heat release characteristic, since the analysis of the change in internal energy was carried out according to the author's technique, allowing its evaluation without determining the temperature and the quantity of the working fluid, which, with strong throttling, are practically unknown parameters. The results obtained showed the effect of the composition of the gas fuel and ignition misfire on the active heat release, and the efficiency of improving the stability of combustion for the economy of the engine. In this connection, the work is devoted to the analysis of the heat dissipation characteristics in experimental studies of new alternative gas fuels consisting of natural gas and hydrogen, which will allow us to better understand and quickly move to the design stage of new engines with increased efficiency of the combustion process at idle. This is certainly an important task, as modern trends in reducing the toxicity of automotive ICEs make it necessary to switch to gas fuels.

*Keywords: compressed natural gas, hydrogen, combustion process, heat dissipation characteristic, internal combustion engine, dry walk.*

### References

1. 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, iss. 1, pp. 75–83. DOI: 10.1134/S1990793111010039
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, iss. 4, pp. 488–490. DOI: 10.3103/S1068799809040199
3. Kavtaradze, R.Z. *Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spets. glavy: uchebnik dlya vuzov* [Theory of Reciprocating Engines. Specialist. Chapters: Textbook for Universities]. Moscow: MSTU N.E. Bauman, 2008. 720 p.
4. Fu, J.Q. et al. Energy and exergy analysis on gasoline engine based on mapping characteristics experiment. *Appl Energy*, 2013, vol. 102, pp. 622–30. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.013>.
5. Coney M.W., Linnemann C., Abdallah H.S. A Thermodynamic Analysis of a Novel High Efficiency Reciprocating Internal Combustion Engine – the Isoengine. *Energy*, 2004, vol. 29, iss. 12–15, pp. 2585–600. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.05.014>.
6. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V., Bobrovskij I. Research of Polytropic Exponent Changing for Influence Evaluation of Actual Mixture Composition on Hydrocarbons Concentration Decreasing on Deep Throttling Operation. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 50, 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012016
7. Vibe I.I. *New on the Working Cycle of Engines. Combustion Rate and Engine Duty Cycle*. Sverdlovsk: Mashgiz, 1962. 271 p.
8. Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill. New York, McGraw-Hill, 1988. 931 p.
9. Smolenskaya N.M., Korneev N.V. Modelling of the Combustion Velocity in UIT-85 on Sustainable Alternative Gas Fuel. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 66, 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012016
10. Kutenyov V.F., Fomin V.M., Kamenev V.F. Improving the Efficiency of the Spark-Ignition Engine During Cold Start-Up and Warm-Up by the Use of Chemically Active Substances. *Proceedings of NAMI*, 2013, no. 252, pp. 42–61.
11. Korneev N.V., Smolenskaya N.M. The Model of the Average Speed of Propagation of the Front of a Natural Gas Flame with Hydrogen Additives for a Single-Cylinder UIT-85 Simulating Idling Mode. *Natural and Technical Sciences*, 2014, no. 9-10, pp. 167–171.
12. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Smolenskiy V.V. The Use of Hydrogen to Improve the Completeness of Combustion of Fuel Assemblies under the Conditions of Start-Up and Warm-Up. *Natural and Technical Sciences*, 2013, no. 1, pp. 346–350.
13. 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, iss. 2, pp. 1189–1199. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.083>.
14. Sipeng Zhu, Kangyao Deng, Shuan Qu. Thermodynamic Analysis of an in-Cylinder Waste Heat Recovery System for Internal Combustion Engines. *Energy*. 2014, vol. 67, iss.1, pp. 548–556. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.006>.
15. Chintala V., Subramanian K.A. Assessment of Maximum Available Work of a Hydrogen Fueled Compression Ignition Engine Using Exergy Analysis. *Energy*, 2014, vol. 67, pp. 162–175. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.094>.
16. 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.038>.
17. 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.018>.

18. Smolensky V.V., Smolenskaya N.M., Pavlov D.A. Investigation of the Influence of Hydrogen on the Non-Uniformity of the Course of the Combustion of LNG in Internal Combustion Engines on Idling Conditions. *Vector of Science TSU*, 2016, no. 4 (38), pp. 52–59.

19. Kamenev V.F., Fomin V.M., Khripach N.A., Yu L. Lezhnev Investigations of the Energy and Environmental Performance of an Automobile Engine on Gasoline-Hydrogen Fuel Compositions. *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology*, 2005, no. 9, pp. 16–23.

20. Khripach N.A., Kamenev V.F., Fomin V.M., Alyoshin S.V. Thermodynamic Analysis of the Engine Operating Cycle with Thermochemical Generation of Hydrogen Fuel. *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology*, 2006, no. 4, pp. 45–50.

*Received 22 November 2017*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Смоленская, Н.М. Зависимость характеристики тепловыделения от состава смеси на холостом ходу в двигателе, работающем на газовом топливе / Н.М. Смоленская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 26–37. DOI: 10.14529/engin170403

**FOR CITATION**

Smolenskaya N.M. Dependence of Characteristics of Heat Exchange from Mixture of mixture on Dry Walk in Engine Working on Gas Fuel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 26–37. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170403

---