

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ 1С 7,5/6 С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Представлены результаты численных исследований параметров работы энергетической установки на базе поршневого двигателя 1С 7,5/6 с термохимической утилизацией теплоты отходящих газов. Определены параметры работы двигателя в зависимости от режима нагрузки при работе по нагрузочной характеристике на этаноле и синтез-газах, полученных по реакции разложения и паровой конверсии. Установлено, что для ДВС 1С 7,5/6, работающего на этаноле применение ТХУ теплоты отходящих газов эффективно при конверсии этанола по реакции разложения. Снижение расхода этанола достигается при степенях конверсии – 95...100 % и составляет 6...26 г/(кВт·ч) (1...5,4 %). Определено, что рациональный температурный напор на входе в термохимический реактор лежит в диапазоне 20...160 °С. Доля теплоты отходящих газов, которую необходимо утилизировать, изменяется в пределах 38...44 %.

Постановка проблемы

Согласно внешнему тепловому балансу современных ДВС с принудительным зажиганием тепловые потери с отходящими газами составляют 25...40% энергии, которая вносится в двигатель вместе с топливом [1].

При утилизации этих потерь возможно получение дополнительной энергии, которая может улучшить показатели работы двигателя и установки [2]. Попытки переноса утилизационных схем, которые успешно используются в судовой и стационарной энергетике с дизелями на установки с двигателями меньшей мощности не нашли широкого распространения, хотя и неоднократно предпринимались как в нашей стране, так и за рубежом.

Анализ исследований и публикаций

Одним из перспективных способов утилизации энергии отходящих газов, который успешно может быть использован для энергетических установок на базе ДВС с принудительным зажиганием и отвечать всем специфическим требованиям, предъявляемым к системам утилизации, является термохимическая утилизация (ТХУ) [3,4].

ТХУ представляет собой совокупность процессов, направленных на использование тепловой энергии отходящих газов для осуществления эндотермической реакции химического превращения (конверсии) топлива в смесь горючих газов (СО, Н₂, СН₄ и др. – синтез-газ). В результате конверсии химическая энергия полученного синтез-газа превышает энергию исходного топлива на величину утилизированной энергии отходящих газов [5].

В зависимости от типа реакции конверсии и наличия дополнительных реагентов, теплотворная способность 1 кг этанола, может быть увеличена в диапазоне 6...25% [6].

Эффективность энергетической установки с системой ТХУ зависит от температурно-энергетических показателей процесса получения

синтез-газа, свойств исходного топлива [7], способа химического превращения, состава образовавшегося синтез-газа, особенностей работы ДВС на синтез-газе, температурно-энергетического потенциал ОГ и др.

Цель работы – исследование эффективности энергетической установки на базе ДВС с принудительным зажиганием при использовании термохимической утилизации теплоты отходящих газов.

Изложение основного материала

Для эффективного использования ТХУ в энергетических установках с ДВС необходимо выполнение 2 условий:

1) количество теплоты, необходимое для получения синтез-газа, не должно превышать максимальное количество энергии, которое может быть утилизировано с отходящими газами;

2) разница между температурой отходящих газов на входе в утилизационное устройство и температурой синтез-газа на выходе из него (температура конверсии топлива) не должна быть ниже величины установленного температурного напора на входе, т.е. максимальная температура процесса конверсии топлива не может превышать максимальную температуру отходящих газов в утилизационном устройстве.

Температурный напор на входе, а также максимальное количество энергии, которое может быть утилизировано с отходящими газами зависят от конструкции и типа утилизационного устройства – термохимического реактора, наличия или отсутствия катализаторов и уточняются только экспериментальным путем.

Для двигателя Robin Subaru EX27D – 1С 7,5/6, который входит в состав автономной электростанции [8] (рис.1) было проведено численное исследование параметров работы с ТХУ теплоты отходящих газов. Данный двигатель конвертирован для работы на этаноле.



Рис. 1. Автономная электростанция на базе двигателя Robin Subaru EX27D

В качестве процесса превращения этанола в синтез-газ рассматривалась паровая конверсия (1) и конверсия по реакции разложения (2) [9]:

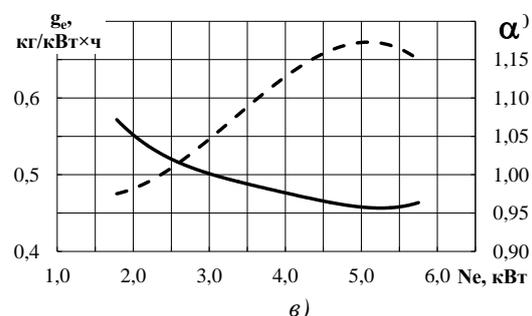
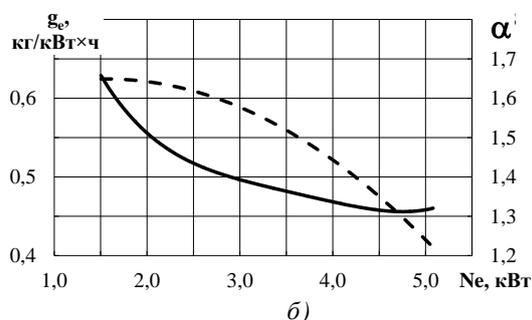
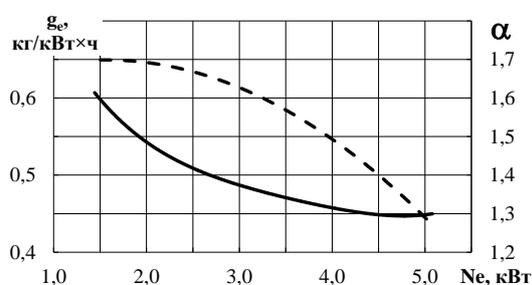
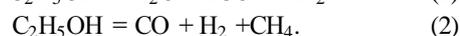


Рис.2. Параметры двигателя ИЧ 7,5/6 при работе по нагрузочной характеристике на различных топливах:

а – синтез-газ, полученный по реакции разложения;
 б – синтез-газ, полученный паровой конверсией;
 в – этанол; _____ – удельный эффективный расход топлива; _____ – коэффициент избытка воздуха

На базе усовершенствованной математической модели рабочего цикла [10] определены параметры работы двигателя в зависимости от режима нагрузки при работе по нагрузочной характеристике при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ на этаноле и синтез-газах, полученных при 100% конверсии по (1) и (2) (рис. 2).

При работе двигателя на синтез-газах по сравнению с этанолом уменьшилась номинальная мощность - с 5,75 кВт до 5,08 кВт (13%).

Эффективность ТХУ теплоты отходящих газов выполнялась путем сравнения расхода этанола g_e на двигателе и количества затрачиваемого этанола для получения синтез-газа на соответствующем режиме работы (рис. 3).

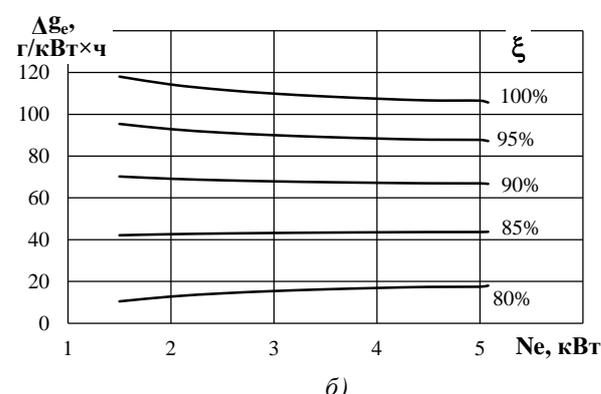
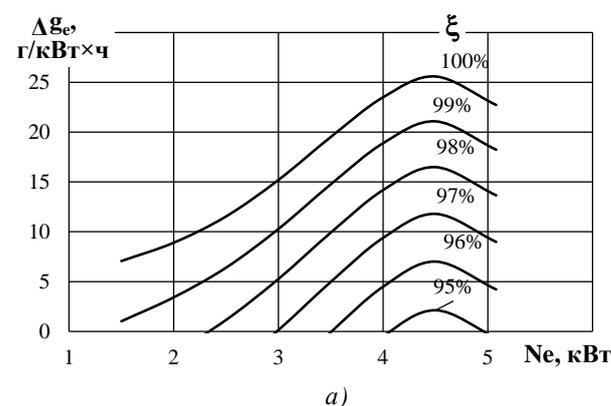


Рис.3. Экономия этанола при работе ИЧ 7,5/6 с термодимической утилизацией теплоты отходящих газов при различной степени конверсии ξ
 а – синтез-газ, полученный по реакции разложения;
 б – синтез-газ, полученный паровой конверсией

Удельный расход этанола при реакции разложения снижается при высоких степенях конверсии $\xi - 95...100 \%$. При условии осуществления 100 % конверсии этанола в синтез-газ, удельный расход этанола снижается во всем диапазоне работы двигателя на 7...26 г/(кВт·ч) (1...5,4 %).

При паровой конверсии, за счет участия воды в процессе получения синтез-газа, удельный расход этанола снижается на 6...126 г/(кВт·ч)

(1..23%), и достигается в широком диапазоне изменения степени конверсии $\xi - 80...100\%$.

При применении паровой конверсии количество энергии, необходимое для получения синтез-газа, превышает теплоту, которая выделяется с отходящими газами на данном режиме работы во всем диапазоне изменения нагрузки двигателя (рис. 4). Без дополнительного источника теплоты применение паровой конверсии этанола на двигателе с ТХУ проблематично.

При применении реакции разложения количество энергии, необходимое для получения синтез-газа δQ_{O_2} , составляет около 40% от теплоты, которая выделяется с отходящими газами на данном режиме работы.

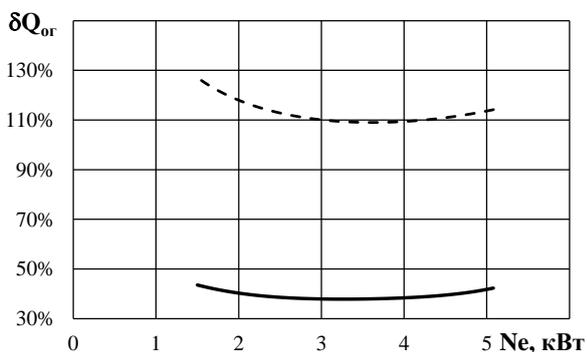


Рис.4. Энергия отходящих газов, которую необходимо утилизировать для получения синтез-газа: в – этанол; _____ – синтез-газ, полученный по реакции разложения; - - - - - синтез-газ, полученный паровой конверсией

Было выполнено исследование влияния температурного напора на эффективность установки с ТХУ при получении синтез-газа по реакции разложения (рис.5).

Установлено, что температурный напор ΔT , при котором достигается экономия этанола Δg лежит в диапазоне 20 - 160 °С.

Определен диапазон работы двигателя с ТХУ по нагрузке при различных значениях температурного напора ΔT и диапазон снижения расхода этанола $\Delta g^{эт}$ (рис.6).

Наибольший диапазон работы двигателя наблюдается при значении температурного напора 20 °С и составляет 25-88 % от номинальной нагрузки (1,4..5,1 кВт), а наименьший при 160 °С – 75-88% (4,1..5,1 кВт).

Определены зависимости доли теплоты отходящих газов, которую необходимо утилизировать для получения синтез-газа δQ_{O_2} от режима нагрузки и температурного напора (рис.7). Предельные значения лежат в диапазоне 38-44%.

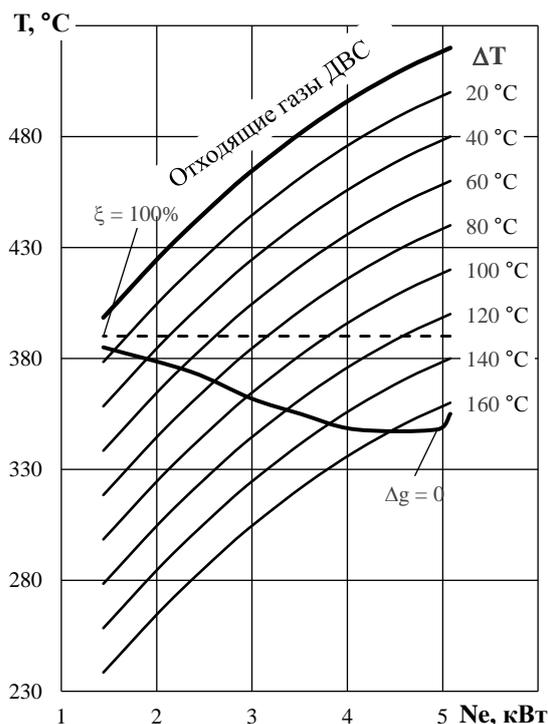


Рис.5. Температурный напор на входе в термохимический реактор

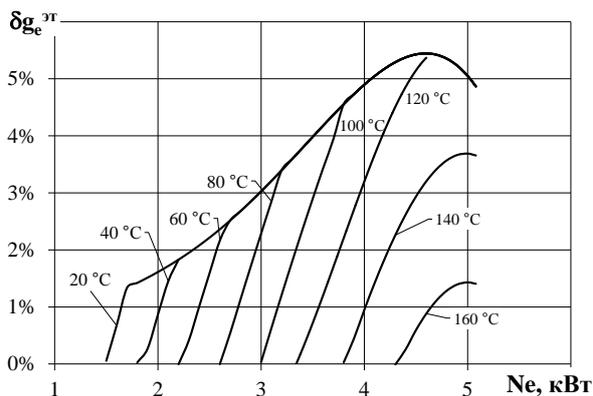


Рис.6. Экономия этанола при различном температурном напоре

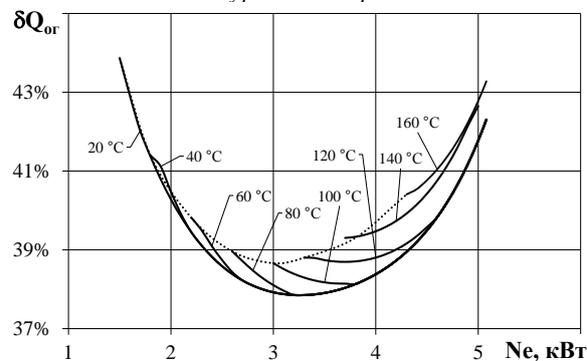


Рис.7. Энергия отходящих газов, которую необходимо утилизировать для получения синтез-газа при различном температурном напоре

Выводы

1. Определены параметры работы двигателя в зависимости от режима нагрузки при работе по нагрузочной характеристике на этаноле и синтез-газах, полученных по реакции разложения и паровой конверсией. Установлено, что при работе на синтез-газах уменьшилась номинальная мощность двигателя - с 5,75 кВт до 5,08 кВт (13%).

2. Установлено, что для ДВС 1С 7,5/6, работающего на этаноле, применение ТХУ теплоты отходящих газов эффективно при конверсии этанола по реакции разложения. Снижение расхода этанола достигается при степенях конверсии – 95...100 % и составляет 6...26 г/(кВт·ч) (1...5,4 %).

3. Определено, что рациональный температурный напор на входе в термохимический реактор лежит в диапазоне 20...160 °С. Диапазон работы двигателя при температурном напоре 20 °С – 25-88 % от номинальной нагрузки, при 160 °С – 75-88%. Доля теплоты отходящих газов, которую необходимо утилизировать изменяется в пределах 38...44 %.

Список литературы:

1. Автомобільні двигуни: Підручник [Текст] / Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов та ін. – К.: Арістей, 2006. – 476 с. 2. Захаров, Г. В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок [Текст] / Г. В. Захаров – М.: ТрансЛит, 2009. – 256 с. 3. 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. 4. 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. 5. Хрипач, Н. А. Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термохимическим 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. 6. 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. 7. Повышение эффективности двигателя 2С 7,2/6, работающего на этаноле с термохимической утилизацией теплоты отходящих газов [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2014. – № 2. – С. 19–23. 8. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. Четырехтактный бензиновый двигатель с воздушным охлаждением Robin Subaru / Fuji Heavy Industries Ltd., Токио, Япония, 2004. – 83 с. 9. Aupretre, F. Hydrogen production for fuel cells from the catalytic ethanol steam reforming [Text] / F. Aupretre, C. Descorme, D. Duprez // Topics in Catalysis. – 2004. – Vol. 30/31. – P. 487–491. 10. Митрофанов, О. С. Підвищення ефективності використання синтез-газу в газопоршневих двигунах : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / О. С. Митрофанов. – Миколаїв, 2014. – 172 с.

Bibliography (transliterated):

1. Avtomobil'ni dviguni: Pidruchnik [Tekst] / F. I. Abramchuk, Ju. F. Gutarevich, K. E. Dolganov ta in. – K.: Aristej, 2006. – 476 s. 2. Zaharov, G. V. Tehnicheskaja jekspluatacija sudovyh dizel'nyh ustanovok [Tekst] / G. V. Zaharov – M.: TransLit, 2009. – 256 s. 3. Nosach, V. G. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija prirodnogo gaza v teploenergetike s pomoshh'ju termohimicheskoj regeneracii [Tekst] / V. G. Nosach, A. A. Shrajber // Promyshlennaja teplotehnika. – 2009. – T.31, №3 – S. 42–50. 4. Kirillov, V. A. Primenenie sintez-gaza v kachestve dobavki k osnovnomu toplivu v transportnyh sredstvax: sostojanie i perspektivy [Tekst] / V. A. Kirillov, N. A. Kuzin, V. V. Kireenkov [i dr.] // Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii. – 2011. – №2(45) – S. 139–154. 5. Hripach, N. A. Termodinamicheskij analiz rabocheho cikla dvigatelja s termohimicheskim generirovaniem vodorodnogo topliva [Tekst] / N. A. Hripach, V. F. Kamenev, V. M. Fomin [i dr.] // Alternativnaja jenergetika i jekologija. – 2006. – №4(36) – S. 45–50. 6. Timoshevskij, B. G. Jefferktivnost' termohimicheskoj konversii uglevodorodnyh topliv primenjaemyh v DVS [Tekst] / B. G. Timoshevskij, M. R. Tkach, A. Ju. Proskurin // Visnik NUK. – 2011. – №3. – S. 36-42. 7. Povyshenie jefferktivnosti dvigatelja 2Ch 7,2/6, rabotajushhego na jetanole s termohimicheskoj utilizaciej teploty othodjashhix gazov [Tekst] / B. G. Timoshevskij, M. R. Tkach, A. Ju. Proskurin, A. S. Mitrofanov, A. S. Poznanskij // Dvigateli vnutrennego sgoranija : Vseukrainskij nauchno-tehnicheskij zhurnal. – 2014. – № 2. – S. 19–23. 8. Rukovodstvo po jekspluataciji i tehnicheskomu obsluzhivaniju. Chetyrehtaktnyj benzinovyj dvigatel' s vozduzhnym ohlazhdeniem Robin Subaru / Fuji Heavy Industries Ltd., Tokio, Japonija, 2004. – 83 s. 9. Aupretre, F. Hydrogen production for fuel cells from the catalytic ethanol steam reforming [Text] / F. Aupretre, C. Descorme, D. Duprez // Topics in Catalysis. – 2004. – Vol. 30/31. – P. 487–491. 10. Mitrofanov, O. S. Pidvishennja efferktivnosti vikoristannja sintez-gazu v gazoporshnevih dvigunah : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.05.03 / O. S. Mitrofanov. – Mikolaiv., 2014. – 172 s.

Поступила в редакцию 31.06.2015 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: 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 инженерной механики и технологии машиностроения Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrey.poznansky@gmail.com.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ ДВИГУНА 1Ч 7,5/6 З ТЕРМОХІМІЧНОЮ УТИЛІЗАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ

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

Представлені результати чисельних досліджень параметрів роботи енергетичної установки на базі поршневого двигуна 1Ч 7,5/6 з термохімічною утилізацією теплоти відпрацьованих газів. Визначено параметри роботи двигуна залежно від режиму навантаження при роботі по навантажувальній характеристиці на етанолі і синтез-газах, отриманих з реакції розкладання і паровою конверсією. Встановлено, що для ДВЗ 1Ч 7,5/6, що працює на етанолі застосування ТХУ теплоти відпрацьованих газів ефективно при конверсії етанолу з реакції розкладання. Зниження витрати етанолу досягається при ступенях конверсії - 95...100 % і становить 6 ... 26 г/(кВт·год) (1 ... 5,4%). Визначено, що раціональний температурний напір на вході в термохімічний реактор лежить в діапазоні 20...160 °С. Частка теплоти відпрацьованих газів, яку необхідно утилізувати змінюється в межах 38...44 %.

EFFICIENCY OF POWER PLANT BASED ON 1 CYLINDER 4-STROKE ENGINE 7,5/6 WITH THERMOCHEMICAL HEAT UTILIZATION OF EXHAUST GASES

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

The numerical studies results of power plant parameters on reciprocating 1 cylinder 4-stroke engine with dimension of 7,5/6 and thermochemical heat recovery system of exhaust gases are presented. The parameters of the engine as a function of load conditions during operation by loading characteristic were defined. Engine was running on ethanol and synthesis gases produced by the decomposition reaction and steam reforming. It is found that for reciprocating 1 cylinder 4-stroke engine with dimension of 7,5/6 with ethanol use TCU waste heat efficiently in the conversion of ethanol decomposition reaction. Reducing consumption of ethanol is achieved at a level of conversion - 95...100 % and is 6 ... 26 g/(kW·h) (1 ... 5.4%). It was determined that a rational temperature difference at the inlet of the thermochemical reactor lies in the range 20...160 °C. Ratio of exhaust gases heat, which must be recycled varies in the range 38...44 %.