

МААМРИ РАШИД, докторант, Университет Квебека в Труа-Ривьер, Канада
Ф.И. АБРАМЧУК, докт. техн. наук, проф., зав.каф. ХНАДУ, Харьков
А.Н. КАБАНОВ, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков
ДУБЕ ИВ, Ph. D., проф., Университет Квебека в Труа-Ривьер, Канада
ТЮБАЛЬ ЛОТФИ, Ph. D., проф., Университет Квебека в Труа-Ривьер, Канада
КОДЖО АГБОССУ, Ph. D., проф., Университет Квебека в Труа-Ривьер, Канада

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО С ПОСТОЯННОЙ ДОБАВКОЙ ВОДОРОДА В ТОПЛИВЕ

Приведены результаты исследования газового двигателя, работающего с постоянной добавкой водорода в топливе.

Ключевые слова: газовый двигатель, водород.

Наведені результати дослідження газового двигуна, що працює з постійною добавкою водню в паливі.

Ключові слова: газовий двигун, водень.

Results of investigation of gas engine running with constant hydrogen addition in fuel have been given. Key words: gas engine, hydrogen.

1. Введение

Благодаря своим физико-химическим свойствам водород является самым экологически чистым топливом, и к тому же – возобновляемым источником энергии. Однако вопрос получения его в промышленных масштабах с целью массового внедрения его в автомобильный транспорт не решён до сих пор из-за высоких затрат энергии на выполнение этой операции [1]. Все автомобили, представленные зарубежными производителями, представлены максимум единичными опытными и выставочными образцами [1].

Компромиссным решением является использование водорода в виде постоянной добавки к различным более распространённым топливам. Это позволит снизить количество водорода, необходимого в качестве топлива, и существенно повысит экологические свойства автомобиля.

2. Анализ публикаций по теме исследования

В мире ведутся активные работы по исследованию двигателей, работающих на смеси природного газа и водорода [2].

Концепция «бедного горения» (то есть горения смеси в цилиндре при высоких α) является одним из наиболее эффективных способов снижения выбросов NO_x двигателем с искровым зажиганием. При этом применение добавки водорода к газовому топливу позволяет устранить основные недостатки данной концепции – неполное сгорание рабочей смеси и пропуски вспышек [3]. Кроме того, конвертация двигателя, работающего на жидком нефтяном топливе,

на сжатый природный газ приводит к увеличению продолжительности сгорания, что, в свою очередь, приводит к увеличению выбросов несгоревших углеводородов СН с отработавшими газами. Добавка водорода к газовому топливу увеличивает скорость пламени, сокращая продолжительность сгорания и снижая таким образом выбросы СН [4, 5].

Исследования, проведенные в [6, 7] показывают, что небольшое увеличение концентрации водорода в газовом топливе способствует повышению мощности двигателя на несколько процентов в зависимости от режима. Это происходит за счёт увеличения скорости пламени и высокой низшей теплоты сгорания (H_u) этого топлива.

Кроме того, добавка водорода снижает энергию воспламенения, необходимую для надёжного воспламенения основного топлива. Так, добавка водорода к природному газу в количестве 10 % позволяет уменьшить энергию воспламенения в 5,7 раз, что позволяет отказаться от использования многоискровой высокоэнергетической системы зажигания при конвертации бензинового двигателя на природный газ [9].

Следует также отметить, что низкая плотность водорода при нормальных условиях сводит на нет эту прибавку мощности при содержании водорода в газовом топливе более 10 % по объёму [6, 7]. Кроме того, при $\alpha < 2$ добавка водорода снижает детонационную стойкость газового топлива [8].

3. Цель исследования

Проведенный анализ литературных источников показал целесообразность использования смеси природного газа и водорода (смесевое топливо) в качестве моторного топлива. Поэтому целью исследования является выбор оптимальных параметров работы малолитражного двигателя 4Ч7,5/7,35, работающего на смесевом топливе (смеси природного газа и водорода).

4. Выбор величины добавки водорода в смесевом топливе

Использование переменной добавки водорода в зависимости от режима работы двигателя иногда связано с рядом сложностей в эксплуатации транспортного средства. Это необходимость устанавливать, использовать и обслуживать две системы хранения и подачи топлива. Использование двух баллонов существенно увеличивает удельную массу баллона на 1 м³ топлива по сравнению с использованием одного баллона. Кроме того, водород в чистом виде подвержен утечкам и взрывоопасен.

Исходя из вышеприведенных соображений, иногда целесообразно использование заранее приготовленного смесевое топлива. Содержание водорода в смесевом топливе рекомендуется в размере 10 % по объёму, по следующим соображениям.

1. Увеличение добавки водорода свыше 10 % уже не вызывает сильного снижения энергии воспламенения при $\alpha < 1,3$ [9].

2. Добавка водорода $\psi = 0,12$ вызывает снижение мощности двигателя на номинальном режиме на 7,5 %, в то время как добавка водорода $\psi = 0,1$ снижает мощность на этом режиме на 4 %.

5. Основные положения расчётной модели

С целью экономии материальных ресурсов был выбран расчётно-экспериментальный подход к исследованию. В качестве расчётной модели использовалась модель Вибе.

Исследования показали, что при увеличении добавки водорода до 10 % по объёму продолжительность сгорания уменьшается практически линейно. Зависимость продолжительности сгорания от доли водорода в смесевом топливе ψ на установившемся режиме приведена на рис. 1.

Для проверки модели Вибе с полученными уравнениями были проведены экспериментальные испытания в 7 точках. Сравнение экспериментальных значений p_i с рассчитанными по предлагаемой методике показало погрешность расчёта не более 10 %.

Так как образование токсичных веществ идёт в основном в пламени и продуктах сгорания, а возникновение детонации в двигателе напрямую зависит от температуры несгоревшей смеси в процессе сгорания, модель Вибе была дополнена двухзонной моделью расчёта процесса сгорания, описанной в [15].

Для моделирования содержания токсичных веществ в цилиндре двигателя на основании температур сгоревшей смеси, полученных в результате расчета с применением двухзонной модели, использовалась методика расчёта равновесного состава продуктов сгорания с уточнением содержания NO_x по кинетическому уравнению, предложенная Звоновым. Её описание приведено в [16].

6. Выбор степени сжатия

Качественным критерием выбора степени сжатия предложена работа двигателя на пределе детонации на режиме максимального крутящего момента при полностью открытой дроссельной заслонке.

Количественная оценка данного критерия выполнялась расчётным путём при помощи методики, описанной в [14]. В основе данной методики лежит расчёт критерия детонации в процессе сгорания

$$K_d = \frac{(h_{c'} - h)}{H_u} \cdot (1 - x) \cdot (\varepsilon - 1), \quad (1)$$

где $h_{c'}$ – удельная энтальпия несгоревшей смеси в момент начала сгорания, кДж/кг; h – удельная энтальпия несгоревшей смеси в любой момент времени, кДж/кг; H_u – низшая теплота сгорания, кДж/кг, x – доля выгоревшего топлива; ε – степень сжатия.

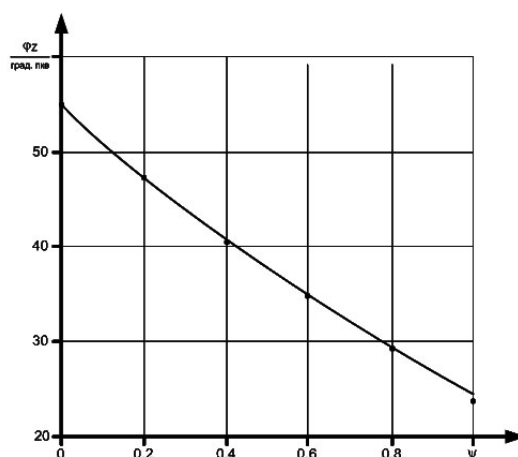


Рис. 1. Зависимость продолжительности сгорания от доли водорода в смесевом топливе (параметры режима: $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; $\varepsilon = 12$; $\alpha = 1$; $\eta_v = 0,7$; $\theta = 22$ град. пкв до ВМТ)

Пограничная детонация присутствует на режиме в том случае, если максимальное значение критерия детонации в процессе сгорания составляет $K_{dmax} = 1,5$. Превышение этого значения означает наличие детонации на режиме, причём её интенсивность прямо пропорциональна значению K_{dmax} .

Для экспериментальной проверки расчётных значений K_{dmax} степень сжатия на стенде изменялась при помощи трёх комплектов поршней, обеспечивающих значения степени сжатия $\varepsilon = 9,8$; $\varepsilon = 12$ и $\varepsilon = 14$. Экспериментальное значение K_{dmax} определялось при помощи метода обработки индикаторных диаграмм, описанного [12].

Сравнение расчётных данных с экспериментальными показало погрешность расчёта значения K_{dmax} не более 10 %.

Расчёты показали, что для $\psi = 0,1$ (при $\alpha = 1$) предельной степенью сжатия является $\varepsilon = 12$, что было подтверждено экспериментально. Как следствие, выбор оптимальных параметров работы двигателя проводился для степени сжатия $\varepsilon = 12$.

7. Решение задачи оптимизации

Для решения задачи оптимизации использовался метод исследования пространства параметров с использованием сеток Соболя, подробно описанный в [13].

Решение задачи оптимизации при выборе параметров рабочего процесса предполагает компромисс между мощностью, экономичностью и токсичностью двигателя. Поэтому в качестве критериев качества использовались следующие величины: удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч); эффективная мощность N_e , кВт; удельные выбросы оксидов азота g_{NOx} , г/(кВт·ч).

8. Выбор диапазона варьирования факторов при решении задачи оптимизации

Итоговые диапазоны варьирования вышеперечисленных факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Диапазон варьирования параметров двигателя при решении задачи оптимизации

α	\square	n	$\Phi_{др}$
–	град. пкв до ВМТ	хв ⁻¹	%
1	5	800	0
2	50	5600	100

Работа двигателя при $\alpha < 1$ нецелесообразна на любом режиме из-за ухудшения показателей мощности, экономичности и токсичности. Работа двигателя при $\alpha > 2$ не рекомендуется из-за нестабильной работы двигателя на смесевом топливе с $\psi = 0,1$. Выбор диапазона изменения угла опережения зажигания θ осуществлялся по результатам предварительных исследований. Диапазон изменения частоты вращения n , мин⁻¹, является диапазоном изменения частоты вращения базового двигателя. Угол открытия дроссельной заслонки $\Phi_{др}$ обозначен в % от полного открытия.

9. Экспериментальный стенд

Для экспериментальной проверки математической модели, а также для оценки технико-экономических и экологических показателей двигателя 4ГЧ7,5/7,35, работающего на смеси сжатого природного газа и водорода, использовался экспериментальный стенд, описанный в [10]. Стенд был создан на базе двигателя 4ГЧ7,5/7,35. Для обеспечения возможности работы стенда на смеси природного газа и водорода он был дополнен системой подачи водорода, описанной в [11]. Данная система обеспечивает независимую подачу трёх видов топлива (бензина, природного газа, водорода) в любых пропорциях, причём для подачи бензина использовалась штатная топливная система двигателя МеМЗ-307. Общий вид системы подачи природного газа и водорода, установленной на испытательном стенде, приведен на рис. 2.

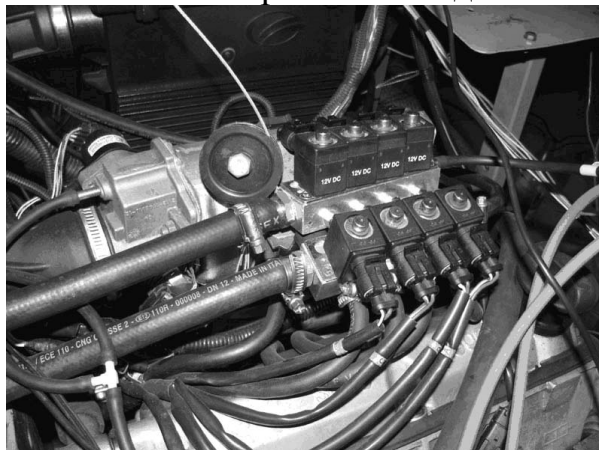


Рис. 2. Система подачи топлива на экспериментальном стенде

Степень сжатия на стенде могла изменяться при помощи трёх комплектов поршней, обеспечивающих следующие значения ε : $\varepsilon = 9,8$; $\varepsilon = 12$ и $\varepsilon = 14$.

10. Характеристические карты

На основании проведенных исследований получены характеристические карты для систем управления двигателем, приведенные на рис. 3 и 4.

При разработке характеристических карт учитывалось, что двигатель работает на смесевом топливе предложенного состава (10 % водорода и 90 % природного газа по объёму).

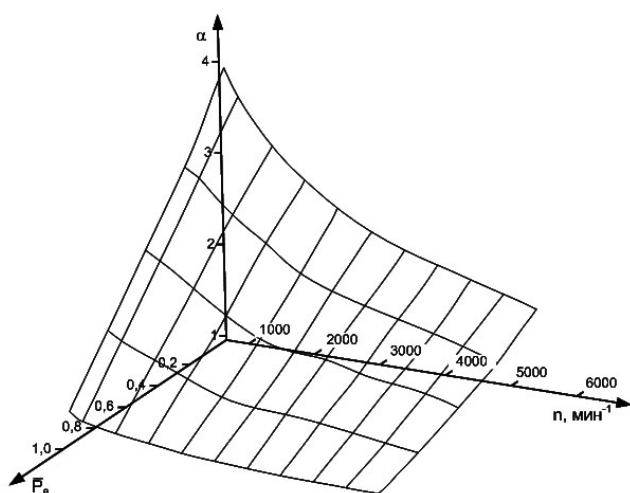


Рис. 3. Характеристическая карта управления коэффициентом избытка воздуха

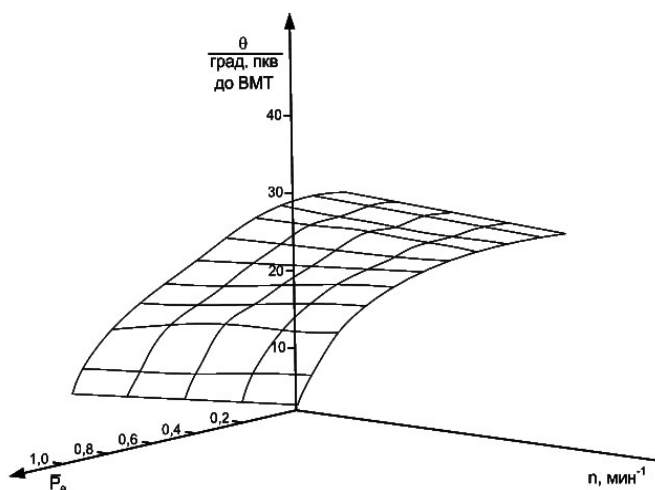


Рис. 4. Характеристическая карта управления углом опережения зажигания

11. Основные технико-экономические показатели двигателя

Внешняя скоростная характеристика двигателя (ВСХД) и изменение содержания нормируемых токсичных компонентов по ВСХД приведены соответственно на рис. 5 и 6.

Как видно из рис. 5, при переводе двигателя на смесевое топливо с $\psi = 0,1$ практически удалось избежать потерь мощности на номинальном режиме по

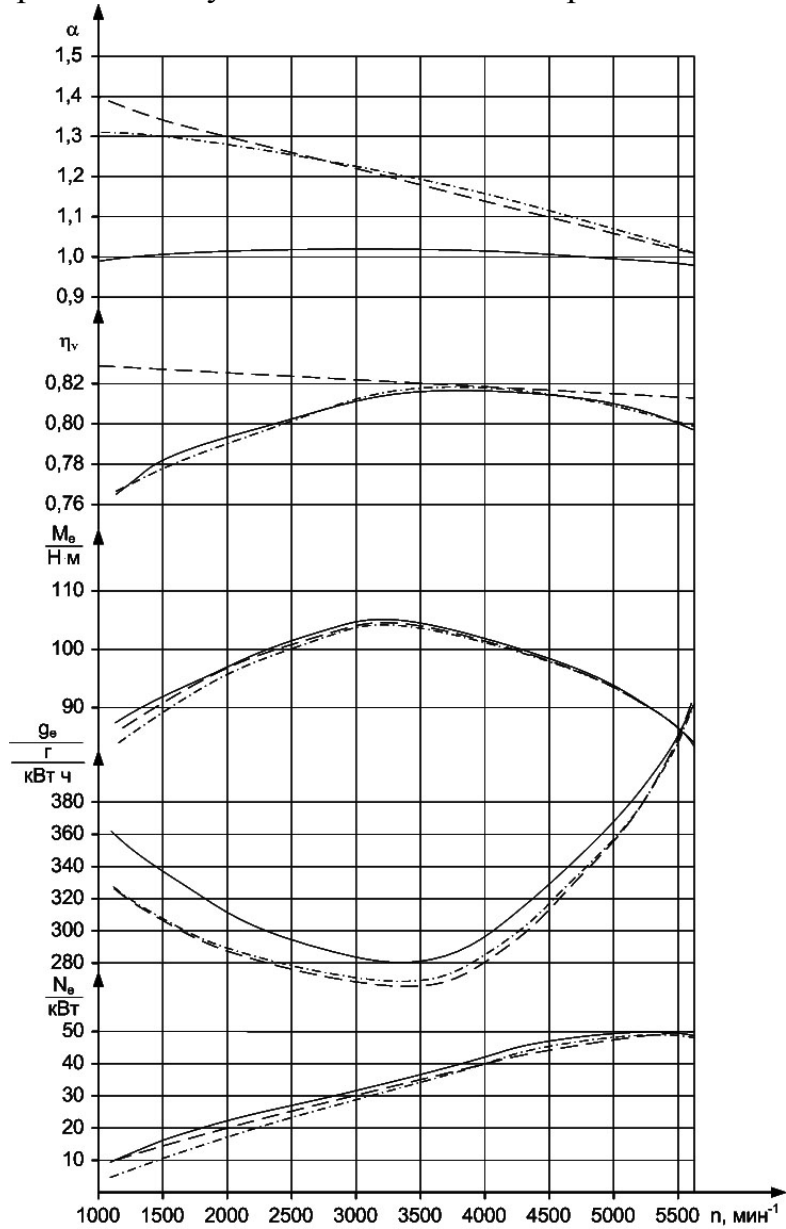


Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика двигателя 4ГЧ7,5/7,35:

— бензин; - - - - природный газ; - · - · - смесевое топливо

сравнению с работой при $\psi = 0$ ($N_e = 50$ кВт). На режиме максимального крутящего момента M_{emax} ($n = 3500$ мин⁻¹) снижение мощности при переходе с природного газа на смесевое топливо составляет 7 %. Удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме снижается на 5 %, на режиме M_{emax} – на 9 %.

Токсичность двигателя оценивалась при помощи 13-ступенчатого цикла ESC. Результаты экспериментального исследования двигателя 4ГЧ7,5/7,35, работающего на смесевом топливе, с использованием этого цикла приведены в таблице 2 (для двигателя 4ГЧ7,5/7,35, работающего на смесевом топливе, $n_{XX} = 800$ мин⁻¹, $n_A = 2575$ мин⁻¹, $n_B = 3650$ мин⁻¹, $n_C = 4725$ мин⁻¹).

Средние эксплуатационные выбросы токсичных компонентов, г/(кВт·ч), определяются как сумма произведений выбросов токсичных компонентов на

тринадцати режимах цикла на коэффициенты значимости этих режимов

$$\bar{g} = \sum_{i=1}^{13} (g_i \cdot \delta_{zi}), \quad (2)$$

где \bar{g} – выбросы компонента на режиме; δ_z – коэффициент значимости режима.

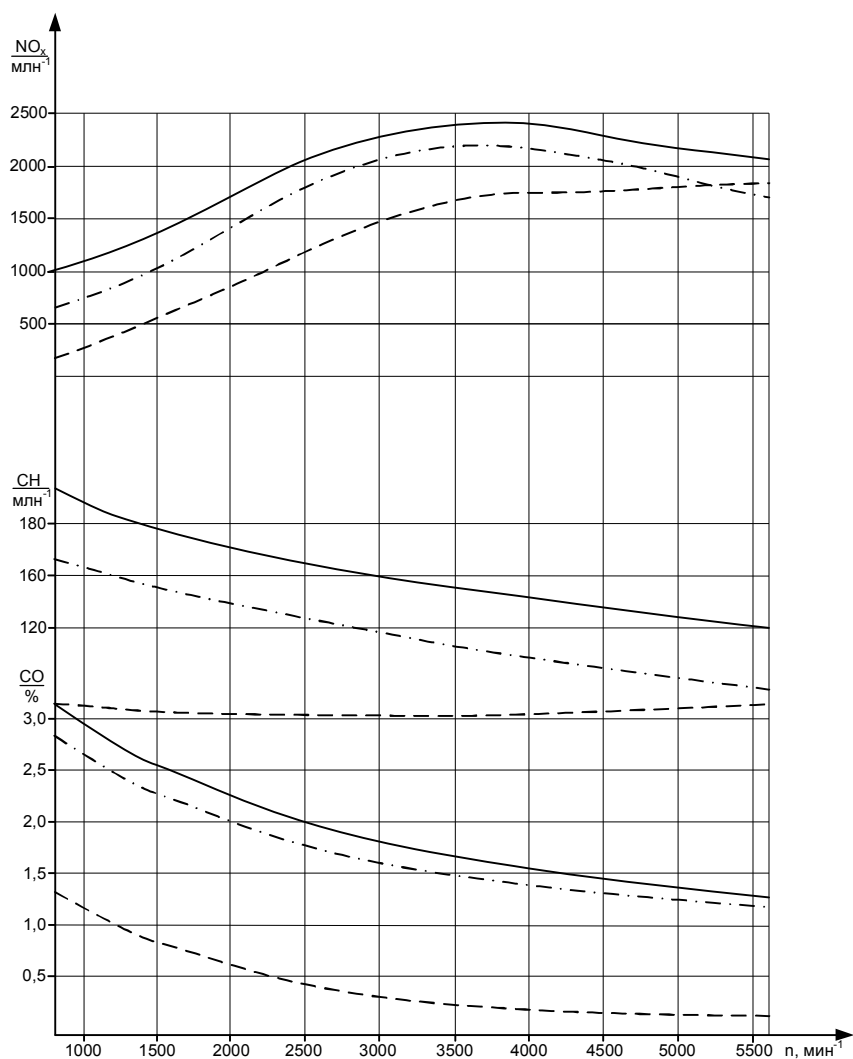


Рис. 6. Внешняя скоростная характеристика двигателя 4ГЧ7,5/7,35: — бензин; - - - природный газ; - · - · - смесевое топливо.

Таблица 2. Результаты испытаний двигателя по циклу ESC

№	δ_3	$\bar{M}_{кр}$	n	g_{NOx}	g_{CO}	g_{CH}
—	—	%	мин ⁻¹	г/(кВт·ч)	г/(кВт·ч)	г/(кВт·ч)
1	0,15	0	n_{XX}	—	—	—
2	0,08	100	n_A	8,1	1,11	0,44
3	0,1	50	n_B	4,6	1,32	0,32
4	0,1	75	n_B	5,6	1,16	0,38
5	0,05	50	n_A	4,1	1,34	0,4
6	0,05	75	n_A	5,0	1,21	0,43
7	0,05	25	n_A	2,9	1,44	0,51
8	0,09	100	n_B	8,6	1,05	0,35
9	0,1	25	n_B	3,5	1,29	0,38
10	0,08	100	n_C	9,1	1,0	0,4
11	0,05	25	n_C	4,2	1,18	0,24
12	0,05	75	n_C	6,8	1,11	0,11
13	0,05	50	n_C	5,5	1,24	0,18

В соответствии с таблицей 2 и зависимостью (2) средние эксплуатационные выбросы токсичных компонентов двигателя 4ГЧ7,5/7,35, г/(кВт·ч): $\bar{g}_{NO_x} = 4,95$; $\bar{g}_{CO} = 1,45$; $\bar{g}_{CH} = 0,48$.

Таким образом, снижение средних эксплуатационных выбросов двигателя 4ГЧ7,5/7,35 по сравнению с бензиновым двигателем-прототипом MeM3-307 составило: по NO_x – 61 %; по CO – 96 %; по CH – 78 %.

Выводы

1. Добавка водорода к природному газу позволяет устранить недостатки применения концепции «бедного горения», сохранив её достоинства.

2. На основе малолитражного газового двигателя 4ГЧ7,5/7,35 создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования на трёх видах топлива в любых пропорциях – бензине, водороде и природном газе.

3. Предложены характеристические карты для систем управления составом топливо-воздушной смеси и углом опережения зажигания блока управления двигателем при работе его на смесевом топливе с постоянной добавкой водорода в 10 %.

4. Сравнительные испытания двигателя на бензине (заводская программа управления) и смесевом топливе (с использованием полученных характеристических карт) показали, что на номинальном режиме мощность не изменяется, на режиме максимального крутящего момента мощность падает на 10 %. Удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме снижается на 5 %, на режиме M_{emax} – на 9 %.

5. Экспериментальное исследование с использованием 13-ступенчатого цикла ESC показало, что конвертация бензинового малолитражного двигателя MeM3-307 на смесевое топливо приводит к снижению выбросов: по NO_x – 61 %; по CO – 96 %; по CH – 78 %

Список литературы: 1. Кириллов Н.Г. Анализ перспективности различных видов альтернативных моторных топлив: сжиженный природный газ – моторное топливо XXI века [Текст] / Н.Г. Кириллов, А.Н. Лазарев // Двигателестроение. – 2010. – № 1. – С. 26-33. 2. Watson H. Hydrogen and methane — automotive fuels of the future? [Текст] / H. Watson, E. Milkins // SAE Journal (Australia). – 1975. – № 3. – P. 17-19. 3. Jacob K. Performance of Lean-Birn Natural Gas Fueled Engine on Specific Fuel Consumption, Power Capacity and Emissions [Текст] / K. Jacob – Calgary, CA: University of Calgary, 1990. – 18 p. – (Preprint / University of Calgary: SAE № 901495). 4. Karim G.A. Some Considerations of Cyclic Variations in Spark Ignition Engines Fueled with Gaseous Fuels [Текст] / G.A. Karim, Y.H. Al-Alusi – Calgary, CA: University of Calgary, 1984. – 12 p. – (Preprint / University of Calgary: SAE № 840232). 5. Michael R.S. The Effect of Hydrogen Addition on Natural Gas Engine Operation [Текст] / R.S. Michael, J.Y. Mirza, D. Zafer, N.S. Matthew – Calgary, CA: University of Calgary, 1993. – 16 p. – (Preprint / University of Calgary: SAE № 932775). 6. Karim G.A. Comparative Studies of Methane and Propane as Fuels for Spark Ignition and Compression Ignition Engines [Текст] / G.A. Karim, I. Wierzba // SAE Transactions. – 1984. – № 92. – pp. 3677-3688. 7. Soriano B. Turbulent Combustion [Текст]: master's thesis: 115.01.02 / B. Soriano. – Calgary, CA. – 1990. – 163 p. 8. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей [Текст] / А.И. Мищенко – Киев: Наук, думка, 1984. – 143 с. 9. Абрамчук Ф.И. Пути повышения надёжности воспламенения топливовоздушной смеси газовых двигателей от искры электрического разряда [Текст] / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Кабанов, А.П. Кузьменко, Э.Р. Муртазаев // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2010. – № 27. – С. 25-31. 10. Абрамчук Ф.И. Автоматизированный стенд для исследования и доводки газового малолитражного быстроходного двигателя внутреннего сгорания [Текст] /

Ф.И. Абрамчук, А.Н. Пойда, А.Н. Кабанов, А.А. Дзюбенко, А.П. Кузьменко, Г.В. Майстренко // Механика и машиностроение: сб. науч. тр. – Харьков: ХПИ. – 2010. – №1. – С. 66-73. 11. *Абрамчук Ф.И.* Способ подачи водорода для питания автомобильного двигателя [Текст] / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Кабанов, А.А. Дзюбенко, А.П. Кузьменко // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2010. – № 26. – С. 63-66. 12. *Кабанов А.Н.* Снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами транспортных дизелей путём конвертирования их в газовые двигатели [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.05.03 / Кабанов Александр Николаевич. – Х., 2007. – 206 с. 13. *Соболь И.М.* Выбор оптимальных критериев в задачах со многими параметрами [Текст] / И.М. Соболь, Р.Б. Статников. – М. : Наука, 2005. – 110 с. 14. *Attar A.A.* Optimization and Knock Modelling of a Gas Fueled Spark Ignition Engine [Текст]: PhD thesis: Mechanical Engineering / A.A. Attar. – Calgary, Canada, 1997. – 248 p. 15. *Абрамчук Ф.И.* Методика расчёта процесса сгорания газового двигателя с высокоэнергетической системой зажигания [Текст] / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Кабанов, В.Н. Муратов, А.П. Кузьменко, Г.В. Майстренко // Межвузовский сборник “Наукові нотатки”. – Луцк: Луцкий Национальный технический университет. – 2010. – № 28. – С. 4-8. 16. *Абрамчук Ф.И.* Методика расчёта процесса сгорания газового двигателя с высокоэнергетической системой зажигания [Текст] / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Кабанов // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 2. – С. 67 – 73.

Поступила в редколлегию 19.10.2011

УДК 536.24

А.П. СЛЕСАРЕНКО, докт. физ.-мат. наук, проф., вед. науч. сотр.,
Институт ИПМаш НАН Украины им.А.Н.Подгорного, Харьков
Н.А. САФОНОВ, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., Институт
ИПМаш НАН Украины им.А.Н.Подгорного, Харьков
А.А. ВЕРХУША, ассист., ХНАГХ, Харьков

УПРАВЛЯЕМАЯ МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ ТЕРМООБРАБОТКА В НЕРАЗРУШАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВОГО ПОЛОТНА

Предлагаются новые подходы к созданию неразрушающих технологий очистки поверхности рельсового полотна на базе управляемой многоступенчатой термообработки в зависимости от изменения климатических условий.

Ключевые слова: управляемая термообработка, плазменный факел, рельсовое полотно, очистка поверхности.

Пропонуються нові підходи до створення неруйнівних технологій очищення поверхні рейкового полотна на базі керованої багатоступінчастої термообробки залежно від зміни кліматичних умов.

Ключові слова: керована термообробка, плазмовий факел, рейкове полотно, очищення поверхні.

New approaches are offered to creation of not destroying technologies of cleaning of surface of rail linen on the base of the guided multi-stage heat treatment depending on the change of climatic terms.

Keywords: guided heat treatment, plasma torch, rail linen cleaning of surface.

Постановка проблемы

Мировой и отечественный опыт очистки поверхности рельсового полотна подтверждает экономическую и технологическую целесообразность использования плазменных технологий очистки. При этом плазменные