

УДК 621.438

А.К. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, М.Р. ТКАЧ

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ БИОЭТАНОЛА ВТОРИЧНЫМИ ЭНЕРГОРЕСУРСАМИ ГТД

Обоснована целесообразность проведения конверсии углеводородного топлива на основе биоэтанола вторичными энергоресурсами ГТД. Приведена схема стенда для экспериментальных исследований процессов термохимической конверсии путем регенерации тепла отработавших газов газотурбинного двигателя. Предложен косвенный способ для измерения теплоты сгорания продуктов паровой конверсии спиртов, основанный на измерении объемного расхода, давления, температуры и перепадов давления тарировочного и исследуемого газа. Приведена схема устройства для измерения теплоты сгорания смеси газов паровой конверсии спиртов.

Ключевые слова: конверсия топлива, газотурбинный двигатель, этанол, термохимическая регенерация тепла, теплота сгорания топлива, экспериментальный стенд, способ измерения

Постановка проблемы

Международные конвенции по ограничению загрязнения окружающей среды с каждым годом становятся все жестче, а экономия углеводородных энергоресурсов требует от производителей и разработчиков оборудования создания принципиально новых энергетических установок, работающих на экологически чистых видах топлива. Особое место среди альтернативных топлив, используемых в энергетических установках, занимает водород. Водород как топливо обладает высокой теплотворной способностью и является химическим реакционно-активным компонентом, эффективно противодействующим процессам образования вредных выбросов. Участие в рабочем цикле ДВС водорода приводит к существенному улучшению экологических показателей дизеля [1].

Получение водородосодержащих газовых смесей (синтез-газа) возможно в результате термохимической конверсии базового углеводородного топлива, сопровождающейся эндотермическим эффектом [2, 3].

Газотурбинные технологии позволяют создать теплосиловое оборудование для выработки всех необходимых видов энергии. Анализ теплового баланса газотурбинного двигателя показывает, что существенная часть энергии топлива не реализуется в виде работы, а выводится из цикла с отходящими газами, вызывая тем самым необратимые потери в цикле. Одним из путей повышения эффективности газотурбинной установки может быть термохимическая регенерация (ТХР) тепла отходящих газов дви-

гателя путем конверсии базового углеводородного топлива [4].

Анализ исследований и публикаций

В качестве базового топлива для теплосилового оборудования, в том числе на основе газотурбинных технологий могут использоваться традиционные и различные альтернативные углеводородные топлива - отходы термопластических полимеров, этанол, метанол, диметиловый эфир. Разработаны проекты технологических комплексов производства биогаза, получаемого из возобновляемого сырья путем переработки методами ферментации бытовых отходов, отходов птице- и животноводства, сточных вод [5].

Применение ТХР в энергетических установках позволяет решить комплексную проблему повышения экономичности установки и снижения токсичных выбросов в атмосферу.

Известны работы, посвященные теоретическому и экспериментальному исследованию возможности термохимической регенерации тепла отходящих газов ДВС [2, 4, 6].

Анализ эффективности ТХР для газотурбинных установок, в том числе с совместной термодинамической и термохимической регенерацией тепла, а также в парогазотурбинных установках проведен в работах [2, 4, 7, 8, 9].

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают эффективность и перспективность термохимической регенерации тепла в тепловых двигателях. Выявлено, что эффективность применения ТХР в первую очередь зависит

от температуры процесса в риформере, которая, в свою очередь, напрямую зависит от температуры отходящих газов базового двигателя.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Эндотермическая термохимическая регенерация возможна при условии, что в качестве исходного конвертируемого продукта используются химические соединения с температурой конверсии ниже среднего температурного уровня выпускных газов.

При организации эндотермических процессов конверсии в условиях работы двигателя важным вопросом является выбор базового углеводородного соединения, способного при относительно невысоком среднем уровне сбросного тепла конвертировать в целевые газообразные продукты заданного химического состава (монооксид углерода и водород).

Умеренный тепловой потенциал вторичных энергоресурсов ДВС приводит к тому, что для таких двигателей термохимическая регенерация целесообразна при использовании в качестве базового сырья ряда легких гомологов предельных углеводородов (алканов), низших спиртов и простых эфиров.

Выявлено, что для газотурбинных установок ТХР возможна с разной степенью конверсии для таких топлив, как природный газ, метан и его гомологи, бензин, дизельное топливо, спирты [10].

Одним из перспективных видов конверсионных топлив является биотопливо – биоэтанол, биодизель, биогаз [11].

Перспективным вариантом использования биотоплива может быть комплекс из газотурбинного двигателя с термохимической регенерацией вторичных энергоресурсов и двигателя внутреннего сгорания работающего на продуктах конверсии биотоплива.

Представляет интерес экспериментальное исследование взаимосвязи термодинамических параметров газотурбинного двигателя и технокимических показателей углеводородного топлива на основе биоэтанола при его термохимической конверсии, что требует создания системы измерения и регистрации параметров рабочих сред.

Цель работы

Целью работы является разработка схемы стенда для экспериментальных исследований процессов термохимической конверсии углеводородного топлива на основе биоэтанола вторичными энергоресурсами ГТД. Данные исследования требуют непрерывного измерения теплоты сгорания смеси газов конверсии спиртов с использованием достаточно простой аппаратной базы, в связи с чем работа посвящена разработке принципиально нового способа измерения и устройства для его осуществления.

Изложение основного материала

Структура стенда ГТД-14-ТХР функционально сформирована из пяти подсистем: энергетической, топливной, нагружения, термохимической регенерации и измерения.

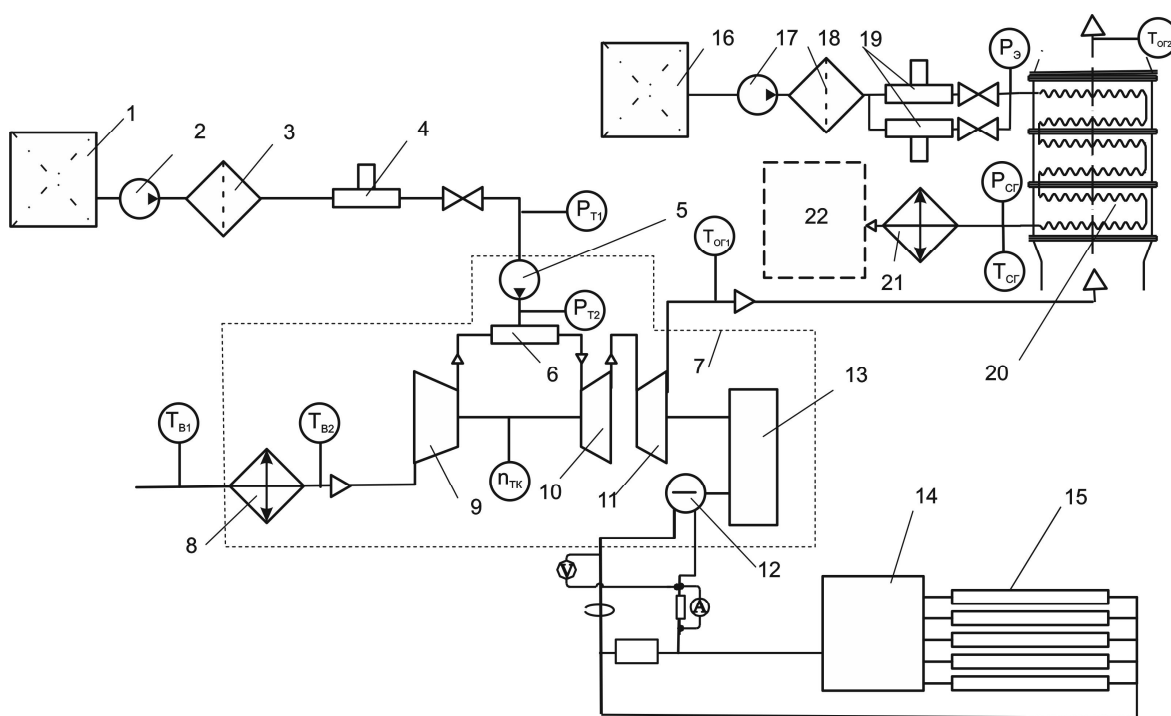


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Энергетическая подсистема является основой стенда (рис. 1) и создана на базе газотурбинного вспомогательный двигателя АИ-8, предназначенного для использования в составе бортовых и наземных источников автономного электроснабжения.

Двигатель однокаскадный, со свободной силовой турбиной 11 (турбиной генератора). Блок газогенератора состоит из компрессора 9 центробежного типа и приводной турбины 10 турбокомпрессора. Камера сгорания кольцевая с шестью форсунками. Подвод воздуха для работы двигателя осуществляется через пластинчато-ребристый охладитель масла 8. Отработавшие газы по выпускному трубопроводу отводятся в газовыпускной трубопровод. Энергетическая подсистема оборудована штатной системой дистанционного управления ГТД.

В подсистеме нагружения ГТД АИ-8, через редуктор 13 приводит штатный электрический генератор постоянного тока 12, который связан с активной нагрузкой 15, выполненной в виде блока ТЭН. Для согласования параметров генератора и нагрузки предусмотрен инвертор 14.

Топливная подсистема выполнена по следующей схеме. Подача жидкого топлива из двухсекционной цистерны 1, осуществляется шестеренным топливоподкачивающим насосом 2 в топливную систему ГТД через топливный фильтр 3 и турбинный преобразователь расхода 4. Требуемая величина давления топлива перед форсунками обеспечивается наवेशным топливным насосом 5 центробежного типа.

Подсистема термохимической регенерации предусматривает размещение за газовыхлопом ГТД реактора 20 конверсии биоэтанола. Для минимизации тепловых потерь применена теплоизоляция корпуса термохимического реактора. Температура наружного слоя изоляции (внешнего защитного кожуха) не превышает 40 °С. Водный раствор этанола из бака 16 топливным насосом 17 через фильтр 18 подается на турбинные преобразователи расхода 19 типа ТПР5 или ТПР2. Необходимая точность измерения расхода биоэтанола обеспечивается перекрытием расходных характеристик каждого из турбинных преобразователей. При этом верхний предел измерений датчика ТПР2 с небольшим запасом превышает нижний предел измерений датчика ТПР5.

Пройдя стадию термохимического преобразования продукты конверсии этанола (ПКЭ) поступают в охладитель 21, обдуваемый осевым вентилятором и далее в блок 22 измерения расхода и теплоты сгорания ПКЭ.

Основу подсистемы измерения параметров составляют штатные измерительные приборы ГТД и электрогенератора. Подсистема дооснащена контрольными измерительными приборами и системой

первичных датчиков для обеспечения автоматизации проведения эксперимента и обработки данных. При установке датчиков контроля параметров рабочих сред (датчиков температуры, давления, частоты вращения) по возможности использовались штатные присоединительные патрубки и приводы для их присоединения.

Эффективность конверсии биоэтанола в принятой схеме термохимической регенерации тепла отходящих газов ГТД может быть оценена по расходу ПКЭ и теплоте сгорания полученной смеси.

Разработка экспериментального стенда потребовала доработки подсистемы измерения и создания эффективных, быстродействующих и достаточно простых средств измерения теплоты сгорания ПКЭ.

Проведенный анализ литературных и электронных источников информации показал, что существующие способы определения теплоты сгорания горючих газов базируются на прямых и косвенных методах измерения. Способы, которые базируются на прямых методах измерения предусматривают сжигание газа в калориметре или основаны на регистрации теплового потока от мини-факела. Измерение такими способами требуют достаточно много времени и характеризуются умеренной точностью.

Косвенные способы основаны на функциональных связях некоторых параметров, характеризующих исходный газ или процесс его окисления (сгорания) с теплотой сгорания газа, например связанные с измерением плотности газа [12]. Например, в способе измерения теплоты сгорания основных горючих компонентов природного газа [13] предусматривается измерение скорости звука в газе и воздухе с последующим расчетом плотности газа, после чего по эмпирической линейной зависимости рассчитывается теплота сгорания газа. Реализация такого способа требует достаточно сложного устройства, а обработка результатов занимает много времени.

Авторами был разработан и реализован в виде одной из компонент подсистемы измерения косвенный способ измерения теплоты сгорания продуктов паровой конверсии спиртов, основанный на измерении объемного расхода, давления, температуры и перепадов давления тарировочного и исследуемого газа.

Реализация предлагаемого способа в составе измерительной подсистемы выполнена следующим образом (рис.2). Перед началом определения теплоты сгорания ПКЭ с помощью расходомера 3 выполняется процедура тарировки преобразователя перепадного перепада давления 8 по тарировочному газу (для рассматриваемого экспериментального стенда используется воздух). При этом измеряется Δp_T

перепад давления воздуха на преобразователи переменного перепада давления 8 (в реализованном устройстве - расходомерной диафрагме). По результатам измерения температуры и давления измеренный перепад давления потока воздуха приводится к нормальным условиям (НУ) блоком системы обработки информации 10. После этого с помощью трехходового клапана 5 из расходомерной емкости 1 продукты конверсии этанола через расходомер 4 подаются на диафрагму 8. При этом измеряется перепад давления потока ПКЭ на диафрагме. По результатам измерения температуры и давления перепад давления ПКЭ приводится к НУ блоком 10.

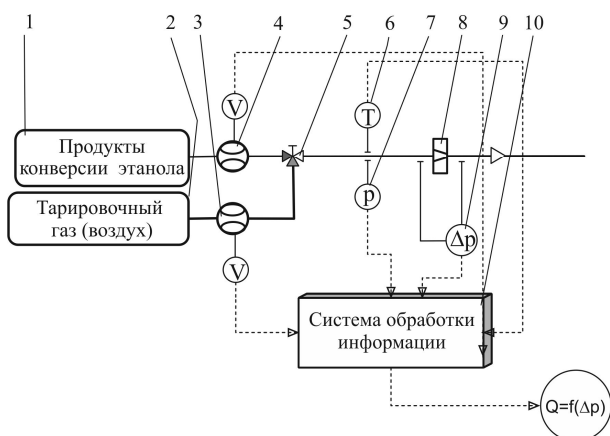


Рис. 2. Схема устройства для определения теплоты сгорания продуктов конверсии этанола

Полученные значения расхода и перепадов давления позволяют рассчитать теплоту сгорания ПКЭ с помощью эмпирической нелинейной зависимости

$$Q = a \cdot e^{b \cdot \bar{\rho}}, \quad (1)$$

где Q - теплота сгорания ПКЭ; $\bar{\rho}$ - относительная плотность ПКЭ, которая определяется как $\bar{\rho} = (\Delta p / \Delta p_T) \cdot (W_T / W)^2$, где Δp и Δp_T - перепад давления ПКЭ и воздуха на расходомерной диафрагме приведенные к НУ, W_T и W - объемные расходы воздуха и ПКЭ; a и b - коэффициенты, которые зависят от состава смеси газов.

По экспериментальным результатам [14] в соответствии с предлагаемой методикой были получены зависимости для определения теплоты сгорания продуктов паровой конверсии этанола.

На рис. 3 приведены результаты исследования состава смеси газов паровой конверсии биоэтанола в зависимости от температуры в реакторе.

На рис. 4 представлена зависимость плотности ПКЭ приведенной к нормальным условиям, от температуры.

На рис. 5 представлена зависимость объемной теплоты сгорания ПКЭ от плотности.

В результате расчетов для теплоты сгорания сухой смеси газов паровой конверсии этанола была получена следующая зависимость:

$$Q = 3,7462 \cdot e^{2,009 \cdot \bar{\rho}}.$$

Обработка данных результатов исследования паровой конверсии этанола, приведенных в работе [15], позволила определить значения коэффициентов в уравнении (1):

$$a = 3,6785 \text{ и } b = 2,0735.$$

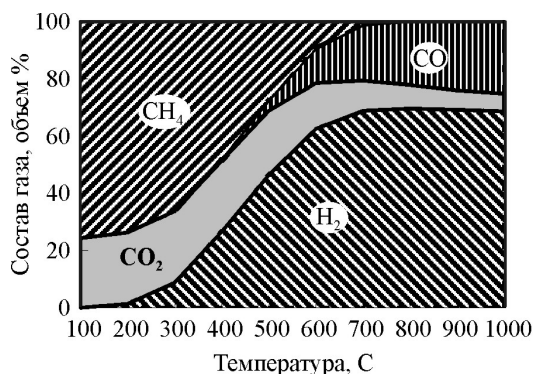


Рис. 3. Зависимость ПКЭ от температуры в реакторе

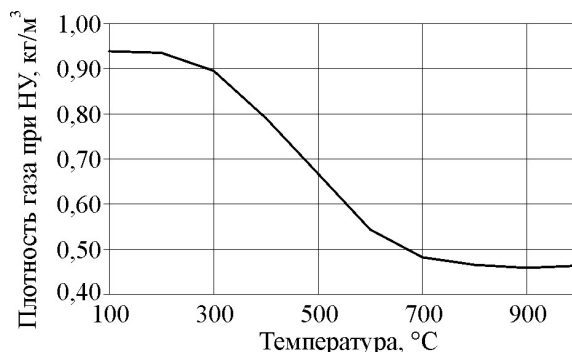


Рис. 4. Зависимость плотности ПКЭ от температуры в реакторе

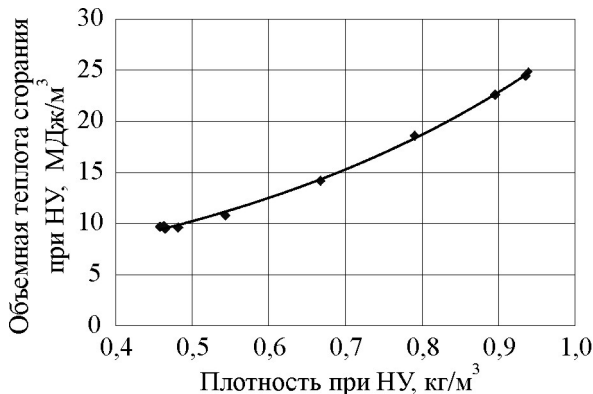


Рис. 5. Зависимость объемной теплоты сгорания ПКЭ от плотности

Выводы

1. Создан стенд на базе автономного газотурбогенератора с термохимической регенерацией тепла отходящих газов, позволяющий экспериментально исследовать влияние термодинамических параметров ГТД на техникохимические показатели углеводородного топлива на основе биоэтанола при его термохимической конверсии.

2. Показана возможность определения в режиме реального времени теплоты сгорания продуктов паровой конверсии спиртов при экспериментальном исследовании процессов термохимической регенерации тепла.

Литература

1. Каменев, В.Ф. Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на дизельно-водородных топливных композициях [Текст] / В.Ф. Каменев, В.М. Фомин, Н.А. Хрипач // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. – 2005. – № 7. – С. 32-42.

2. Носач, В.Г. Энергия топлива [Текст] / В.Г. Носач. – К.: Наук. думка, 1989. – 148 с.

3. Корабельников, А.В. Химическая регенерация тепла и преобразования топлива в энергетических установках [Электронный ресурс] / А.В. Корабельников, А.Л. Куранов, С.С. Рыжиков // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. – Режим доступа: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2006-10-12-002.pdf>. – 11.06.2012 г.

4. Korobitsyn, M.A. *New and Advanced Energy Conversion Technologies. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles* [Text] / M.A. Korobitsyn. – Printed by Febodruk BV, Enschede, 1998. – 155 p.

5. Гибридные газотурбинные установки на топливах биологического происхождения [Текст] / Л.С. Яновский, А.В. Бойков, В.Ф. Чухарев [и др.] // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2009. – № 4 (40). – С. 40-47.

6. Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термохимическим генерированием водородного топлива [Текст] / Н.А. Хрипач, В.Ф. Каменев, В.М. Фомин, С.В. Алешин // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. – 2006. – № 4(36). – С. 45-50.

7. Horlock, H.J. *Advanced gas turbine cycles* [Text] / H.J. Horlock. – Elsevier Inc., 2003. – 203 p.

8. Чердниченко, А.К. Об эффективности термохимической регенерации тепла в газотурбинных установках мобильных энергокомплексов [Электронный ресурс] / А.К. Чердниченко // *Электронное видання "Вісник Національного університету кораблебудування"*. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 1. – Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>. – 11.06.2012 г.

9. Верхівкер, Г.П. Хімічна регенерація тепла у парогазових установках [Текст] / Г.П. Верхівкер, Абу-Ельджадаїль Кахер, В.П. Кравченко // *Труди ОПУ*. – 2003. – № 3 (12). – С. 59–62.

10. Ткач, М.Р. Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией тепла отходящих газов [Текст] / М.Р. Ткач, А.К. Чердниченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 19-22.

11. Носач, В.Г. Повышение эффективности использования биогаза в теплоэнергетических установках с помощью термохимической регенерации [Текст] / В.Г. Носач, А.А. Шрайбер // *Промышленная теплотехника*. – 2009. – № 2. – С. 57-63.

12. Пат. 2091779 Российская Федерация, МПК6, G01N 22/25. Способ определения теплоты сгорания природного газа [Текст] / Глаголев М.В., Казаковский М.Т., Артемов Л.В.; Заявитель и патентообладатель Российский федеральный ядерный центр. – № 95114630/25; заявл. 11.08.95; опубл. 27.09.97.

13. Patent 4246773 United States, G01N 29/02 *Combustion property of gas measuring apparatus* [Текст] / Masao Haruta, Osaka Gas company Ltd.-appl. № 22357; Mar 20, 1979; data of patent Jan 27, 1981.

14. *Steam reforming of technical bioethanol for hydrogen production* [Текст] / J. Rass-Hansen, R. Johansson, M. Moller, C.H. Christensen // *International Journal of hydrogen energy*. – 2008. – № 33. – P. 4547-4554.

15. *Hydrogen from steam reforming of ethanol in low and middle temperature range for fuel cell application* [Текст] / Jie San, Xinpeng Oiu, Feng Wu and et al. // *International Journal of hydrogen energy*. – 2004. – № 29. – P. 1075-1081.

Поступила в редакцию 11.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.И. Сербин, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
ТЕРМОХІМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ БІОЕТАНОЛУ
ВТОРИННИМИ ЕНЕРГОРЕСУРСАМИ ГТД**

О.К. Чердніченко, М.Р. Ткач

Обґрунтовано доцільність проведення конверсії вуглеводневого палива на основі біоетанолу вторинними енергоресурсами ГТД. Наведено схема стенда для експериментальних досліджень процесів термохімічної конверсії шляхом регенерації тепла відпрацьованих газів газотурбінного двигуна. Запропоновано непрямий спосіб для вимірювання теплоти згоряння продуктів парової конверсії спиртів, заснований на вимірюванні об'ємної витрати, тиску, температури і перепадів тиску тарувального і досліджуваного газу. Наведено схема пристрою для вимірювання теплоти згоряння суміші газів парової конверсії спиртів.

Ключові слова: конверсія палива, газотурбінний двигун, етанол, термохімічна регенерація тепла, теплота згоряння палива, експериментальний стенд, спосіб вимірювання.

**TEST BENCH FOR RESEARCH OF THERMOCHEMISTRY CONVERSION OF BIOETHANOL
BY USE OF THE WASTE HEAT OF GAS TURBINE ENGINE**

A.K. Cherednichenko, M.R. Tkach

The usefulness of the conversion of bioethanol by use of the waste heat of gas turbine engine is proved. The scheme of the test bench for experimental studies of processes of thermochemical conversion by heat recovery of exhaust gas turbine engine is given. The authors propose an indirect method for measuring of the heat of oil combustion value of steam reforming of alcohols based on measuring of the volumetric flow rate, pressure, temperature and pressure changes of air and tested gas. A scheme of the device for measuring of heat of gas combustion mixture of the stream conversion of alcohols.

Key words: conversion of fuel, gas turbine engine, ethanol, thermochemical regeneration of heat, oil combustion value, test bench, measurement procedure.

Чердніченко Александр Константинович — канд. техн. наук, доцент кафедри судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: oleksandr.cherednichenko@nuos.edu.ua.

Ткач Михаил Романович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua.