

УДК 621.436

**М.Р. ТКАЧ, Б.Г. ТИМОШЕВСКИЙ***Национальный университет кораблестроения им. адм. С.О. Макарова, Николаев, Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ГТД МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА АЛЬТЕРНАТИВНОМ ТОПЛИВЕ**

На базе созданного стенда ГТД-14-АТ исследованы теплотехнические и экологические показатели автономного турбогенератора на топливе, полученном из полимерного сырья и дизельном (Л02-40) топливе. Выявлена идентичность значений КПД, расходов воздуха и топлива, температуры на выхлопе. Содержание  $CO$  и в отходящих газах изменяется на 1...4%, а  $NOx$  – на 1...3 *ppm*.

**альтернативное топливо, газотурбинный двигатель, экологические показатели, турбогенератор****1. Постановка проблемы**

Исследованиям показателей газотурбинных двигателей (ГТД) на альтернативных топливах различного происхождения – спирты, синтетические топлива из угля, древесины и их смеси с традиционным топливом – посвящены исследования отечественных ученых, зарубежных лабораторий и институтов [1 – 3].

Вместе с тем, в литературе отсутствуют данные по работе газотурбинных двигателей на топливе, получаемом из отходов полимерного сырья. Альтернативные топлива, получаемые из отходов полимерного сырья (АТ) характеризуются технико-химическими свойствами, несколько отличающимися от таковых для топлив нефтяного происхождения.

Степень различия определяются сырьем и технологическим процессом получения АТ. Приведенные ниже показатели даны для АТ, полученного в лабораторных условиях [4], в сравнении с дизельным – Л02-40 по ДСТУ 3868 (табл. 1).

**Цель исследования:** создание экспериментального стенда с компьютеризированной системой измерений; исследование теплотехнических и экологических показателей ГТД малой мощности при работе на различных топливах.

**2. Решение проблемы**

**2.1. Экспериментальный стенд.** Исследование характеристик ГТД на жидких альтернативных углеводородных топливах выполнено на специально созданном стенде ГТД-14-АТ на базе вспомогательного ГТД АИ-8, основные показатели которого приведены в табл. 2.

Таблица 1

Основные технико-химические показатели топлив

Показатели		Величина		
Вид топлива		Альтернативное	Дизельное	
Фракционный состав, масс %	Диапазон температур выкипания, (Т-273) К	49...190	38,9	3...4
		190...353	56,1	80...83
		Свыше 353	5,0	13...17
Структурно-групповой состав, масс %	Углеводороды	Парафиновые	40,1	49...52
		Моноолефиновые	48,8	35...29
		Диеновые и ароматические	11,1	14...19
Кинематическая вязкость при Т=293 К, мм <sup>2</sup> /с		2,88	3,2	
Плотность при Т=293 К, кг/м <sup>3</sup>		729	840	
Температура выкипания 50% (Т <sub>50</sub> – 273), К		230...240	280	
Удельная низшая теплота сгорания, МДж/кг		43,1	42,0	

Стенд оборудован штатной системой дистанционного управления, штатными измерительными приборами, контрольно-измерительными приборами и системой первичных датчиков для обеспечения автоматизации проведения эксперимента и обработки данных (рис. 1).

Таблица 2

Основные показатели ГТД АИ-8[5]

Мощность на клеммах генератора, кВт	
Номинальная длительная	14,0
Максимальная кратковременная	60,0
Частота вращения генератора, об/мин	6000...7000
Напряжение (при номинальной мощности), В	24,3...29,7
Количество топливных форсунок	6
Давление топлива перед форсунками не более, МПа	3,6
Давление топлива на входе в ГТД, МПа	0,08...1,3
Частота вращения турбокомпрессора, тыс. об/мин	26,0...37,0
Частота вращения свободной турбины, тыс. об/мин	24,0...28,0
Температура отходящих газов не более, К(°C)	(1053) 780

Топливо из основной цистерны 1, выполненной в виде двух независимых секций для различных видов топлива, подается подкачивающим насосом шестеренного типа 2, через топливный фильтр типа ММЗ-50Л 3, турбинные преобразователи расхода ТПР5 или ТПР2-4 в топливную систему ГТД. Расходная характеристика каждого из турбинных преобразователей расхода подобрана таким образом, что верхний предел измерений датчика ТПР2 ( $16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ) несколько превышает нижний предел измерений датчика ТПР5 ( $12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Установка датчиков давления, температуры, частоты вращения проведена с использованием штатных штуцеров и приводов для их присоединения. Значения температур воздуха в расчетных сечениях преобразуются в электрический сигнал термоэлектрическими преобразователями (градуировки ХК(L) или ХА(K) по ГОСТ 6616), а значения избыточного давления – тензоэлектрическими датчиками "Сапфир 22Д". Данные поступают в компьютеризиро-

ванную систему измерения и регистрации данных КСИРД-2-256. Оценка максимальной погрешности измерений статических параметров дает следующие значения: температура – 0,5 К; давление – 0,5% и веса (силы) – 0,25% верхнего предела измерений. Данные показатели близки к минимальным достижимым значениям при технических измерениях.

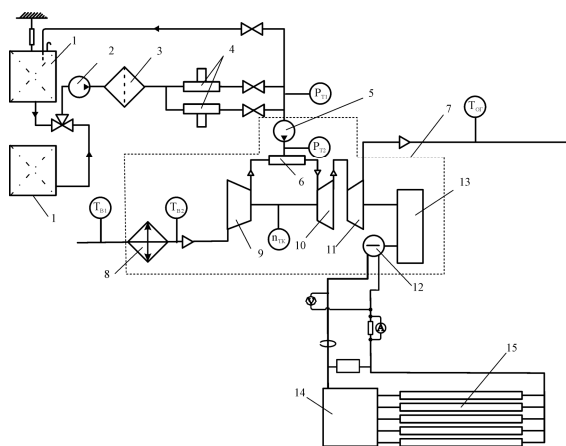


Рис. 1. Стенд ГТД-14-АТ для исследования характеристик ГТД на жидких углеводородных топливах:

- 1 – расходная топливная цистерна; 2 – подкачивающий электронасос; 3 – фильтр грубой очистки; 4 – турбинный преобразователь расхода; 5 – топливный насос-регулятор; 6 – камера сгорания; 7 – ГТД АИ-8; 8 – охладитель масла; 9 – компрессор; 10 – турбина компрессора; 11 – турбина генератора; 12 – генератор; 13 – редуктор; 14 – система управления нагрузкой; 15 – нагрузка

**2.2. Система измерений.** Состав и компоненты продуктов сгорания тепловых двигателей определяются измерительной системой на базе Testo 354/454 (рис. 2). Измерение концентрации компонентов осуществляется сенсорами компонентов 7. Забор пробы на анализ осуществляется из магистрали отходящих газов 1 объемным насосом 8 посредством пробоотборного зонда 2 через блок пробоподготовки, включающий в свой состав охладители 3 и фильтр 4 (рис. 2). Сигналы сенсоров компонентов 7 поступают в блок обработки 9 и, посредством интерфейсного кабеля RS232 и платы согласования 10 передаются в ПЭВМ. Элементы системы выполнены из стали 12Х18Н9Т – не оказывающей каталитического воздействия на исследуемые компоненты про-

дуктов сгорания. Основные характеристики измерительной системы Testo 354/454 по компонентам: кислород ( $O_2$ ) – 0...25 объемных % с погрешностью 0,2%; углерода оксид ( $CO$ ) – 100...2000 ppm с погрешностью 5%; азота оксид ( $NO$ ) 0...3000 ppm с погрешностью 5%; азота диоксид ( $NO_2$ ) 0...500 ppm с погрешностью 5%; серы диоксид ( $SO_2$ ) 0...5000 ppm с погрешностью 5%. Время установления параметров не превышает 40 с.

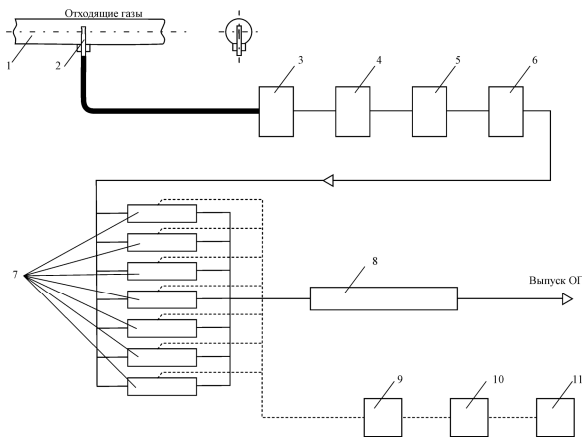


Рис. 2. Схема системы замера состава отходящих газов:

1 – магистраль отходящих газов; 2 – пробоотборный зонд; 3 – охладитель; 4 – осушитель; 5, 6 – фильтры; 7 – сенсоры компонентов; 8 – объемный насос; 9 – блок обработки; 10 – плата согласования; 11 – ПЭВМ

### 3. Результаты исследований

Сравнительные испытания газотурбинного двигателя АИ-8 на рассматриваемых топливах проведены на стенде ГТД-14-АТ при неизменной характеристике регулятора частоты вращения ротора турбокомпрессора ( $n = const$ ). С целью обобщения, экспериментальные данные представлены, как правило, в относительном виде. В качестве базы для сравнения приняты экспериментальные показатели ГТД АИ-8, полученные на топливе ЛЮ2-40 при номинальной длительной мощности генератора (табл. 3).

**3.1. Теплотехнические характеристики.** Результаты испытаний на рассматриваемых топливах показаны на рис. 3. Как следует из приведенных

данных, влияние свойств рассматриваемых топлив на показатели ГТД в целом весьма незначительно.

Таблица 3

Базовые показатели стенда ГТД-14-АТ

Показатели, параметры	Величина
Мощность электрическая, $(N_e)_б$ , кВт	14,1
Расход топлива, $(G_T)_б$ кг/с	0,024
Расход отходящих газов, $(G_T)_б$ кг/с	1,63
Температура отходящих газов $(T_4)_б$ К	890
Коэффициент восстановления полного давления на выходе	0,995

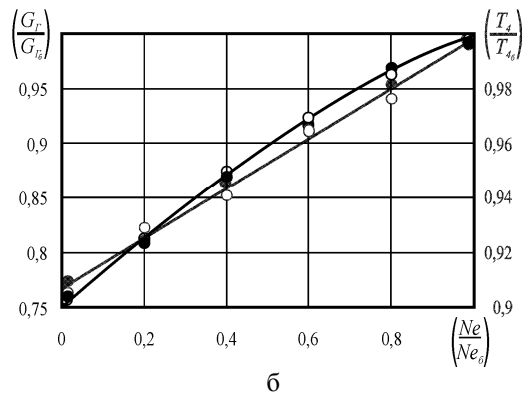
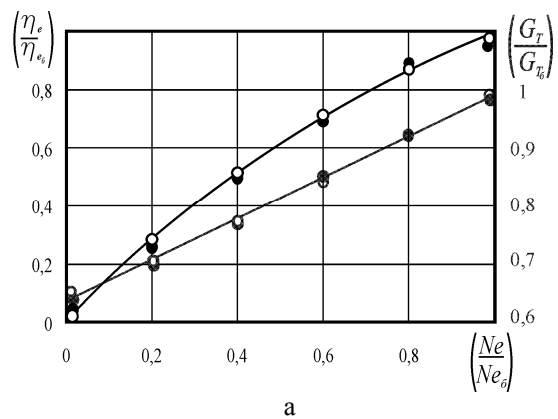


Рис. 3. Относительные теплотехнические показатели ГТД АИ-8:  
 а – КПД и расход топлива;  
 б – расход и температура отходящих газов;  
 топлива: ● – дизельное; ○ – альтернативное

Изменение КПД и массовых расходов газа на выходе и топлива при переходе с дизельного топлива на альтернативное не превышает 5%, а изменение температуры  $T_4$  составляет от 5...10К при номинальной нагрузке и увеличивается до до 20..30 К при

малых нагрузках. Следует отметить, что рассматриваемый ГТД характеризуется малым диапазоном изменения значения температуры газов на выходе (менее 100 К) во всем диапазоне нагрузок.

Полученные экспериментальные характеристики адекватны результатам [6] с учетом различных величин коэффициента восстановления полного давления на выходе ГТД для сравниваемых экспериментальных стендов.

**3.2. Экологические показатели.** Экологические характеристики ГТД АИ-8 приведены на рис. 3. Как следует из приведенных данных, Содержание  $CO$  в отходящих газах в зависимости от режима нагружения несколько изменяется по сравнению с работой на дизельном топливе: на режиме полной длительной мощности его значение снижается на 5...10  $ppm$  (1...2%) и повышается на 20...30  $ppm$  (3...4%) при малой мощности. Тенденция изменения содержания  $NOx$  в отходящих газах противоположная – увеличение на 2...3  $ppm$  на большой мощности и снижение на 1...2  $ppm$  при малой.

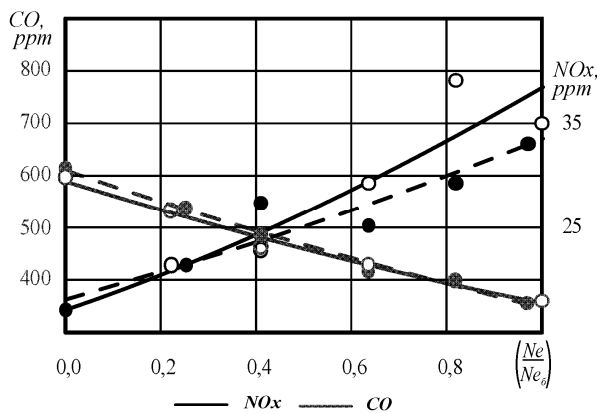


Рис. 4. Содержание  $CO$  и  $NOx$  в отходящих газах ГТД АИ-8; топлива: ● - - - - дизельное; ○ — — — — альтернативное

### Выводы

1. Создан стенд с компьютеризированной системой измерений для исследования теплотехнических и экологических характеристик ГТД малой мощности.
2. Показано, что относительное значение теплотехнических характеристик ГТД при работе на

альтернативном топливе, составляет 0,95...1,05 таковых на дизельном.

3. Выявлено, что содержание  $CO$  в отходящих газах изменяется в зависимости от величины нагрузки на 1...4%, а  $NOx$  – на 1...3  $ppm$ .

### Литература

1. Основы расширения ресурсов топлив для судовых газотурбинных двигателей / В.П. Серегин, А.Ф. Горенков, В.Т. Бугай, В.И. Петров, И.Г. Ключко // Химия и технология топлив и масел. – 1980. – № 11. – С. 43-45.
2. Бар Д.У. Влияние состава топлив с расширенным фракционным составом на камеры сгорания авиационных газотурбинных двигателей // Аэрокосмическая техника. – 1983. – № 8. – С. 117-125.
3. Andrews R.G., Fuleki D., Zukowski S., Patnaik P.C. Results of Industrial Gas Turbine Tests Using a Biomass-Derived Fuel // Making a Business from Biomass in Energy, Environment, Chemicals, Fibers, and Materials; Overend, R.P., Chornet, E., Eds.; Elsevier Science Inc.: New York, 1997. – P. 425-435.
4. Strenziok R., Hansen U., Künster H. Combustion of Bio-oil in a Gas Turbine // Progress in Thermochemical Biomass Conversion; Bridgwater, A.V., Ed.; Blackwell Science: Oxford, 2001. – P. 1452-1458.
5. Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р. Альтернативные топлива для тепловых двигателей // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. – Х.: ХАІ, 2001. – Вип. 26. Двигуни та енергоустановки. – С.13-18.
6. Матвеев В.Т. Результаты испытаний опытного когенерационного газотурбогенератора с турбокомпрессорным утилизатором // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Проблеми економії енергії. – Львів: ДУ «Львівська політехніка», 2004. – Вип. 2. – С. 22-25.

Поступила в редакцию 12.06.2007

**Рецензент:** проф. Ю.Л. Мошенцев, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.