

*dvigatelej vnutrennego sgoraniya / A.P. Marchenko, A.A. Osetrov, S.S. Kravchenko, O. A. Hamza // Jenergotekhnologii i resursosberezheniya. – 2014. – № 5,6. – S.3 – 12. 9. Goto S., Nishi H., Nakayama S., Takahashi S. Developmen of Hight Density Gas Engine 22AG // IHI Engineering Review. — 2004. — Vol.37, №3. — P. 104-107. 10. Dviguni vnutrishn'ogo*

*zgorjannja: Serija pidruchnikov u 6 tomah. T.2. Dovidka konstrukcij forsovanih dviguniv nazem-nih transportnih mashin. / Za redakcieju prof. A.P. Marchenka, zasl. dijacha nauki Ukraїni prof. A.F. Sheho-vcova – Harkiv: Vidavn. centr NTU "HPI", 2004. – s. 365.*

Надійшла до редакції 12.06.2015

**Марченко Андрій Петрович** – докт. техн. наук, професор, зав. кафедри двигуни внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua.

**Осетров Александр Александрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигуни внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: osetrov2010@gmail.com.

**Кравченко Сергій Сергійович** – аспірант кафедри двигуни внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Skyler-tm@yandex.ru.

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СТАЦИОНАРНОГО ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ГАЗОВЫХ ТОПЛИВ

*А.П. Марченко, А.А. Осетров, С.С. Кравченко*

Отличие низшей теплоты сгорания низкокалорийных газовых топлив от природного газа приводит к изменению протекания рабочего процесса и требует увеличенных цикловых подач в цилиндр для получения эквивалентной теплоты сгорания. В работе проанализированы возможности конструктивного обеспечения номинальной мощности двигателя с форкамерно-факельным зажиганием и качественным регулированием мощности при использовании в качестве топлива различных низкокалорийных газов.

### SUPPORT NOMINAL POWER STATIONARY GAS ENGINES WHEN USING THE LOW CALORIE GAS FUELS

*A. Marchenko, A. Osetrov, S. Kravchenko*

The difference between the net calorific value of low-calorie gas fuels from natural gas leads to a change in the working process and requires an increase in cyclic supply into the cylinder for the equivalent calorific value. This paper analyzes the possibilities of constructive ensure rated engine power to the pre-combustion chamber jet ignition and power quality control for use in a variety of low-calorie fuel gas. It is shown that the cyclic provide the necessary gas supply to the cylinders of the engine can be achieved by increasing the flow passages of parts of gas equipment, an increase in pressure in the gas supply system and gas equipment duplicated. With the engine on biogas and coke oven gas rated power provided the replacement of the gas equipment the engine equipment with larger flow passages. When using synthesis gas and coal gas expedient together with the replacement gas equipment on the apparatus with increased flow passages to increase the pressure of the fuel gas in the fuel system. In the case of pyrolysis and generator gases and rational use double gas installations with larger flow passages.

УДК 621.438

**Б.Г. Тимошевский, М.Р. Ткач, А.С. Познанский, А.С. Митрофанов, А.Ю. Проскурин**

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ 2Ч 7,2/6 С ДОБАВКАМИ ДО 65% СИНТЕЗ-ГАЗА К БЕНЗИНУ

*Представлены результаты исследований работы двигателя 2Ч 7,2/6 с искровым зажиганием и внешним смесеобразованием при работе на бензине с добавками синтез-газа. Получены индикаторные диаграммы при работе по нагрузочной характеристике при добавках синтез-газа – 25–64%. Предложены зависимости для определения значений показателя сгорания  $\eta$  и продолжительности сгорания  $\varphi_z$  при коэффициенте избытка воздуха 1,1...1,22.*

#### Постановка проблемы

В современном двигателестроении, одной из важных проблем является разработка технологий эффективного использования альтернативных видов топлив, а также замещение традиционных топлив альтернативными с целью повышения эффективности энергетической установки.

#### Анализ исследований и публикаций

Одним из перспективных видов топлив для ДВС, полученных из возобновляемых источников

сырья, является синтез-газ [1-2]. Преимущественно основными компонентами синтез-газа являются водород ( $H_2$ ) и монооксид углерода ( $CO$ ), однако в зависимости от исходного сырья и способов получения, в состав также могут входить метан ( $CH_4$ ), этилен ( $C_2H_4$ ), этан ( $C_2H_6$ ) и др. компоненты. Благодаря наличию в составе синтез-газа водорода значительно улучшаются экологические показатели работы двигателя [3]. При применении термохимической утилизации тепла отходящих газов

двигателя для получения синтез-газа возможно значительно повысить экономичность и эффективность двигателя в целом [4]. Однако есть и существенный недостаток, который сдерживает широкое использование синтез-газа в качестве самостоятельного топлива в ДВС. Это пониженная удельная теплота сгорания синтез-газа по сравнению с тра-

диционными топливами (25–30 МДж/кг), что приводит к снижению мощности двигателя. Одним из возможных решений проблемы, связанной с потерей мощности, при работе ДВС на синтез-газе является использование синтез-газа в качестве добавки к основному топливу.

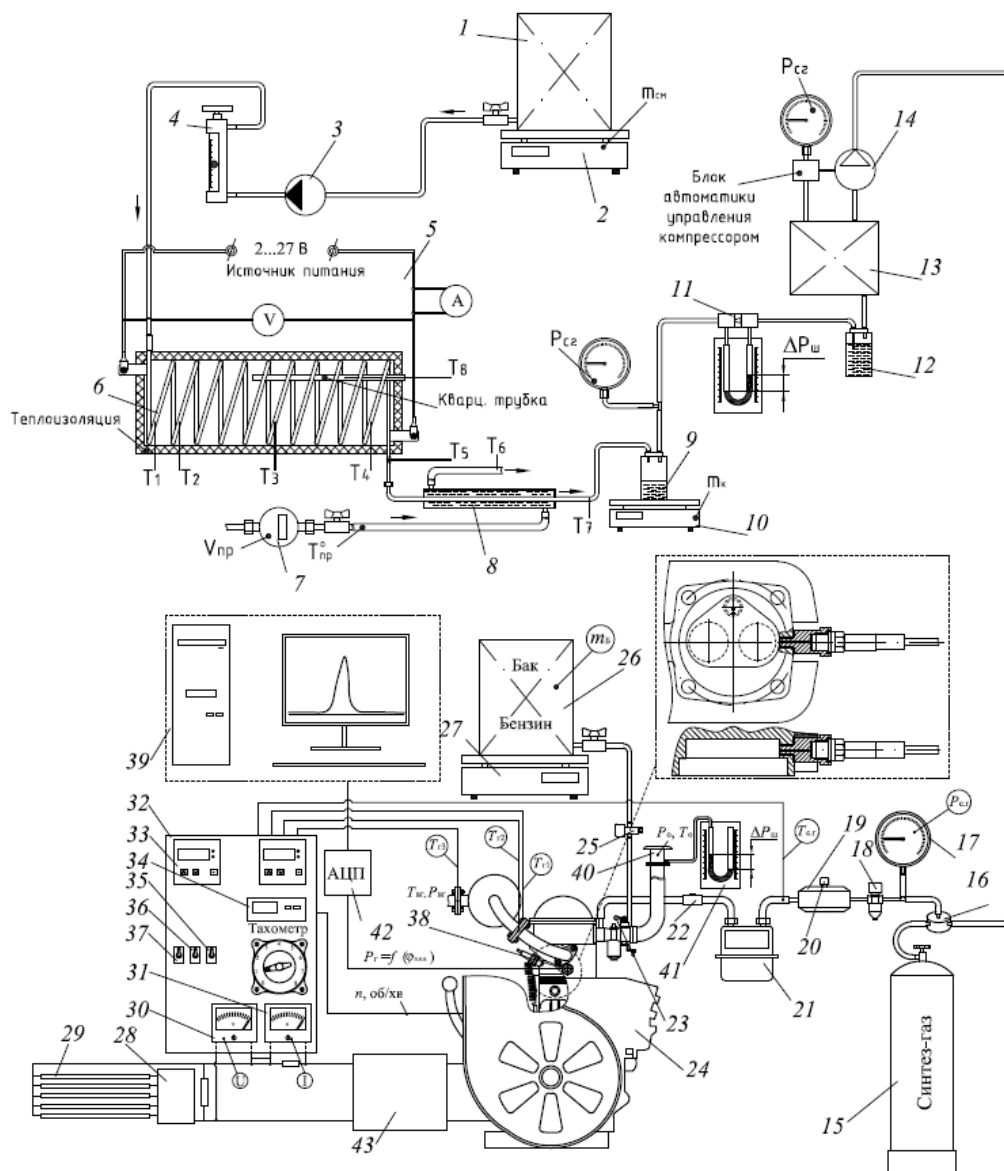


Рис. 1. Экспериментальная установка на базе двигателя с искровым зажиганием 2Ч 7,2/6:

1 - бак с этанолом, 2, 10, 27 – весы, 3 - насос подачи этанола в реактор, 4 – ротаметр, 5 – источник питания, 6 - термохимический реактор прямого пропускания тока, 7 - насос подачи охлаждающей воды, 8 - теплообменник типа «труба в трубе», 9 - реторта сбора конденсата, 11 - расходомерная шайба, 12 - водяной затвор, 13 - ресивер, 14 – компрессор, 15 - баллон с синтез-газом, 16 - общий ресивер, 17 - манометр, 18 - электромагнитный газовый клапан с фильтром, 19 - редуктор низкого давления, 20 – электромагнитный клапан; 21 – газовый счетчик, 22 - регулятор качества смесеобразования, 23 - дроссельная заслонка, 24 - двигатель с искровым зажиганием 2Ч 7,2 / 6; 25 - электромагнитный бензиновый клапан, 26 - бак с топливом, 28 - система управления нагрузкой, 29 - блок ТЭНов, 30 - вольтметр, 31 - амперметр, 32 - панель приборов, 33 - прибор 2TRM1, 34 - тахометр, 35 - тумблер включения бензинового электромагнитного клапана, 36 - тумблер включения электромагнитного газового клапана, 37 - тумблер включения электромагнитного газового пускового клапана, 38 - датчик давления, 39 - ПК, 40 - расходомерная шайба, 41 - U-образный манометр, 42 - аналого-цифровой преобразователь, 43 - генератор переменного тока

В результате изучения отечественной и зарубежной литературы, обнаружено, что многие учёные уделяют значительное внимание экспериментальным исследованиям влияния синтез-газа на организацию рабочего процесса ДВС [5-7]. Однако, не удалось выявить достоверных экспериментальных и теоретических данных об особенностях организации рабочего цикла двигателей, работающих на бензине с добавками синтез-газа.

**Цель работы** – эффективное замещение углеводородного топлива альтернативным, а также исследование особенностей процесса сгорания ДВС 2Ч 7,2/6 при работе на бензине с добавками синтез-газа.

#### Изложение основного материала

Процесс смесеобразования и сгорания бензина с добавками синтез-газа в цилиндре двигателя 2Ч 7,2/6 требует дальнейшего теоретического и экспериментального исследования для определения рациональных параметров рабочего цикла. Одним из методов исследования рабочего процесса ДВС при работе с добавками синтез-газа является физическое моделирование, которое позволяет получить достаточно точные результаты.

Исследования рабочего процесса были проведены на экспериментальной установке с двигателем 2Ч 7,2/6, которая представлена на рис. 1.

Используемый для работы двигателя синтез-газ был получен путем термохимической конверсии биоэтанола. Состав синтез-газа определялся химическим анализом с помощью хроматографа NeoCHROM Class B, который проходил предварительную тарировку с помощью образцовых смесей по ТУ-6-16-2956-87. Основными компонентами синтез-газа являются  $H_2$  (43 %),  $CO$  (34 %) и  $CH_4$  (23 %). Расчетная удельная теплота сгорания синтез-газа составила 28,79 МДж/кг, а плотность – 0,63 кг/м<sup>3</sup>.

Основные параметры двигателя 2Ч 7,2/6 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры двигателя 2Ч 7,2/6

| № п.п. | Параметр                            | Единица измерения | Значение |
|--------|-------------------------------------|-------------------|----------|
| 1      | Количество цилиндров                | шт.               | 2        |
| 2      | Рабочий объем цилиндров             | см <sup>3</sup>   | 490      |
| 3      | Диаметр цилиндра                    | мм                | 72       |
| 4      | Ход поршня                          | мм                | 60       |
| 5      | Степень сжатия                      | –                 | 6        |
| 6      | Частота вращения коленчатого вала   | мин <sup>-1</sup> | 3000     |
| 7      | Эффективная мощность                | кВт               | 5,88     |
| 8      | Удельный эффективный расход топлива | кг/(кВт·час)      | 0,435    |

Эксперимент был проведен при добавках синтез-газа к бензину 25%, 28%, 32%, 36%, 58% и 64% по массе.

Экспериментальные индикаторные диаграммы при работе двигателя 2Ч 7,2/6 по нагрузочной характеристике с добавками синтез-газа представлены на рис. 2. С целью не загромождения рисунка, представлены диаграммы с добавками синтез-газа к бензину 28%, 32% и 64%. Мощность двигателя при этом составляла 3 кВт, частота вращения коленчатого вала – 3000 мин<sup>-1</sup>. При добавках синтез-газа к бензину коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  лежал в пределах 1,1...1,22.

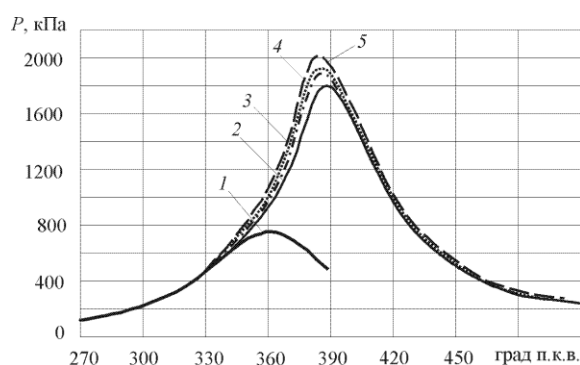


Рис. 2. Индикаторная диаграмма двигателя 2Ч 7,2/6 при разных добавках синтез-газа к бензину: 1 – линия сжатия без сгорания; 2 – бензин; 3, 4, 5 – добавка синтез-газа 28%, 32% и 64 %, соответственно

Для решения поставленной задачи методом математического моделирования, за основу была взята математическая модель рабочего цикла, разработанная на кафедре ДВС Национального университета кораблестроения. Основой для расчета служит уравнение первого закона термодинамики для открытой системы, представленное в дифференциальной форме:

$$dQ \pm \sum_1^n i_j dM_j = d(Mu) + pdV, \quad (1)$$

где  $dQ$  – элементарное количество теплоты, подведенного к рабочему телу;  $\sum_1^n i_j dM_j$  – поток энтальпии, внесенной (+) или вынесенной (–) с элементарными массами  $dM_j$  по отношению к объему  $V$ ;  $M$  – масса рабочего тела в цилиндре;  $u$  – удельная внутренняя энергия рабочего тела;  $p$  – давление в цилиндре.

Для описания процесса сгорания используется полуэмпирическое уравнение И.И. Вибе [8]:

$$x = 1 - \exp \left( \ln(1 - x_z) \left( \frac{t}{t_z} \right)^{m+1} \right), \quad (2)$$

где  $x_z$  – коэффициент тепловыделения в момент завершения процесса сгорания;  $t/t_z$  – относительное время с момента начала сгорания, равное безразмерному углу поворота коленчатого вала двигателя  $\phi/\phi_z$  при постоянной угловой скорости;  $t_z$  – общая продолжительность сгорания;  $m$  – эмпирический коэффициент характера сгорания. Данное уравнение довольно адекватно работает для двигателей, использующих обычное топливо, поскольку вмещает в себя значительное количество обработанных экспериментальных данных разных двигателей. Однако применение его для расчета двигателей, работающих на водородосодержащем газе, приводит к значительным отклонениям между расчетными и экспериментальными данными. В связи с этим была поставлена задача уточнить показатели уравнения тепловыделения при работе двигателя с добавками синтез-газа.

На основе анализа и обработки экспериментальных индикаторных диаграмм двигателя 2Ч 7,2/6, работающего на бензине с добавками синтез-газа, предложено для нахождения переменного значения  $m$  использовать уравнение прямой:

$$m_i = a \cdot \phi_i \cdot \frac{\phi_z}{\phi_z} + b, \quad (3)$$

$$a = -0,1681 \cdot C_{CG}^3 + 0,284 \cdot C_{CG}^2 - 0,1148 \cdot C_{CG} + 0,0281$$

$$b = 10,317 \cdot C_{CG}^3 - 14,877 \cdot C_{CG}^2 + 5,6164 \cdot C_{CG} + 2,5967$$

где  $m_i$  – текущее значение показателя сгорания по углу поворота;  $\phi_i$  – текущее значение угла периода сгорания;  $C_{CG}$  – добавка синтез-газа, %.

Для определения продолжительности сгорания  $\phi_z$  на основе экспериментальных данных для различных значений концентрации водорода было предложено следующее уравнение:

$$\phi_z = \phi_z' + \Delta\phi, \quad (4)$$

$$\text{где } \phi_z' = -16,315 \cdot C_{CG}^2 - 2,239 \cdot C_{CG} + 68,045;$$

$$\Delta\phi = -46,321 \cdot C_{H_2}^2 + 17,329 \cdot C_{H_2} + 1,234;$$

$C_{H_2}$  – концентрация водорода в составе синтез-газа.

Характеристики тепловыделения в безразмерных координатах, а именно доля выгоревшего топлива и относительная скорость сгорания от угла поворота коленчатого вала представлены на рис. 3.

В зависимости от величины добавки синтез-газа, показатель характера сгорания  $m$  лежит в диапазоне 2,4...4,53, а продолжительность сгорания  $\phi_z$  – 40...66°.

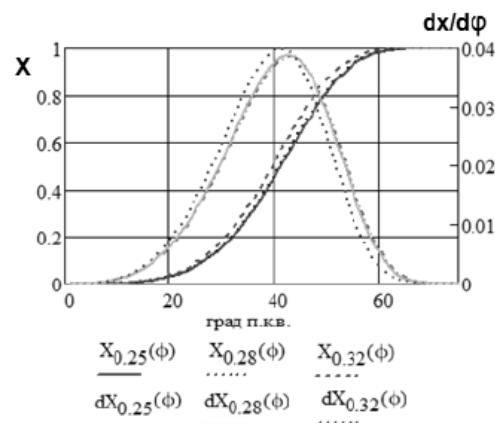


Рис. 3. Характеристики тепловыделения в зависимости от величины добавки синтез-газа к бензину

### Выводы

1. Установлено, что для двигателей с искровым зажиганием, работающих на бензине с добавками синтез-газа, значение показателя сгорания  $m$  носит переменный характер. Определены границы изменения показателя сгорания, для ДВС 2Ч 7,2/6, в зависимости от величины добавки синтез-газа к основному топливу  $m = 2,4...4,53$ .

2. Предложены зависимости для определения значений  $m$  и продолжительности сгорания  $\phi_z$  при коэффициенте избытка воздуха 1,1...1,22.

3. Добавка синтез-газа к бензину уменьшает общую продолжительность сгорания смеси. Так при величине добавки синтез-газа к бензину 64%, для ДВС 2Ч 7,2/6, продолжительность сгорания снижается на 39%. В зависимости от величины добавки синтез-газа продолжительность сгорания  $\phi_z$  лежит в диапазоне 40...66°.

### Список литературы:

1. Данилов, А. М. Альтернативные топлива: достоинства и недостатки. Проблемы применения [Текст] / А. М. Данилов, Э. Ф. Каминский, В. А. Хавкин // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 4-11.
2. Шкалова, В. П. Применение нетрадиционных топлив в дизелях [Текст] / В. П. Шкалова. – М.: НИИД, 1986. – 85 с.
3. Хрипач, Н.А. Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термодинамическим генерированием водородного топлива [Текст] / Н.А. Хрипач, В.Ф. Каменев, В.М. Фомин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – №4(36) – С. 45–50.
4. Носач, В. Г. Повышение эффективности использования природного газа в теплоэнергетике с помощью термодинамической регенерации [Текст] / В. Г. Носач, А. А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т.31, №3 – С. 42–50.
5. Каменев В.Ф., Фомин В.М., Хрипач Н.А. Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на дизельно-водородных топливных композициях // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – №7(27) – С. 32 – 42.
6. Shudo, T. Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases [Text] / T. Shudo, T.

Takahashi // SAE Technical Paper Series. – 2004. – 8–10 June. – P. 23–31. 7. Azimov, U. Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Diesel Micro-Pilot Ignited Dual-Fuel Engine [Text] / U. Azimov, E. Tomita, N. Kawahara // Diesel Engine – Combustion, Emissions and Condition Monitoring; [ed. by B. Saiful]. – Chapter 2. – April 30, 2013. 8. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей : учеб. для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин [и др.] ; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Машиностроение, 1983. – 372 с.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Danilov, A. M. Alternativnye topliva: dostoinstva i nedostatki. Problemy primeneniya [Tekst] / A. M. Danilov, E. F. Kaminskiy, V. A. Havkin // Ros. him. zh. (Zh. Ros. him. ob-va im. D.I.Mendeleeva). – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 4–11. 2. Shkalova, V. P. Primenenie netraditsionnykh topliv v dizelyakh [Tekst] / V. P. Shkalova. – М. : NIAD, 1986. – 85 с. 3. Hripach, N.A. Termodinamicheskiy analiz rabochego tsikla dvigatelya s termohimicheskim generirovaniem

vodorodnogo topliva [Tekst] / N.A. Hripach, V.F. Kamenev, V.M. Fomin [i dr.] // Alternativnaya energetika i ekologiya. – 2006. – #4(36) – С. 45–50. 4. Nosach, V. G. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya prirodnoy gazy v teploenergetike s pomoshchyu termohimicheskoy regeneratsii [Tekst] / V. G. Nosach, A. A. Shrayber // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2009. – Т.31, №3 – С. 42–50. 5. Kamenev V.F., Fomin V.M., Hripach N.A. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya raboty dvigatelya na dizelno-vodorodnykh toplivnykh kompozitsiyah // Alternativnaya energetika i ekologiya. – 2005. – №7(27) – С. 32–42. 6. Shudo, T. Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases [Text] / T. Shudo, T. Takahashi // SAE Technical Paper Series. – 2004. – 8–10 June. – P. 23–31. 7. Azimov, U. Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Diesel Micro-Pilot Ignited Dual-Fuel Engine [Text] / U. Azimov, E. Tomita, N. Kawahara // Diesel Engine – Combustion, Emissions and Condition Monitoring; [ed. by B. Saiful]. – Chapter 2. – April 30, 2013. 8. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevnykh i kombinirovannykh dvigatelya : ucheb. dlya vtuzov po spetsialnosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya» / D. N. Vyirubov, N. A. Ivaschenko, V. I. Ivin [i dr.] ; pod red. A. S. Orlina, M. G. Kruglova. – [4-e izd., pererab. i dop.]. – М. : Mashinostroenie, 1983. – 372 с.

Поступила в редакцию 10.07.2015 г.

**Тимошевский Борис Георгиевич** – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: btyum@mksat.net.

**Ткач Михаил Романович** – доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной механики и технологии машиностроения Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: Muxhaylo.Tkach@nuos.edu.ua.

**Познанский Андрей Станиславович** – преподаватель кафедры инженерной механики и технологии машиностроения Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andreypoznansky@gmail.com.

**Митрофанов Александр Сергеевич** – преподаватель кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: dvs84@inbox.ru.

**Проскурин Аркадий Юрьевич** – преподаватель кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua.

#### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССУ ЗГОРЯННЯ ДВИГУНА 2Ч 7,2/6 З ДОБАВКАМИ ДО 65% СИНТЕЗ-ГАЗУ ДО БЕНЗИНУ**

**Б.Г. Тимошевський, М.Р. Ткач, А.С. Познанський, О.С. Митрофанов, А.Ю. Проскурін**

Представлені результати досліджень роботи двигуна 2Ч 7,2/6 з іскровим запалюванням та зовнішнім сумішоутворенням при роботі на бензині з добавками синтез-газу. Отримано індикаторні діаграми при роботі по навантажувальній характеристиці при добавках синтез-газу - 25-64%. Запропоновано залежності для визначення значень показника згоряння  $m$  і тривалості згоряння  $\varphi_z$  при коефіцієнті надлишку повітря 1,1 ... 1,22.

#### **CHARACTERISTICS OF THE 2 CYLINDER 4-STROKE ENGINE 7,2/6 WITH ADDITIVES TO 65% OF SYNTHESIS GAS TO GASOLINE**

**B.G. Timoshevsky, M.R. Tkach, A.S. Poznansky, A.S. Mitrofanov, A.Y. Proskurin**

The results of the performance of 2 cylinder 4-stroke engine 7,2/6 with spark ignition and external mixture formation at work on gasoline with synthesis gas additives are presented. Indicator diagrams during the working on loading characteristic with addition of synthesis gas - 25-64% were obtained. Dependences for determination of the combustion rate values of  $m$  and length of combustion  $\varphi_z$  when excess air ratio of 1.1 ... 1.22 were offered.