



TsNIITEImyasomolprom. 1985. – 32 p.

36. Ptukhin I. N., Maksimov V. I. Eksperimentalnye issledovaniya raboty TNU pri chastichtnom obmerzanii isparatelya [Experimental studies of TNU operation during partial freezing of the evaporator] // Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologiy [Thermophysical fundamentals of Energy technologies] : sbornik nauchnykh trudov IV Vseros. nauch.-prakt. konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Tomsk, 10-12 okt. 2013 – Tomsk : TPU, 2013. – P. 104–107.

37. Volodin O. A., Pecherkin N. I., Pavlenko A. N. Intensifikatsiya teploobmena pri kipenii i isparenii zhidkostey na modifitsirovannykh poverkhnostyakh [Intensification of heat exchange during boiling and evaporation of liquids on modified surfaces] // Teplofizika vysokikh temperature [Thermophysics of high temperatures]. 2021. Vol. 59. № 2. P. 280–312.

38. Kafarov V. V., Dorokhov I. N., Koltsova E. M. Protssesy massovoy kristallizatsii iz rastvorov i gazovoy fazy [Processes of mass crystallization from solutions and gas phase]. – Moscow : Nauka, 1983. – 368 p.

39. Elin N. N., Nassonov Yu. V., Popov A. P. Razrabotka i ekspluatatsiya matematicheskikh modeley sistem dobychi i obustroystvo neftyanykh mestorozhdeniy [Development and operation of mathematical models of production systems and development of oil fields]. – Moscow : Nauka. 2006. – 366 p.

© С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, 2022

Получено: 13.04.2022 г.

УДК 621.438:62-681

**М. Н. ЧЕКАРДОВСКИЙ**, д-р техн. наук, проф., кафедры инженерных систем и сооружений; **К. Н. ИЛЮХИН**, канд. техн. наук, доц. кафедры инженерных систем и сооружений; **С. М. ЧЕКАРДОВСКИЙ** канд. техн. наук, доц. кафедры транспорта углеводородных ресурсов; **А. Ф. ШАПОВАЛ**, д-р техн. наук, проф., кафедры инженерных систем и сооружений

## АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ МИКРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38. Тел.: (3452) 28-39-40;  
эл. почта: misha.tchekardovskij@yandex.ru

*Ключевые слова:* газовые микротурбины, когенерация, исследование режимов работы, диагностика оборудования.

---

*Рассматривается взаимосвязь между надежностью, эффективностью и диагностическим обслуживанием газовых микротурбинных установок (ГМТУ), исследованиями номинальных и эксплуатационных условий ГМТУ, разработкой и совершенствованием методов расчета номинальных и эксплуатационных термодинамических и диагностических параметров установки. Это привело к разработке паспорта термодинамических параметров, которые можно сравнить с параметрами тех же агрегатов, когда они работают, с целью диагностики их состояния.*

---

Газовые микротурбинные установки (ГМТУ) создают надежное, круглогодичное энергообеспечение торгово-развлекательных центров (ТРЦ), гостиниц,



мини-отелей, супермаркетов, больниц спортивных центров и т. д.

Одним из ведущих мировых лидеров по производству ГМТУ является компания “Capstone”, США (поставщик ООО «БПЦ Энергетические системы»). Микротурбины компании “Capstone” успешно применяются в следующих аспектах: электро- и теплоснабжение (когенерация), горячее водоснабжение промышленных предприятий, жилых объектов, энергоснабжение инфраструктуры нефтегазового сектора, утилизация-переработка попутного нефтяного газа.

Когенерационная система состоит из газовой микротурбины “Capstone C65” с приводом генератора для выработки электрической энергии и трубчатого теплообменника для производства тепловой энергии (горячей воды), которая использует теплоту отходящих выхлопных газов микротурбины.

Данная когенерационная система может быть использована как самостоятельная установка или как часть комплексной теплоэнергетической системы в различных проектах, где существует потребность в отоплении жилых или производственных помещений, горячем водоснабжении, применении горячей воды в технологических процессах. При этом микротурбина используется в качестве основного или дополнительного источника электрической и тепловой энергии, работая автономно или параллельно с сетью.

Эффективная мощность центробежной турбины расходуется на привод центробежного компрессора и генератора, а теплота выходящих продуктов сгорания используется для подогрева воды в теплообменнике. Следует учесть, что генератор, центробежный компрессор, центробежная турбина расположены на одном валу, и ГМТУ имеет встроенный регенератор.

ГМТУ “Capstone C65” [1] представляет собой модульную систему для производства электрической и тепловой энергии, используемую в качестве резервного или основного источника питания, а также для сглаживания колебаний напряжения в электросети. Несколько агрегатов C65 могут быть объединены в единый энергетический комплекс (кластер) для обеспечения потребности в энергии и повышения надежности с помощью кабельного соединения (до 20 единиц), как, например, в спортивном комплексе «Жемчужина Сибири», Тюменский район.

Авторами разработан алгоритм, который позволяет контролировать и диагностировать основные параметры газовой микротурбинной установки “Capstone C65”, на основании данных из источников [1, 2, 3, 4, 5].

Рассмотрим изменение эффективной мощности ГМТУ в зависимости от изменения режима работы (регулирование, неисправность):

– центробежный компрессор (ЦК)

$$\Delta N_e^{\text{ЦК}} = N_e^0 \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_{\text{ЦК}}}{\varepsilon_{\text{ЦК}}^0} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{ЦК}}^0 = \left( \frac{P_c}{P_0} \right)_0 = \left( \frac{T_c}{T_0} \right)_0^{\frac{K}{K-1}}$  и  $\varepsilon_{\text{ЦК}} = \left( \frac{P_c}{P_0} \right) = \left( \frac{T_c}{T_0} \right)^{\frac{K}{K-1}}$  – степени повышения

давления воздуха в ЦК при номинальном и текущем режимах;

$N_e^0 = 65$  кВт – номинальная эффективная мощность ГМТУ;  $K = 1,4$  – показатель адиабатного сжатия воздуха при текущем режиме работы центробежного компрессора;



– центробежная турбина (ЦТ)

$$\Delta N_e^{\text{ЦТ}} = N_e^0 \left[ 1 - \left[ \frac{\varepsilon_{\text{ЦТ}}}{\varepsilon_{\text{ЦТ}}^0} \right] \right], \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{\text{ЦТ}}^0 = \left( \frac{P_Z}{P_S} \right)_0 = \left( \frac{T_Z}{T_S} \right)_0^{\frac{K_T}{K_T-1}}$  и  $\varepsilon_{\text{ЦТ}} = \left( \frac{P_Z}{P_S} \right) = \left( \frac{T_Z}{T_S} \right)^{\frac{K_T}{K_T-1}}$  – степени расширения

продуктов сгорания в ЦТ при номинальном и текущем режимах;  $K_T = 1,2855$  – показатель политропного расширения продуктов сгорания (ПС) при текущем режиме работы турбины.

Изменение эффективной мощности в зависимости от изменения режима работы узлов ГМТУ (регулирование, неисправность):

$$\Delta N_e^1 = \Delta N_e^{\text{ЦК}} + \Delta N_e^{\text{ЦТ}}. \quad (3)$$

Изменение эффективного КПД определяется по зависимости:

$$\Delta \eta_e^1 = \eta_e^0 \frac{\Delta N_e^1}{\Delta N_e^0}, \quad (4)$$

где  $\eta_e^0 = 0,29$  – номинальное значение КПД ГМТУ.

Изменение мощности в зависимости от изменения сопротивления входного тракта в ЦК:

$$\Delta N_e^2 = 0,0246 \cdot \Delta N_e^0 \cdot \Delta P_1, \quad (5)$$

где  $\Delta P_1 = 0$  кПа (0 мм вод. ст.) – потери полного давления новой ГМТУ;  $\Delta P_1 = 2,026$  кПа (200 мм вод. ст.) – предельно допустимые потери полного давления эксплуатируемой ГМТУ.

Уравнение получено в результате аппроксимации графика, представленного на рис. 1 [1].

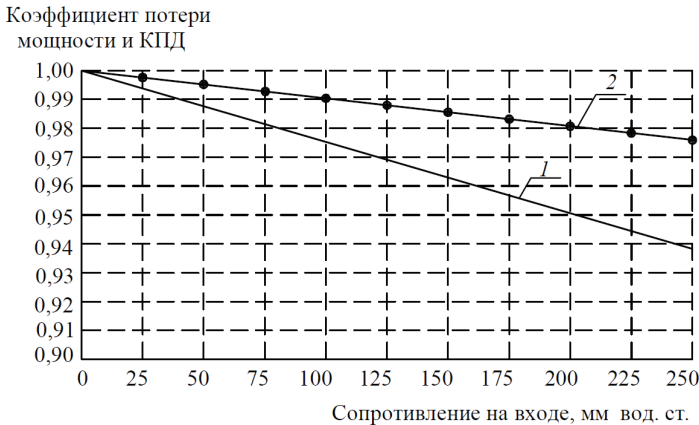


Рис. 1. Потеря мощности и КПД от сопротивления на входе: 1 – мощность; 2 – КПД

Тогда изменение КПД:

$$\Delta \eta_e^2 = 0,00938 \cdot \eta_e^0 \cdot \Delta P_1. \quad (6)$$



По результатам экспериментальных исследований принимаем, что изменение температуры перед ЦТ на 1 К дает изменение мощности в 0,021 кВт, тогда изменение мощности:

$$\Delta N_e^3 = 0,021 \cdot \left[ T_Z^0 - T_0 \cdot \frac{T_Z}{288} \cdot \left( 0,5 + \sqrt{1,44 \cdot \frac{288 \cdot T_S}{T_0 \cdot T_S^0} - 1,19} \right) \right], \quad (7)$$

где  $T_Z^0 = 1227$  К,  $T_S^0 = 908$  К – номинальные значения ПС до и после ЦТ.

Изменение КПД:

$$\Delta \eta_e^3 = \eta_e^0 \frac{\Delta N_e^3}{\Delta N_e^0}. \quad (8)$$

Изменение мощности в зависимости от сопротивления на выходе:

$$\Delta N_a^4 = 0,0133 \cdot N_e^0 \cdot \Delta P_2, \quad (9)$$

где  $\Delta P_2 = 2,026$  кПа – потери полного давления в газотводящем устройстве.

Уравнение получено в результате аппроксимации графика, представленного на рис. 2 [1].

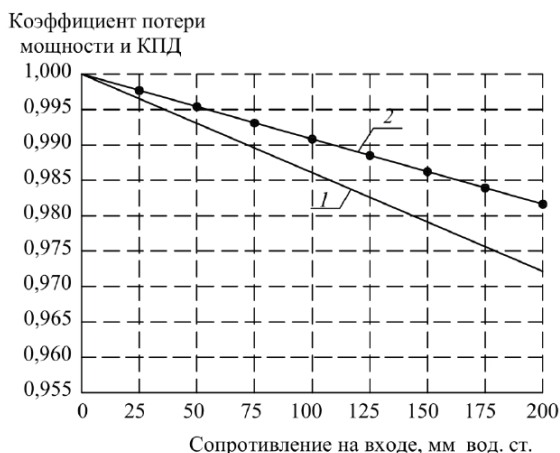


Рис. 2. Потеря мощности и КПД от сопротивления на выходе: 1 – мощность; 2 – КПД

Тогда изменение КПД:

$$\Delta \eta_e^4 = 0,0089 \cdot \eta_e^0 \cdot \Delta P_2. \quad (10)$$

Общее изменение эффективной мощности:

$$\Delta N_e = \Delta N_e^1 + \Delta N_e^2 + \Delta N_e^3 + \Delta N_e^4. \quad (11)$$

Общее изменение эффективного КПД:

$$\Delta \eta_e = \Delta \eta_e^1 + \Delta \eta_e^2 + \Delta \eta_e^3 + \Delta \eta_e^4. \quad (12)$$

Фактическая эффективная мощность и КПД ГМТУ в зависимости от режима работы и (или) предельно допустимых сопротивлений на входе в ЦК и выходе ЦТ:

$$N_e^{\text{факт}} = N_e^0 - N_e, \quad (13)$$

$$\eta_e^{\text{факт}} = \eta_e^0 - \eta_e. \quad (14)$$

Расчет, согласно разработанному алгоритму, проводился в специально разработанной программе, работающей в составе программы *Microsoft Excel*. Исходные данные для расчета параметров ГМТУ представлены в табл. 1.



## Исходные данные ГМТУ

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Номинальная мощность	$N_e^0$	кВт	65
Рабочая мощность	$N_e^p$	кВт	48,21
Степень повышения давления воздуха в ЦК:	$\varepsilon_{\text{ЦК}}^0$	-	5,89
– номинальный режим	$\varepsilon_{\text{ЦК}}$	-	5,11
Степень расширения продуктов сгорания в ЦТ:	$\varepsilon_{\text{ЦК}}^0$	-	3,88
– номинальный режим	$\varepsilon_{\text{ЦК}}$	-	3,88
– рабочий режим			
Номинальный эффективный КПД ГТД	$\eta_e^0$	-	0,29
Потери давления на входе в ЦК	$\Delta P_1$	кПа	2,026
Температура продуктов сгорания перед ЦТ:	$T_z^0$	К	1277
– номинальный режим	$T_z$	К	1260
– рабочий режим			
Температура продуктов сгорания за ЦТ:	$T_s^0$	К	908
– номинальный режим	$T_s$	К	853
– рабочий режим			
Температура воздуха на входе в ЦК	$T_0$	К	288
Потери давления на выходе ЦТ	$\Delta P_2$	кПа	0

Результаты расчетов параметров ГМТУ представлены в табл. 2.

## Результаты расчета по алгоритму диагностирования

Таблица 2

Изменение мощности		Изменение КПД	
Параметр	Величина	Параметр	Величина
$\Delta N_e^{\text{ЦК}}$	8,6	-	-
$\Delta N_e^{\text{ЦТ}}$	0	-	-
$\Delta N_e^1$	8,6	$\Delta \eta_e^1$	0,0384
$\Delta N_e^2$	3,24	$\Delta \eta_e^2$	0,0055
$\Delta N_e^3$	4,95	$\Delta \eta_e^3$	0,002
$\Delta N_e^4$	0	$\Delta \eta_e^4$	0
$\Delta N_e$	16,79	$\Delta \eta_e$	0,04587
$\Delta N_e^{\text{факт}}$	48,21	$\Delta \eta_e^{\text{факт}}$	0,239

**Выводы:**

Анализ таблицы показывает, что из-за несоответствия рабочего режима работы ГМТУ номинальному значению и предельно допустимых потерь давления на входе ЦК и выходе ЦТ имеются изменения фактической эффективной мощности и КПД ГМТУ.

Следует иметь в виду, что после ремонта необходимо провести испытания установки для определения номинальных параметров отремонтированной ГМТУ и сравнивать текущее значение с номинальными параметрами этой установки, а не новой.



Необходимо различать изменение  $N_c$  и  $\eta_c$  при регулировании режима работы и при появлении неисправности. Поэтому каждое исследование проводится при идентичных условиях: частота вращения роторов, температура наружного воздуха, режим работы ГМТУ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и способы комплексных исследований и оценки технического состояния оборудования инженерных систем : монография / С. М. Чекардовский, И. А. Чекардовская, К. Н. Илюхин [и др.]. – Москва : РУСАЙНС, 2021. – 284 с. – ISBN 978-5-4365-8471-3. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46384408&>. – Текст : электронный.
2. Энерготехнологические комплексы при проектировании и эксплуатации оборудования в системах теплогазоснабжения / К. Н. Илюхин, Б. В. Моисеев, М. Н. Чекардовский, С. М. Чекардовский, Н. В. Налобин. – Тюмень, 2016. – 393 с. – ISBN: 978-5-91392-006-5. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25649054&>. – Текст : электронный.
3. Research on thermodynamic parameters of a micro-turbine for standalone cogeneration / M. N. Chekardovskiy, S. M. Chekardovskiy, I. A. Chekardovskaya, A. I. Mihajlenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – С. 012005.
4. Chekardovskiy, M. N. Methods for determining the thermodynamic parameters of gas compressor units of main gas pipelines / M. N. Chekardovskiy, S. M. Chekardovskiy, K. N. Ilyukhin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – С. 012027.
5. Upgraded algorithm for calculating the turbo-expander of gas distribution stations / M. Chekardovskiy, S. Chekardovskiy, K. Ilyukhin, A. Gladenko // MATEC Web of Conferences. – 2016. – С. 01020.

**CHEKARDOVSKY Mikhail Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, of the chair of engineering systems and structures; ILYUKHIN Konstantin Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of engineering systems and structures; CHEKARDOVSKY Sergey Mikhaylovich, candidate of technical sciences, associate professor of the chaie of transportation of hydrocarbon resources; SHAPOVAL Anatoly Philippovich, doctor of technical sciences, professor of the chair of engineering systems and structures**

#### DIAGNOSTIC PROCEDURE FOR COGENERATION GAS MICROTURBINE UNIT

Industrial University of Tyumen  
38, Volodarsky St., Tyumen, 625000, Russia. Tel.: +7 (3452) 28-39-40;  
e-mail: [misha.tchekardovskij@yandex.ru](mailto:misha.tchekardovskij@yandex.ru)

*Key words:* gas microturbines, cogeneration, operation modes studies, equipment diagnostics.

---

*The paper overviews the relationship between the reliability, efficiency and diagnostic maintenance of gas microturbine units (GMTU), the studies of rated and operating conditions of GMTUs, the development and improvement of methods for calculating rated and operating thermodynamic and diagnostic parameters of the units. This has resulted in developing a passport of thermodynamic parameters that can be compared to the parameters of the same units when they operate for the purpose of diagnosing their state.*

---

#### REFERENCES

1. Chekardovsky, S. M., Chekardovskaya I. A., Ilyukhin K. N., et al. Metody i sposoby kompleksnykh issledovaniy i otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya inzhenernykh



system [Methods and means of complex research and assessment of the technical condition of engineering systems equipment] : monografiya / Moscow: RUSAYNS, 2021. – 284 p. – ISBN 978-5-4365-8471-3. – URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46384408&>.

2. Ilyukhin K. N., Moiseev B. V., Chekardovsky M. N., Chekardovsky S. M., Nalobin N. V. Energotekhnologicheskie komplekсы pri proektirovanii i ekspluatatsii oborudovaniya v sistemakh teplogazosnabzheniya [Energy technology complexes in the design and operation of equipment in heat and gas supply systems] – Tyumen, 2016. – 393 p. – ISBN: 978-5-91392-006-5. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25649054&>.

3. Chekardovsky M. N., Chekardovsky S. M., Chekardovskaya I. A., Mikhaylenko A. I. Research on thermodynamic parameters of a micro-turbine for standalone cogeneration // V sbornike: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. P. 012005.

4. Chekardovsky M. N., Chekardovsky S. M., Ilyukhin K. N. Methods for determining the thermodynamic parameters of gas compressor units of main gas pipelines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. P. 012027.

5. Chekardovsky M., Chekardovsky S., Ilyukhin K., Gladenko A. Upgraded algorithm for calculating the turbo-expander of gas distribution stations // MATEC Web of Conferences. 2016. P. 01020.

© М. Н. Чекардовский, К. Н. Илюхин, С. М. Чекардовский, А. Ф. Шаповал, 2022  
Получено: 30.03.2022 г.

УДК 697.956:726.54

**А. И. ЕРЕМКИН<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции; **А. Г. АВЕРКИН<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **И. К. ПОНОМАРЕВА<sup>2</sup>**, канд. экон. наук, доц. кафедры информационного обеспечения управления и производства

### **РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВОЗДУХООБМЕНА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ САЖИ И КОПОТИ В ВОЗДУХЕ ПРИ СГОРАНИИ ЦЕРКОВНЫХ СВЕЧЕЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»  
Россия, 440028, г. Пенза, ул. Г. Титова, д. 28. Тел.: (8412) 92-94-10;  
эл. почта: [eremkin@pguas.ru](mailto:eremkin@pguas.ru)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40. Тел.: (8412) 66-63-80; эл. почта: [inna.ok007@rambler.ru](mailto:inna.ok007@rambler.ru)  
*Ключевые слова:* зал богослужения, свеча, пламя, продукты сгорания, копоть сажа, воздухообмен.

---

*Анализ имеющихся отечественных и зарубежных исследований позволяет сделать вывод, что до настоящего времени отсутствует методика определения концентрации копоти и сажи в воздухе зала богослужения и методика расчета воздухообмена для их ассимиляции. Решение данной задачи будет способствовать созданию комфортных условий для прихожан и персонала, сохранению историко-культурного наследия и убранства в залах богослужения православных культовых сооружений.*