

*Analiz processa i matemati-cheskoe modelirovanie sgoraniya processa sgoraniya vodoroda v chetyrehtaktnom odnocilindrovom dviga-tele s iskrovym vospalmeniem / A.P. Marchenko, A.A. Osetrov, I. Dubej, R. Maamri // Dvigateli vnutrenne-go sgoraniya. – 2010. – № 1. – S. 24-28. 7. Verhelst, S. A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal com-bustion engines / S. Verhelst. – USA: Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics. Ghent University, 2005. – 222 p. 8. Marchenko A. Simulation of Biofuels Combustion in Diesel Engines. Biodiesel - Feedstocks, Production and Applications / A. Marchenko A. Osetrov, O. Linkov D. Samoilenko //Intech. - 2013. R.407-433. - Rezhim dostu-pa: <http://dx.doi.org/10.5772/52/9>. Abramchuk F.I. Metodika rascheta processa sgoraniya gazovogo dviga-telja s vysokojenergeticheskoj*

*sistemoj zazhiganiya / F.I. Abramchuk, A.N. Kabanov // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2007. – № 2. – S. 67-73. 10. Borodin D.Ju. Polipshennja tehniko-ekonomichnih pokaznikov dvotakt-nogo transportnogo dizelja 6TD na osnovi voboru op-timal'nih parametrv sistemi nadduva: Avto-ref. diss. kand. tehn. nauk. - Harkiv: HarDZT, 2000. – 14 s. 11. Rozenblit G.B. Teploperedacha v dizeljah / G.B. Ro-zenblit. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 216 s. 12. Orehov S.N. Matematicheskaja model' rabocheho proces-sa DVS i ee identifikacija / S.N. Orehov // Nauka i obrazovanie: Jelektronnoe nauchnoe izdanie. – 2009. – №12.- Rezhim dostupa: <http://techomag.bmstu.ru/doc/134544.html>.*

Поступила в редакцию 12.05.2012

**Марченко Андрій Петрович** – доктор техн. наук, професор, зав. кафедри двигуни внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: [marchenko@kpi.kharkov.ua](mailto: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](mailto: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](mailto:Skyler-tm@yandex.ru).

## ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ДВИГАТЕЛЕ С ФОРКАМЕРНО-ФАКЕЛЬНЫМ ЗАЖИГАНИЕМ 11ГД100М

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

Работа посвящена исследованию особенностей протекания процесса сгорания обедненных топливно-воздушных смесей в двигателе с форкамерно-факельным зажиганием. По результатам экспериментальных исследований проанализированы показатели процесса сгорания в цилиндре двигателя на режимах нагрузочной характеристики. Обоснован выбор математической модели для описания процесса сгорания в цилиндре исследуемого двигателя. Предложено эмпирические зависимости для определения показателей продолжительности сгорания  $\varphi_2$  и характера сгорания  $m$  модели И. И. Вибе от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ .

## STUDY AND MATHEMATICAL MODELING OF THE COMBUSTION PROCESS IN THE ENGINE WITH PRE-CHAMBER IGNITION

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

The paper studies the features of the process of combustion of lean air-fuel mixture in the engine with pre-chamber - torch ignition. Experimental studies analyzed performance of the combustion process in the engine cylinder modes for load characteristics. The choice of a mathematical model to describe the process of combustion in the cylinder of the test engine was back-grounded. Empirical correlations for indicators of combustion duration and character of combustion  $\varphi_2$  model I. Vibe of the excess air ratio  $\alpha$  were proposed.

УДК 621.438

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

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ 2Ч 7,2/6, РАБОТАЮЩЕГО НА ЭТАНОЛЕ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

*Представлены результаты экспериментальных исследований энергетической установки на базе поршневого двигателя 2Ч 7,2/6 с термохимической утилизацией теплоты отходящих газов. Определено, что 100 % конверсия этанола достигается при 635 °С и весь поступивший в реактор этанол полностью преобразуется в синтез-газ. При работе на синтез-газе, по сравнению с этанолом, расширились пределы воспламенения горючей смеси, что обеспечило работу двигателя в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха 1,25...1,7. При использовании термохимической утилизации экономия этанола достигается во всем диапазоне работы двигателя и составляет 27...38%.*

### Постановка проблемы

Как известно, в ДВС с принудительным зажиганием мощность тепловых потерь с отходящими газами и охлаждающей жидкостью соизмеримы с эффективной мощностью двигателя [1]. При утили-

зации потерь вторичных энергоресурсов возможно получение дополнительной полезной работы, которая может улучшить эффективные и экономические показатели работы двигателя и энергетической установки (ЭУ) в целом.

Потери с охлаждающей жидкостью вследствие низкого температурного потенциала в основном используются для подогрева или охлаждения других теплоносителей [2].

Тепловая энергия отходящих газов двигателей с принудительным зажиганием имеет более высокий температурный уровень (400 – 600 °С) и поэтому может успешно использоваться в утилизационных схемах и установках. Эти схемы получили развитие для дизельных ДВС в судовой и стационарной энергетике, где используются, как для обеспечения теплотой потребителей, так и для получения дополнительной работы [3-6].

#### **Анализ исследований и публикаций**

Одним из перспективных способов утилизации тепловой энергии ОГ для двигателей с принудительным зажиганием является термохимическая утилизация. Данный способ основывается на использовании теплоты ОГ для осуществления эндотермической реакции химического превращения топлива в синтез-газ. В результате реакции теплота сгорания синтез-газа увеличивается на величину утилизированной энергии отходящих газов [7,8]. Полученный синтез-газ может полностью заменять базовое топливо, либо использоваться в качестве добавки к нему [9,10].

Для эффективности применения данного способа утилизации в ДВС с принудительным зажиганием необходимо выполнение определенных условий: температура ОГ на входе в утилизационное устройство должна превышать температуру реакции конверсии топлива, и тепловой мощности отходящих газов должно быть достаточно для получения необходимого количества синтез-газа [11].

На эффективность применения системы термохимической утилизации влияют температура процесса конверсии, теплота химической реакции, свойства исходного топлива, состав полученного синтез-газа, тепловая мощность ОГ ДВС и др.

**Цель работы** – исследование основных параметров работы двигателя при использовании термохимической утилизации теплоты ОГ, а также определение эффективности применения данного способа утилизации.

#### **Изложение основного материала**

Для решения поставленных задач использована экспериментальная установка с помощью которой исследовались особенности работы четырехтактного ДВС с искровым зажиганием 2Ч 7,2/6, работающего на этаноле с системой термохимической утилизации теплоты ОГ [12]. Установка состоит из 2 стендов.

1) Экспериментальный стенд ТХР – 2.0, в котором исследовались процессы, протекающие при термохимической утилизации теплоты ОГ;

2) Экспериментальный стенд на базе двигателя с внешним смесеобразованием 2Ч 7,2/6, в котором исследовались параметры двигателя при работе на синтез-газе.

#### **Экспериментальный стенд ТХР – 2.0**

С целью исследования процессов, протекающих в системе термохимической утилизации теплоты ОГ, а также для получения синтез-газа был использован экспериментальный стенд ТХР – 2.0.

Стенд ТХР-2.0 позволяет проводить физическое моделирование работы системы термохимической утилизации теплоты ОГ, которая входит в состав ЭУ на базе ДВС с принудительным зажиганием. В качестве утилизирующего устройства используется термохимический реактор, в состав которого входят: реакционная трубка, выполненная из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (общая длина – 6 м, внутренний диаметр – 7,8 мм, наружный диаметр – 9 мм), устройства подвода электрической энергии, устройства измерения температуры синтез-газа на выходе из реактора и температур стенки трубки, изоляционный материал.

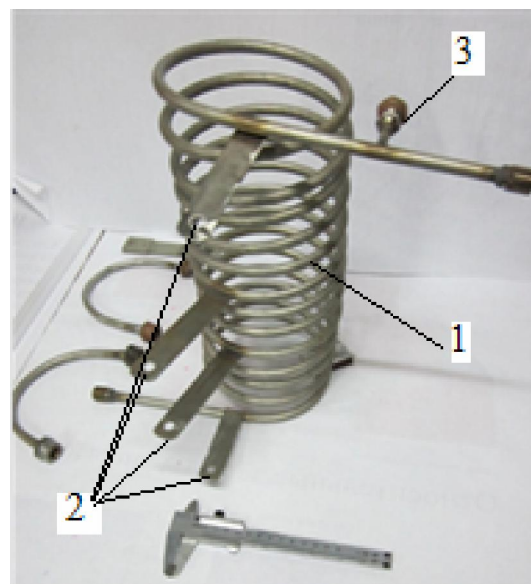


Рис. 1. Реактор для термохимической утилизации теплоты ОГ со снятой теплоизоляцией:

1 – реакционная трубка; 2 – подвод электрической энергии; 3 – штуцер для измерения температуры реакции

Подвод необходимой теплоты для протекания реакции имитируется путем пропускания через трубку змеевика постоянного тока от источника питания напряжением 24...31 В.

Главными параметрами, которые определяют эффективность применения системы термохимической утилизации теплоты ОГ, являются: температура процесса конверсии, теплота химической реакции, степень конверсии и удельный расход топлива на конверсию. На экспериментальном стенде ТХР – 2.0 исследованы основные параметры процесса конверсии (реакция разложения) этанола, в результате которого образуется горючий синтез-газ, на котором в дальнейшем работал ДВС 2Ч 7,2/6.

Как следует из результатов исследований, максимальная достигнутая степень конверсии этанола составила 100 % при температуре реакции (температура синтез-газа на выходе из реактора) 635 °С (рис.2). При достижении 100 % конверсии для получения 1 кг синтез-газа расходуется 1 кг этанола (удельный расход этанола), т.е. весь жидкий этанол, который поступил в реактор, полностью преобразовался в горючее газообразное топливо, при этом удельная теплота химической реакции (количество энергии, необходимое для конверсии 1 кг этанола) составила 3,572 МДж (рис.3).

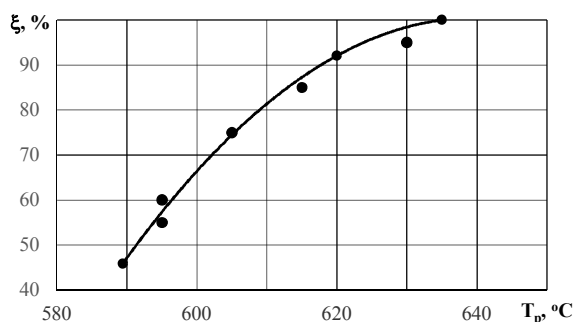


Рис. 2. Влияние температуры синтез-газа на выходе из реактора на степень конверсии этанола

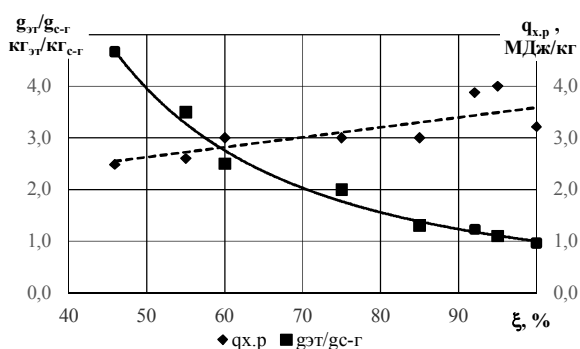


Рис. 3. Влияние степени конверсии на удельный расход этанола и удельную теплоту химической реакции

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. По данным хроматографического анализа в составе синтез-газа, полученного при 100% конверсии этанола присутствуют 3 основные компонента (об. %): водород Н<sub>2</sub> (43 %), оксид углерода II СО (34 %) и метан СН<sub>4</sub> (23 %).

#### Экспериментальный стенд на базе двигателя 2Ч 7,2/6

На базе двигателя 2Ч 7,2/6 с принудительным зажиганием проводились исследования параметров работы на жидком и газообразном топливе.

В качестве жидкого топлива использовался этанол марки А по ГОСТ 17299-78, а в качестве газообразного – синтез-газ, полученный на экспериментальном стенде ТХР – 2.0 при 100% конверсии.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований основных параметров работы двигателя 2Ч 7,2/6 при работе на синтез-газе и этаноле по нагрузочной характеристике.

Максимальная мощность, которая была достигнута при работе двигателя на синтез-газе и этаноле, составила 4 кВт.

Как известно, наличие в составе газообразного топлива большого количества Н<sub>2</sub> и СО значительно расширяет пределы воспламенения горючей смеси. Поэтому при работе двигателя на синтез-газе коэффициент избытка воздуха изменялся в диапазоне 1,25...1,7, а при работе на этаноле – 0,9...1,1.

Вследствие увеличения коэффициента избытка воздуха при использовании синтез-газа уменьшилась температура ОГ во всем диапазоне работы двигателя.

С целью оценки эффективности применения термохимической утилизации теплоты ОГ для двигателя 2Ч 7,2/6 было выполнено сравнение расхода этанола на двигателе и количества затрачиваемого этанола для получения синтез-газа на соответствующем режиме работы, а также определялась доля тепла ОГ, которую необходимо утилизировать для получения синтез-газа (рис. 5).

При условии осуществления 100 % конверсии этанола в синтез-газ на каждом режиме работы двигателя, экономия этанола при использовании термохимической утилизации лежит в диапазоне 27...38%. При этом необходимая доля утилизированной энергии ОГ, включающая в себя затраты на нагрев, испарение, перегрев, преодоление химической реакции и потери, составляет 0,4...0,44.

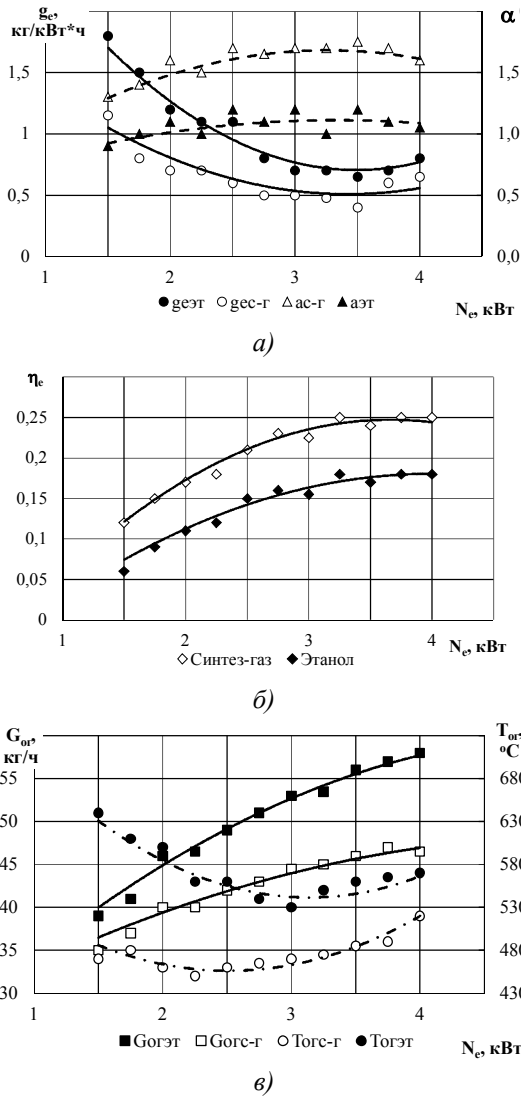


Рис. 4. Основные параметры двигателя при работе на этаноле и синтез-газе по нагрузочной характеристике:  
 а – удельный эффективный расход топлива и коэффициент избытка воздуха; б – эффективный КПД; в – температура и расход ОГ

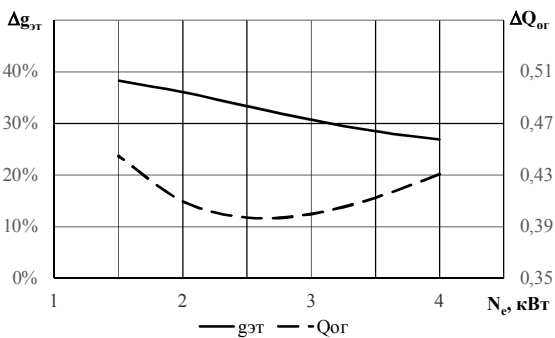


Рис. 5. Экономия этанола и доля утилизированной энергии ОГ при работе двигателя по нагрузочной характеристике

**Выводы**

1. Установлено что при температуре  $635 \text{ }^\circ\text{C} \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$  достигается 100 % конверсия поступившего в реактор жидкого этанола.
2. При работе двигателя 2Ч 7,2/6 по нагрузочной характеристике на синтез-газе расширились пределы воспламенения горючей смеси, что обеспечило работу двигателя в диапазоне коэффициента избытка воздуха 1,25... 1,7.
3. При использовании термохимической утилизации ОГ для двигателя 2Ч 7,2/6 экономия жидкого топлива (этанола) составляет 27...38% во всем диапазоне режимов работы двигателя.

**Список литературы:**

1. Матиевский, Д. Д. Перспективы использования поршневых ДВС в качестве источника тепловой и электрической энергии для энергоснабжения промышленных объектов [Текст] / Д. Д. Матиевский, В. В. Логвиненко, А. Г. Кузьмин // Ползуновский вестник. – 2003. – № 1,2. – С. 4-8.
2. Маслов, В. В. Утилизация теплоты судовых дизелей [Текст] / В. В. Маслов – М.: Транспорт, 1990. – 144 с.
3. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок: Учеб для вузов [Текст] / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. Ф. Большаков и др. – М.: Транспорт, 1996. – 432 с.
4. Захаров, Г. В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок [Текст] / Г. В. Захаров – М.: Транслит, 2009. – 256 с.
5. Возницкий, И. В. Современные малооборотные двухтактные двигатели [Текст] / И. В. Возницкий – М.: Моркнига, 2009. – 256 с.
6. Руднев, В. В. Повышение экономических и экологических показателей дизель-генераторных установок утилизацией теплоты отработавших газов в двигателе с внутренним объемным смесеобразованием : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / В. В. Руднев. – Челябинск., 2007. – 123 с.
7. Хрипач, Н. А. Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термохимическим генерированием водородного топлива [Текст] / Н. А. Хрипач, В. Ф. Каменев, В. М. Фолин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – №4(36) – С. 45-50.
8. Тимошевский, Б. Г. Эффективность термохимической конверсии углеводородных топлив применяемых в ДВС [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин // Вісник НУК. – 2011. – №3. – С. 36-42.
9. Носач, В. Г. Повышение эффективности использования природного газа в теплоэнергетике с помощью термохимической регенерации [Текст] / В. Г. Носач, А. А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т.31, №3 – С. 42-50.
10. Кириллов, В. А. Применение синтез-газа в качестве добавки к основному топливу в транспортных средствах: состояние и перспективы [Текст] / В. А. Кириллов, Н. А. Кузин, В. В. Киреевков [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2011. – №2(45) – С. 139-154.
11. Експериментальне дослідження параметрів поршневого ДВЗ із системою термохімічної конверсії біоетанолу [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Проскурін // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2011. – № 2. – С. 3-8.
12. Характеристики экспериментальной системы конверсии биоэтанола ДВС 2Ч 7,2/6 [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю.

Проскурин // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2013. – № 1. – С. 28–32.

**Bibliography (transliterated):**

1. Matievskiy, D. D. Perspektivy ispolzovaniya porshnevnykh DVS v kachestve istochnika teplovoiy i elektricheskoy energii dlya energosnabzheniya promyshlennykh ob'ektov [Tekst] / D. D. Matievskiy, V. V. Logvinenko, A. G. Kuzmin // Polzunovskiy vestnik. – 2003. – № 1,2. – S. 4-8. 2. Maslov, V. V. Utilizatsiya teploiy sudovykh dizeley [Tekst] / V. V. Maslov – M.: Transport, 1990. – 144 s. 3. Eksploatatsiya sudovykh dizelnykh energeticheskikh ustanovok: Ucheb dlya vuzov [Tekst] / S. V. Kamkin, I. V. Voznitskiy, V. F. Bolshakov i dr. – M.: Transport, 1996. – 432 s. 4. Zaharov, G. V. Tehnicheskaya eksploatatsiya sudovykh dizelnykh ustanovok [Tekst] / G. V. Zaharov – M.: TransLit, 2009. – 256 s. 5. Voznitskiy, I. V. Sovremennyye malooborotnyye dvuhtaktnyye dvigateli [Tekst] / I. V. Voznitskiy – M.: Morkniga, 2009. – 256 s. 6. Rudnev, V. V. Povyshenie ekonomicheskikh i ekologicheskikh pokazateley dizel-generatornykh ustanovok utilizatsiey teploiy otrabotavshih gazov v dvigatele s vnutrennim ob'emnym smeseobrazovaniem : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.04.02 / V. V. Rudnev. – Chelyabinsk., 2007. – 123 s. 7. Hripach, N. A. Termodinamicheskyy analiz rabocheho tsikla dvi-

gatelya s termohimicheskim generirovaniem vodorodnogo topliva [Tekst] / N. A. Hripach, V. F. Kamenev, V. M. Fomin [i dr.] // Alternativnaya energetika i ekologiya. – 2006. – №4(36) – S. 45–50. 8. Timoshevskiy, B. G. Effektivnost termohimicheskoy konversii uglevodorodnykh topliv primenyaemykh v DVS [Tekst] / B. G. Timoshevskiy, M. R. Tkach, A. Yu. Proskurin // VIsnik NUK. – 2011. – #3. – S. 36-42. 9. Nosach, V. G. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya prirodnogo gaza v teploenergetike s pomoschy termohimicheskoy regeneratsii [Tekst] / V. G. Nosach, A. A. Shrayber // Promyshlennaya teplotehnika. – 2009. – T.31, №3 – S. 42–50. 10. Kirillov, V. A. Primenenie sintez-gaza v kachestve dobavki k osnovnomu toplivu v transportnykh sredstvakh: sostoyanie i perspektivy [Tekst] / V. A. Kirillov, N. A. Kuzin, V. V. Kireenkov [i dr.] // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii. – 2011. – №2(45) – S. 139–154. 11. Eksperimentalne doslidzhennya parametrv porshnevoho DVZ Iz sistemoiy termohimicheskoy konversii bioetanola [Tekst] / B. G. Timoshevskiy, M. R. Tkach, O. S. Mitrofanov, A. S. Poznanskiy, A. Yu. Proskurin // Dvigateli vnutrenneho sgoraniya : Vseukrainskiy nauchno-tehnicheskii zhurnal. – 2011. – № 2. – S. 3–8. 12. Harakteristiki eksperimentalnoy sistemy konversii bioetanola DVS 2Ch 7,2/6 [Tekst] / M. R. Tkach, B. G. Timoshevskiy, A. S. Mitrofanov, A. S. Poznanskiy, A. Yu. Proskurin // Dvigateli vnutrenneho sgoraniya : Vseukrainskiy nauchno-tehnicheskii zhurnal. – 2013. – №1. – S. 28–32.

Поступила в редакцию 31.05.2014

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

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

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

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

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

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ 2Ч 7,2/6, РАБОТАЮЩЕГО НА ЭТАНОЛЕ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ**

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

Представлені результати експериментальних досліджень енергетичної установки на базі поршневого двигуна 2Ч 7,2 / 6 з термохімічною утилізацією теплоти відпрацьованих газів. На стенді ТХР - 2.0 визначено, що 100% конверсія етанолу досягається при 635 °С і весь надійшовший в реактор етанол повністю перетворюється в синтез-газ. При роботі на синтез-газі, в порівнянні з етанолом, розширилися межі займання горючої суміші, що забезпечило роботу двигуна в широкому діапазоні зміни коефіцієнта надлишку повітря від 1,25 до 1,7. При використанні термохімічної утилізації економія етанолу досягається у всьому діапазоні роботи двигуна і змінюється від 27 до 38%.

**EFFICIENCY OF EXHAUST GASES THERMOCHEMICAL HEAT UTILIZATION FOR THE ETHANOL 2 CYLINDER 4-STROKE ENGINE 7,2/6**

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

The results of the power plant features experimental studies based on reciprocating engine 2 cylinder 4-stroke engine 7,2/6 with the thermochemical heat recovery of exhaust gases are presented. On TCR - 2.0 test bench was determined that 100% conversion of ethanol at 635 °C is achieved and the entire incoming reactor ethanol is completely converted to synthesis gas. When working on the synthesis gas, as compared with ethanol, expanded the limits of ignition of the combustible mixture, which provided engine performance in a wide range of excess air ratio of 1.25 to 1.7. When using waste thermochemical ethanol savings achieved throughout the engine operating range and varies from 27 to 38%.