

УДК 629.113

Подзноев Г. П., Абдулгасис У. А., Курдюков А. О.

**ТЕРМОДИНАМИКА КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ВОДОЙ МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Аннотация.* Проведены термодинамические исследования возможности использования теплоты отработавших газов газотурбинного двигателя для предварительного каталитического риформинга эмульгированного водой моторного топлива в теплообменном реакторе. Расчетным путем установлены основные технологические и параметрические характеристики химической трансформации

моторного топлива за счет теплоты отработавших газов. Полученные результаты свидетельствуют о термодинамической возможности значительного повышения энергопотенциала продуктов риформинга при снижении расхода углеводородного топлива.

**Ключевые слова:** термодинамика газотурбинного двигателя, теплота отработавших газов, вододоземальгированное моторное топливо, каталитический риформинг.

Подзноев Г. П., Абдулгазис У. А., Курдюков О. О.

## ТЕРМОДИНАМІКА КАТАЛІТИЧНОГО РИФОРМІНГУ ЕМУЛЬГОВАНОГО ВОДОЮ МОТОРНОГО ПАЛИВА ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

**Анотація.** Проведено термодинамічні дослідження можливості використання теплоти відпрацьованих газів газотурбінного двигуна для попереднього каталітичного риформінгу емульгованого водою дизельного палива в теплообмінному реакторі. Розрахунковим шляхом встановлено основні характеристики хімічної трансформації суміші дизельного палива й води при термічному впливі на нього теплової енергії. Отримані результати свідчать про термодинамічні можливості значного підвищення енергопотенціалу продуктів риформінгу, що дозволяє істотно знизити витрату вуглеводневої складової автомобільного палива.

**Ключові слова:** термодинамика газотурбінного двигуна, теплота відпрацьованих газів, вододоземальгированное моторное топливо, каталитический риформинг.

Podznoev G. P., Abdulgazis U. A., Kurdyukov A. O.

## THERMODYNAMICS OF CATALYTIC REFORMING OF EMULSIFIED WATER MOTOR FUEL FOR GAS TURBINE ENGINE

**Summary.** A thermodynamic study of the possibility of using the exhaust heat of the gas turbine engine for pre-catalytic reforming water of emulsified diesel fuel in the heat exchanger reactor is held. By calculation the basic technological and parametric characteristics of chemical transformation of motor fuel and water mixture by the heat of the thermal energy is ascertained. The results suggest the thermodynamic possibility of a significant increase in the thermodynamic energy potential of reformat while reducing hydrocarbon fuels.

Thus the authors proposed the schematic diagram of a gas turbine plant with heat exchanger catalytic reactor in which, apart from the exhaust heat recovery, thermochemical reforming water-fuel emulsions extracting hydrogen to the free phase occur, thereby increasing the power consumption of reformat.

**Key words:** thermodynamics of gas turbine engine, exhaust heat, water-emulsified fuel engine, catalytic reforming.

**Постановка проблемы.** В настоящее время особенно остро стоят проблемы экологичности и экономичности автотранспортных средств, обусловленных в основном низким коэффициентом использования теплоты (35–40%) и высоким уровнем выбросов в атмосферу токсичных отработанных газов на фоне связываемого с этим нарушения теплового баланса планеты и неуклонного истощения природных ресурсов углеводородного топлива.

**Анализ литературы.** В последнее время предлагается много технических и технологических решений повышения эффективности использования моторных топлив, касающихся в основном поршневых двигателей внутреннего сгорания. В то же время технологически более эффективными являются газотурбинные двигатели (ГТД), позволяющие прямое преобразование тепловой энергии в электрическую без сложной и энергозатратной системы трансформации возвратно-поступательного движения во вращательное движение ведущего вала привода

автомобиля. Это позволяет значительно упростить механизм привода и управления автомобилем.

В 50-е годы ряд европейских фирм и крупнейших американских концернов приступили к разработке специальных автомобильных газотурбинных двигателей. В 1950 г. первый газотурбинный автомобиль фирмы Ровер прошел дорожные испытания, а с 1950 по 1960 гг. проходили усиленные поиски оптимальных конструктивных решений и отработкой различных экспериментальных образцов двигателей в дорожных условиях. Сейчас работы по созданию газотурбинных автомобилей проводят практически все крупные автокомпании мира.

С 1955 года на Горьковском автомобильном заводе [1] велись работы по созданию газотурбинного двигателя и в 1956 году были изготовлены первые макетные образцы ГТД ГАЗ-99 мощностью 130 л.с. Но созданные образцы обладали низкой топливной экономичностью. В 1962 году был создан первый в СССР полностью ра-

ботоспособный двигатель ГАЗ-99Б мощностью 175 л.с. Было изготовлено три образца, прошедших испытания на стенде, включая 100-часовые ресурсные. По результатам испытаний получен минимальный удельный расход моторного топлива 320 г/л.с.ч. В 1977 году был разработан и утвержден технический проект унифицированного семейства АГТД ГАЗ, включающего две модели: 902.10 мощностью 380 л.с. и 903.10, развивающий 600 л.с.

В целом ГТД имеют некоторые преимущества [2].

1. Масса и габариты заметно меньше и в ряде моделей она не превышает 25–30% массы объема поршневого двигателя соответствующей мощности. Наряду с повышением грузоподъемности автомобиля сокращение массы двигателя позволяет облегчить подмоторную раму и упростить монтаж силовой установки, а уменьшение габаритов упрощает его компоновку.

2. Топливом может служить любое более дешевое топливо с незначительной регулировкой системы питания при переходе с одного вида топлива на другой.

3. Мощность в одном агрегате может быть поднята практически до любой необходимой для транспортных установок величины при вполне приемлемых размерах и массе.

4. Присущее газотурбинным установкам повышение мощности при низких температурах положительно сказывается на работе в холодное время года.

5. Кривая момента в функции числа оборотов при наличии свободной силовой турбины протекает весьма благоприятно: наибольший момент соответствует заторможенному положению ротора силовой турбины при трогании машины с места. Это позволяет в несколько раз сократить число передач в трансмиссии, а в ряде случаев для легковых автомобилей полностью исключить коробку передач и сцепление. При этом заметно облегчается управление автомобилем.

6. Конструкция ГТД заметно проще, поскольку число рабочих элементов двухвального двигателя в 4–6 раз меньше, чем у традиционного шестицилиндрового карбюраторного двигателя.

7. Особенно важным преимуществом ГТД является непрерывный режим горения при невысоком давлении, что обеспечивает спокойную работу двигателя на любых числах оборотов и существенно упрощает систему регулировки подачи топлива. Отсутствие крутильных колебаний благоприятно сказывается на работе трансмиссии.

8. Большой межремонтный пробег, который обеспечивается вследствие устранения трущихся частей и малыми нагрузками на подшипники.

9. Выпускные газы ГТД менее токсичны, поскольку из-за большого избытка воздуха не образуется моноокись углерода.

10. Для пуска двигателя при низкой температуре воздуха не требуется разогрев масла. Подача масла на подшипники при правильно выбранной его консистенции обеспечивается при любой температуре атмосферного воздуха. Время приема нагрузки определяется только термическими напряжениями в деталях независимо от температуры масла.

11. Малая масса и небольшие размеры газотурбинных двигателей наряду с возможностью получения большой мощности в одном агрегате и дистанционным управлением позволяют использовать их на большегрузных многоприводных автопоездах с активными прицепами, поскольку в этом случае применяют электротрансмиссии, а наиболее удобным приводом генератора служит более простая и надежная одновальная турбина.

12. Весьма важно, что для газовой турбины не имеет большого значения выбор топлива, качество которого не регламентируется ни октановыми, ни метановыми числами.

Характеризуя газовую турбину, прежде всего следует отметить, что она, как и паровая турбина, может развивать большие обороты. Это дает возможность получать значительную мощность от гораздо меньших по размерам (по сравнению с поршневыми двигателями) и почти в 10 раз более легких по весу двигателей.

Однако, наряду с немалыми достоинствами, газотурбинные двигатели имеют и ряд существенных недостатков [3], которые в какой-то степени объясняют отсутствие серийного выпуска газотурбинных автомобилей. Главный из них – низкий КПД, что обусловлено существенно меньшим тепловым перепадом в рабочем процессе по сравнению с поршневым двигателем. В последнем, благодаря пульсирующему принципу работы, температура достигает 2500°C (а иногда и выше), в то время как температура поршня, как правило, ниже 600°C. Допустимая же по условиям прочности материалов максимальная температура газов перед турбиной компрессора ГТД 900–1180°C, что значительно ниже, чем в камере сгорания поршневого двигателя (1700–1800°C).

Кроме этого, разработанные газотурбинные двигатели рассчитаны на использование углеводородного топлива, что в целом уравнивает их с поршневыми по влиянию на экологический и тепловой баланс природной среды и не снимает зависимость от ресурсной базы углеводородов с ее неуклонным сокращением и неизменным удорожанием.

Таким образом, по многим важным показателям ГТД имеет ключевые преимущества:

- вращательное движение вала является по существу единственным видом движения в газовой турбине;
- газотурбинные двигатели не требуют специальной системы охлаждения;
- высокий ресурс и надежность газотурбинного двигателя;
- газотурбинные автомобили не требуют сложных трансмиссий с коробками передач.

В этом случае основной путь совершенствования ГТД должен идти в направлении получения дополнительной энергии из традиционных источников, максимизации коэффициента полезного использования теплоты и, как следствие, улучшения экологических характеристик действующих и снижения расхода топливно-смазочных материалов. Особое внимание привлекает возможность рационального использования теплоты отработавших газов, которая превышает количество теплоты на совершение полезной работы. Кроме этого, просматривается перспективный вариант трансформации моторного топлива на борту автомобиля с использованием теплоты отработавших газов в более эффективный синтез-газ с повышенным энергопотенциалом [3–6].

**Цель статьи** – описание термодинамического моделирования каталитического риформинга эмульгированного водой моторного топлива с использованием теплоты отработавших газов и их последующего сжигания в газотурбинной установке для получения электроэнергии.

**Изложение основного материала.** В задачу исследований входило определение термодинамических параметров и характеристик газотурбинного цикла, которые, как и в обычных циклах поршневых двигателей, определяются начальной температурой, степенью сжатия ( $\epsilon$ ), показателем адиабаты ( $k$ ) и степенью предварительного расширения в процессе сгорания синтез-газа. Также оценивалась зависимость рассчитанных значений параметров (температуры и давления), термического КПД ( $\eta$ ) и совершаемой работы ( $A$ ) от квоты добавочной воды, степени сжатия, и энергетического баланса цикла. Последний складывался из части теплоты отработавших газов, затрачиваемой на каталитический риформинг ( $Q_{\text{риф}}$ ), теплосодержания синтез-газа после риформера ( $Q_{\text{син-газ}}$ ), теплоты сгорания ( $Q_{\text{сгор}}$ ) синтез-газа в камере сгорания.

Подобная система, помимо рекуперации теплоты отработавших газов двигателя, позволяет за счет термохимического риформинга водотопливной эмульсии моторного топлива извлечь водород из воды в свободную фазу, повышая тем самым энергоемкость продуктов риформинга.

Моторное топливо и вода подаются отдельно в смеситель-эмульгатор, откуда эмульгированная фаза поступает во вход насоса высокого давления, подающего смесь в трубчатый теплообменник с катализатором.

Принципиальная схема газотурбинного двигателя с подводом теплоты при постоянном давлении основана на следующей последовательности операций (рис. 2).

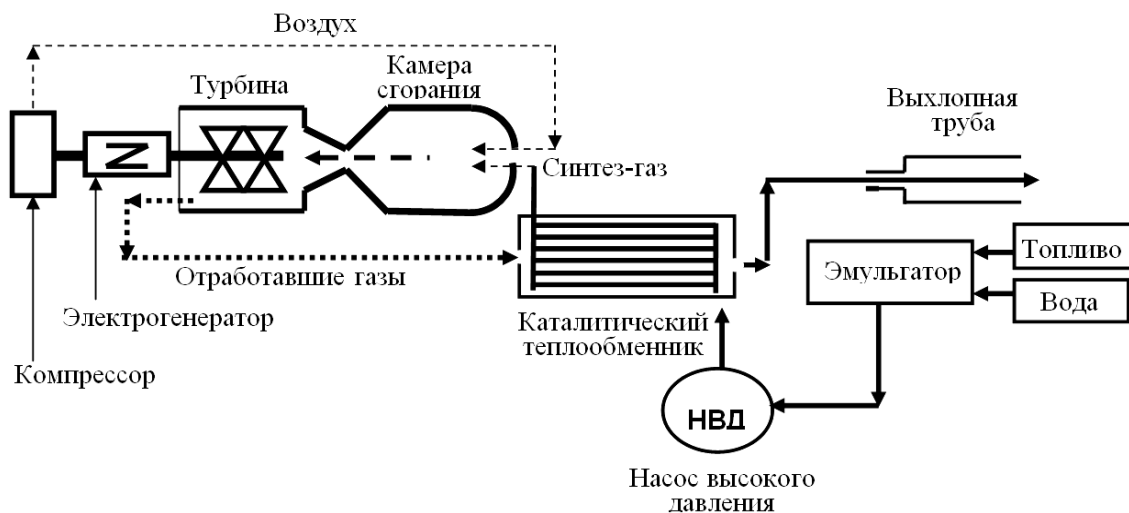


Рис. 2. Принципиальная схема газотурбинного двигателя с теплообменным каталитическим реактором.

В камеру сгорания через форсунки поступает воздух от осевого компрессора и синтез-газ из каталитического риформера. Из камеры сгорания горячие газы через комбинированные сопла направляются на лопатки газовой турбины с последующим выходом в теплообменник каталитиче-

ского риформера. Вращение вала турбины передается осевому компрессору и электрогенератору и далее тяговому электродвигателю. Отработавшие газы после турбины охлаждаются с передачей остаточного тепла оборотной воде для эмульгирования моторного топлива.

Топливный насос, также приводимый в движение от вала турбины, нагнетает эмульгированное топливо в каталитический теплообменник – риформер с катализатором для генерирования синтез-газа.

**Расчет термокаталитического реактора**

Время катализа – 3 мин.

Исходные продукты (масса):

$$C_{15}H_{32} - 0,005 \text{ г} \cdot 2000 \text{ мин}^{-1} \cdot 3 \text{ мин} = 30 \text{ г.}$$

$$H_2O - 0,00638 \text{ г} \cdot 2000 \text{ мин}^{-1} \cdot 3 \text{ мин} = 38,28 \text{ г.}$$

Исходные продукты (объем):

$$C_{15}H_{32} - 30 \text{ г} : 0,8 \text{ г/см}^3 = 37,5 \text{ см}^3;$$

$$H_2O - 38,28 \text{ г} : 1,0 \text{ г/см}^3 = 38,0 \text{ см}^3;$$

$$\Sigma = 75,5 \text{ см}^3 \text{ за } 3 \text{ мин при частоте вращения коленчатого вала } n = 2000 \text{ мин}^{-1}.$$

Объем прокачки через насос высокого давления:  
 $75,5 \text{ см}^3 / 3 \text{ мин} = 25 \text{ см}^3/\text{мин} (1500 \text{ см}^3/\text{час})$  жидкой фазы.

Объем конечных продуктов:

$$(CO + H_2) = 0,008651 + 0,017772 = 0,026423 \text{ дм}^3.$$

При 298°K и  $1 \times 10^5 \text{ Па}$  за цикл 0,06207 дм<sup>3</sup>;  
 при 700°K и  $1 \times 10^5 \text{ Па}$  за цикл 1,24 см<sup>3</sup>;  
 при 700°K и  $50 \times 10^5 \text{ Па}$  за цикл 0,06207 м<sup>3</sup>.  
 Тогда при  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$  за 3 мин объем конечных продуктов составит 372,4 дм<sup>3</sup>.

Объем ресивера после реактора:

$$7,45 \text{ дм}^3 \text{ при } 700^\circ\text{K и } 50 \times 10^5 \text{ Па на } 3 \text{ мин.}$$

Объем катализатора Нихром X20H80:

Ni (73–78%); Cr (19–21%); Si (1%); Mn (0,7%);  
 Fe (проволока) – 75,5 см<sup>3</sup>.

Всего объем реактора:

$$75,5 \text{ см}^3 + 75,5 \text{ см}^3 = 151 \text{ см}^3.$$

Расчет внутреннего диаметра реактора при  $l = 30 \text{ см}$ :

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot l;$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot l}} = \sqrt{\frac{151 \text{ см}^3}{3,14 \cdot 30 \text{ см}}} = \sqrt{1,603 \text{ см}^2} = 1,27 \text{ см};$$

$$d = 2,54 \text{ см.}$$

Расчет внутреннего диаметра теплообменника при зазоре канала для прохода газов, равном 1,5 см:

$$D = 2,54 + 3,0 = 5,54 \text{ см.}$$

Риформинг исходных продуктов протекает с поглощением тепла отработавших газов, которое затрачивается на разрыв связей между атомами молекулы. Кроме этого, часть теплоты расходуется также на испарение сырья и нагрев его до рабочей температуры каталитического риформинга.

В идеальном варианте парового риформинга топлива образуется синтез-газ. В зависимости от условий проведения риформинга процесс может осуществляться по двум основным направлениям:

- 1) неполный риформинг:  
 $C_{15}H_{32} + 15H_2O + Q\text{-катализ} = 15CO + 31H_2;$
- 2) полный риформинг:  
 $C_{15}H_{32} + 30H_2O + Q\text{-катализ} = 15CO_2 + 62H_2.$

Получаемый синтез-газ состоит в идеализированном процессе практически только из водорода и монооксида (диоксида) углерода с более высокой теплотой сгорания в сравнении с исходными углеводородами, повышенным октановым и цетановым числами и более чистым выхлопом при его сгорании.

Для сравнительного термодинамического анализа принята единичная квота дизельного топлива в 0,2; 0,15 и 0,1 г на один рабочий цикл идеализированного газотурбинного цикла с объемом камеры сгорания 3,0 дм<sup>3</sup>.

Из приведенных в табл. 1–4 расчетов следует, что при одинаковых значениях давления и температуры на входе в камеру сгорания их величина прямо зависит от количества подаваемого синтез-газа. При этом для варианта полного риформинга температура выше, чем для варианта неполного риформинга. Соответственно отмеченной зависимости изменяются коэффициент полезного действия и совершаемая работа.

Таблица 1.

Стехиометрический расчет материального баланса неполного риформинга моторного топлива.

	Исходные продукты			Конечные продукты		
	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	15H <sub>2</sub> O (жидкость)	Σ	15CO	31H <sub>2</sub>	Σ
Мольная масса, г	212	270	482	420	62	482
Масса топлива, г (по вариантам)	0,2	0,2547	0,4547	0,3962	0,0585	0,4547
	0,15	0,1910	0,3410	0,2971	0,439	0,3410
Моли, μ (по вариантам)	0,000943	0,01415	0,015093	0,01415	0,02925	0,04547
	0,00071	0,010610	0,011317	0,01061	0,02195	0,03256
	0,000472	0,00708	0,00755	0,007075	0,0146	0,021675
(ΔH <sub>кон</sub> – ΔH <sub>исх</sub> )·μ				+2814,0 Дж / 0,2 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> +2110,32 Дж / 0,15 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> +1406,98 Дж / 0,1 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>		

Таблица 2.

Стехиометрический расчет материального баланса сгорания продуктов неполного риформинга дизтоплива.

		15CO	31H <sub>2</sub>	23O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Σ	15CO <sub>2</sub>	31H <sub>2</sub> O (газ)	N <sub>2</sub>	Σ
Мольная масса, г		420	62	736		1218	660	558		1218
Масса, г	0,2	0,39623	0,05849	0,69435	2,25595	3,40502	0,62265	0,52642	2,25595	3,40502
	0,15	0,29717	0,04387	0,52076	1,69195	2,55375	0,46698	0,39481	1,69195	2,55374
	0,1	0,19811	0,02925	0,34716	1,12793	1,70245	0,31132	0,26320	1,12793	1,70245
Объем, дм <sup>3</sup>	0,2	0,34602	0,71100	0,53040	1,97007	3,55749				
	0,15	0,25951	0,53328	0,39780	1,47754	2,66813				
	0,1	0,17301	0,35556	0,26520	0,98500	1,77877				
Моли, μ	0,2	0,01415	0,02925	0,02170	0,08057	0,14670	0,01415	0,02925	0,08057	0,12397
	0,15	0,01061	0,02194	0,01623	0,06043	0,10921	0,01061	0,02194	0,06043	0,09298
	0,1	0,007078	0,01463	0,01085	0,04028	0,07284	0,007078	0,01463	0,04028	0,061988
$(\Delta H_{\text{кон}} - \Delta H_{\text{исх}})\mu$		+2814,0 Дж / 0,2 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> +2110,32 Дж / 0,15 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> +1406,98 Дж / 0,1 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>								

Таблица 3.

Стехиометрический расчет материального баланса полного риформинга дизтоплива.

		C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	30H <sub>2</sub> O (жидкость)	Σ	15CO <sub>2</sub>	46H <sub>2</sub>	Σ
Мольная масса, г		212	540	752	660	92	752
Масса, г	0,2	0,5094	0,7094	0,7094	0,6226	0,0868	0,7094
	0,15	0,3821	0,5321	0,5321	0,4670	0,0651	0,5321
	0,1	0,2547	0,3547	0,3547	0,3113	0,0434	0,3547
Моли, μ	0,0009434	0,0283	0,0292	0,0292	0,01415	0,0434	0,05755
	0,0007075	0,02123	0,0219375	0,0219375	0,01061	0,03255	0,04316
	0,0004717	0,01415	0,0146217	0,0146217	0,007075	0,0217	0,028775
$(\Delta H_{\text{кон}} - \Delta H_{\text{исх}})\mu$		+2853,87 Дж / 0,2 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> +2140,25 Дж / 0,15 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> +1426,93 Дж / 0,1 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>					

Таблица 4.

Стехиометрический расчет материального баланса сгорания синтез-газа продуктов полного риформинга дизтоплива.

		15CO <sub>2</sub>	46H <sub>2</sub>	23O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Σ	46H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	15CO <sub>2</sub>	Σ
Мольная масса, г		660	92	736		828	828			828
Масса, г	0,2	0,62264	0,08679	0,69434	2,25593	3,65970	0,78113	2,25593	0,62264	3,65970
	0,15	0,46698	0,06509	0,52075	1,69193	2,74475	0,58585	1,69193	0,46698	2,74476
	0,1	0,31132	0,04340	0,34717	1,12796	1,82985	0,39057	1,12796	0,31132	1,82985
V	0,2	0,34379	1,05501	0,53040	1,97006	3,89926				
	0,15	0,25784	0,79122	0,39780	1,47753	2,92439				
	0,1	0,17190	0,52757	0,26520	0,98503	1,94970				
Моли, μ	0,2	0,01415	0,04340	0,02167	0,08057	0,15983	0,04340	0,08057	0,01415	0,13812
	0,15	0,01061	0,03255	0,01627	0,06043	0,11986	0,03255	0,06043	0,01061	0,10359
	0,1	0,007075	0,02170	0,01085	0,04028	0,08090	0,02170	0,04028	0,007075	0,069055
$\Delta H$		-10494,7 Дж / 0,2 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> -7871,9 Дж / 0,15 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> -5247,9 Дж / 0,1 г C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>								

Из расчетов также следует, что при неполном риформинге дизтоплива требуется ввод в систему 2814,0 Дж внешней теплоты на единственный заряд 0,2 г C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>, а при полном – 2853,87 Дж. Тепловой же эффект сгорания продуктов неполного риформинга 0,2 г C<sub>15</sub>H<sub>32</sub> составляет 11078,3 Дж, а при полном риформинге – 10495,9 Дж, что выше теплоты сгорания адекватного количества по массе исходного дизтоплива (8882,1 Дж), соответственно, на 12,4% и 11,8%.

Кроме этого, следует также учитывать, что синтезируемый в процессе термориформинга синтез-газ будет выходить из каталитического теплообменного реактора при температуре, близкой к таковой отработавших газов (условно принятой для расчетов 750°K). Адекватное этому теплосодержание риформингового синтез-газа в варианте неполного риформинга (CO + H<sub>2</sub>) для варианта 0,2 г составит +516,2 Дж, для 0,15 г – +384,2, для 0,1 г – +255,8 Дж. Для полного ри-

форминга ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ ) эти значения составят, соответственно, +758,4 Дж на квоту 0,2 г, +536,9 Дж на квоту 0,15 г и +382,3 Дж на квоту 0,1 г. Таким образом, в процесс привносится дополнительная внешняя теплота, суммируемая с теплотой сгорания синтез-газа.

Учитывая, что в рассмотренном цикле теплота отработавших газов не сбрасывается в окружающее пространство, а продолжает участвовать в формировании теплового баланса цикла, то завершающей стадией последнего следует считать вывод отработавших газов после каталитического риформера с существенно более низкими тепловыми температурными характеристиками.

В этом случае в определении коэффициента полезного действия цикла частное от деления выводимой теплоты к вводимой будет меньше и, соответственно, КПД будет выше.

Таким образом, снимается основной недостаток традиционных газотурбинных двигателей относительно низкого термического КПД в сравнении с поршневыми двигателями.

Обобщенные результаты термодинамического анализа идеализированного газотурбинного цикла с предварительным каталитическим термориформингом эмульгированного водой дизельного топлива с использованием теплоты отработавших газов сведены в табл. 5.

Таблица 5.

Параметрические характеристики вариантов идеального термодинамического цикла газотурбинной установки с предварительным термокаталитическим риформингом моторного топлива.

Параметры цикла*	Неполный каталитический риформинг 0,2г $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$	Неполный каталитический риформинг 0,15 г $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$	Неполный каталитический риформинг 0,1 г $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$	Полный каталитический риформинг 0,2 г $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$	Полный каталитический риформинг 0,15 г $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$	Полный каталитический риформинг 0,1 г $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$
$Q_{\text{риф}}$ , Дж	-2814,0	-2110,32	-1406,98	-2853,87	-2140,25	-1426,93
$Q_{\text{син-газ}}$ , Дж	+516,2	+384,2	+255,8	+758,4	+536,9	+383,2
$Q_{\text{сгор}}$ , Дж	11078,27	8311,02	5533,09	11253,05	8408,79	5630,23
$Q_1$ , Дж	11594,47	8695,22	5788,9	11253,1	8408,8	5631,1
$P_{2,3}$ , $\times 10^5$ Па	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
$T_2$ , К	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
$T_3$ , К	3049,9	3052,2	3048,8	2767,1	2759,4	2769,0
$P_4$ , $\times 10^5$ Па	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$T_4$ , К	1195,0	1196,0	1194,7	1086,5	1086,2	1093,5
$Q_2$ , Дж	3860,1	2898,4	1929,6	3788,9	2848,1	1922,9
$\eta$	0,603	0,608	0,608	0,608	0,606	0,605
$A$ , Дж	7061,0	5286,7	3519,65	6841,9	5095,7	3406,8

\*Примечания:  $Q_{\text{риф}}$  – теплота, расходуемая на риформинг эмульгированного водой моторного топлива;  
 $Q_{\text{син-газ}}$  – теплосодержание синтез-газа после риформинга;  
 $Q_{\text{сгор}}$  – теплота сгорания синтез-газа;  
 $Q_1$  – теплота, введенная в адиабатный процесс;  
 $P_2$  – давление адиабатного сжатия топливной фазы перед сгоранием;  
 $P_3$  – давление изобарного сгорания топливной фазы;  
 $P_4$  – давление на лопатках турбины в конце адиабатного расширения;  
 $T_2$  – температура топливной фазы на входе в камеру сгорания;  
 $T_3$  – температура газовой фазы на выходе из камеры сгорания;  
 $Q_2$  – теплосодержание отработавших газов перед риформингом;  
 $\eta$  – термодинамический коэффициент полезного действия цикла;  
 $A$  – работа, проделанная рабочим телом на лопатках турбины.

### Выводы.

1. Включение в систему энергопривода автомобиля предварительного термокаталитического риформинга существенно улучшает термодинамику процесса. При этом исходное моторное топливо трансформируется в синтез-газ, характеризующийся более высоким потенциальным теплосодержанием вследствие выделения химически связанного водорода воды в самостоятельную газовую фазу.

2. Расчеты свидетельствуют, что теплоты отработавших газов достаточно для проведения ка-

талитического риформинга эмульгированного топлива. При этом часть теряемой теплоты возвращается в цикл, повышая тем самым общую теплоту, вводимую в процесс.

3. Характер и качества получаемого при каталитическом риформинге энергоносителя (синтез-газа) мало пригодны для использования в циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания ввиду наличия в его составе легко воспламеняющегося водорода (для цикла Отто на стадии адиабатного сжатия топливной смеси) и необходимости использования высокого давления

на компрессию газовой фазы при ее введении в камеру сгорания (для цикла Дизеля после адиабатного сжатия воздуха).

4. Использование предварительного каталитического риформинга топлива на борту автомобиля позволит:

- на 20–25% снизить расход топлива при сохранении количества полезной работы двигателя;
- улучшить процесс газосмешения и кинетику сгорания;
- снизить выбросы  $\text{CO}_2$  в окружающую среду и полностью исключить выбросы монооксида углерода.

На следующем этапе исследовательских работ планируется разработка экспериментального стенда для оптимизации режимов совмещенной работы всех узлов схемы риформинга и газотурбинной установки по основным технологическим характеристикам и параметрам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Газогенераторная техника в разных странах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://alternativenergy.ru/knigi/002/233-gazifikaciya-tverdyh-topliv-ch-4.html>.
2. Продукты газификации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://auto-dnevnik.com/docs/index-2603.html>.
3. Древесный уголь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://charcoal.mybb.ru/viewtopic.php?id=153>.
4. Сравнительный анализ: методы получения синтез-газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://uchil.net/?cm=106356>.
5. Получение водосодержащего газа на борту и использование его в ДВС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.istc.ru/ISTC/ISTC.nsf/va\\_WebResources/.../\\$File/gazel.RUS.pdf](http://www.istc.ru/ISTC/ISTC.nsf/va_WebResources/.../$File/gazel.RUS.pdf).
6. Корабельников А. В. Химическая регенерация тепла и преобразования топлива в энергетических установках [Электронный ресурс] / А. В. Корабельников, А. В. Куранов, С. С. Рыжиков. – Режим доступа : <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2006-10-12-002.pdf>.