

УДК 681.5

**Игорь Константинович Муравьев**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-57, e-mail: kafsu@su.ispu.ru

**Данил Андреевич Шинкевич**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры систем управления, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-57, e-mail: dan-shinkevich@yandex.ru

## **Моделирование работы газотурбинной установки SGT5-4000F с исследованием влияния режимных и климатических факторов на устойчивость горения в камере сгорания**

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** При регулировании газотурбинных установок необходимо быть уверенным в стабильном процессе горения в камерах сгорания с учетом динамики процессов и изменений внешних климатических факторов. Несмотря на то что проблемам экспериментальных исследований и математического моделирования процессов в камерах сгорания посвящены многие научные работы, в которых оценивались возможности срыва пламени, расширения нижнего предела горения, определения устойчивого положения фронта пламени и другие, актуальной остается проблема построения математических моделей и на их основе анализа рабочих процессов в камерах сгорания. Целью исследования является моделирование и анализ влияния режимных и климатических факторов на устойчивость процесса горения в камере сгорания газотурбинной установки.

**Материалы и методы.** Объектом для исследования выбрана газотурбинная установка SGT5-4000F с малоэмиссионной камерой сгорания. Имитационная модель газотурбинной установки разработана в среде динамического моделирования технических систем SimInTech. Исследования выполнены с использованием теоретических методов расчета горения топлива, термодинамических основ теории газотурбинных двигателей, методов математического и имитационного моделирования, а также данных из архива АСУТП.

**Результаты.** Разработана имитационная модель газотурбинной установки SGT5-4000F, отличающаяся возможностями оценки близости режима работы компрессора к границе устойчивости и определения границ стабильного процесса горения в камере сгорания с учетом климатических факторов внешней среды. Проведены исследования в области устойчивости работы компрессора и камеры сгорания. Проведенные экспериментальные исследования работы газотурбинной установки в области рабочего диапазона нагрузки от 113 до 282 МВт и в диапазонах изменений температуры наружного воздуха от  $-12$  до  $30$  °С показали, что процесс горения в камере сгорания протекает стабильно во всем диапазоне рабочих нагрузок. Осуществлена верификация полученных результатов путем сопоставления модельных значений с трендами реальных технологических параметров газотурбинной установки, взятых из архива АСУТП электростанции. Выполнена оценка влияния электрической нагрузки на показатели эффективности работы газотурбинной установки при температурах наружного воздуха  $+30$ ,  $+15$  и  $-12$  °С.

**Выводы.** По результатам имитационного моделирования модель газотурбинной установки SGT5-4000F признана адекватной. Разработанная модель может быть использована в качестве инструментального средства на стадии функционального и технологического проектирования АСУТП для разработки эффективных систем автоматического управления.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, имитационная модель, электрическая мощность, помпаж, коэффициент избытка воздуха, технологические параметры ГТУ

**Igor Konstantinovich Muravyov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Control Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-57, e-mail: kafsu@su.ispu.ru

**Danil Andreyevich Shinkevich**

Ivanovo State Power Engineering University, Post graduate student of Control Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-57, e-mail: dan-shinkevich@yandex.ru

## **Modeling the operation of SGT5-4000F gas turbine unit and study of influence of operating and climatic factors on the stability of combustion in combustion chamber**

**Abstract**

**Background.** When regulating gas turbine units, it is necessary to be confident in the stable combustion process in the combustion chambers, considering the dynamics of the processes and changes of external climatic factors. Many scientific

studies are devoted to the problems of experimental research and mathematical modeling of processes in combustion chambers. The possibilities of flame failure, expansion of the lower limit of combustion, determination of the stable position of the flame front and other issues have been assessed. Even though the problem of design of mathematical models and their use remains relevant. The purpose of this research is to model and study the influence of operation and climatic factors on the stability of combustion in the combustion chamber of the SGT5-4000F gas turbine unit.

**Materials and methods.** The subject of the research is the SGT5-4000F gas turbine unit with a low-emission combustion chamber. The simulation model of the gas turbine unit has been developed in the environment of dynamic modeling of technical systems SimInTech. The research is carried out using theoretical methods of calculating fuel combustion, thermodynamic foundations of the theory of gas turbine engines, methods of mathematical and simulation modeling, as well as data from the archive of automated process control systems.

**Results.** A simulation model of SGT5-4000F gas turbine unit has been developed. It is distinguished by the ability to assess the proximity of the compressor operating mode to the stability limit and determine the boundaries of stable combustion procedure in the combustion chamber, considering environmental climatic factors. The authors have studied the stability of the compressor and combustion chamber. The results of the experimental studies of a gas turbine unit in the operating load range from 113 to 282 MW and in the range of outside air temperature from  $-12$  to  $30$  °C have shown that the combustion process in the combustion chamber is unvarying over the entire operational stress spectrum. The results obtained are verified by comparing model values with technological parameters of a gas turbine unit taken from the archive of the power plant control system. The authors have assessed the influence of electrical load on the performance indicators of a gas turbine unit at outdoor temperatures of  $+30$ ,  $+15$  and  $-12$  °C.

**Conclusions.** According to the results of simulation modeling, the model of SGT5-4000F gas turbine unit is found to be adequate. The developed model can be used as a tool at the stage of functional and technological design of automated control systems for the development of effective automatic control systems.

**Key words:** gas turbine unit, simulation model, electric power, surge, excess air coefficient, technological parameters of gas turbine unit

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.1.012-019

**Введение.** Газотурбинные установки (ГТУ) являются одним из самых прогрессивных и эффективных способов генерации электроэнергии на современных электростанциях [1, 2].

В ГТУ в качестве основы рабочего тела используются большие массы воздуха, характеризующиеся коэффициентом избытка воздуха. Необходимость сжатия такого количества воздуха в компрессоре ставит характер работы ГТУ в жесткую зависимость от его начальных параметров (температура, давление, влажность) и физических свойств (плотность, теплоемкость, газовая постоянная). В эксплуатационных условиях их изменение приводит к колебаниям требуемой для сжатия работы и, соответственно, полезной мощности ГТУ при неизменном расходе топлива. В процессе работы ГТУ изменения могут быть значительными, поэтому их необходимо учитывать. В противном случае не исключены перерасход топлива, невозможность развития заданной частоты вращения, превышение допустимой мощности (по условиям прочности), преждевременное израсходование ресурса, работа компрессора в неустойчивой зоне [3, 4].

В связи с этим исследования, направленные на определение зон устойчивой работы ГТУ вблизи режимных ограничений технологического оборудования и в целом в перспективе на совершенствование средств регулирования состава топливовоздушной смеси для поддержания эмиссионных характеристик в диапазоне требуемых условий эксплуатации ГТУ, являются актуальными.

В качестве объекта исследования была выбрана ГТУ фирмы Siemens SGT5-4000F, ко-

торая состоит из одновального однокорпусного агрегата с постоянной частотой вращения, работающей в составе энергоблока ПГУ-800 (г. Кириши, Ленинградская обл.). Согласно тепловой схеме и составу оборудования энергоблока, ее эксплуатация возможна только со сбросом газов в котел-утилизатор, т.е. автономная работа ГТУ без сброса газа в котел-утилизатор не предусмотрена. Данная установка обладает высокими показателями номинальной электрической мощности и коэффициента полезного действия.

Целью работы является определение зоны устойчивой работы ГТУ в рабочем диапазоне нагрузок при изменяющихся климатических факторах. Для этого разработана имитационная модель ГТУ SGT5-4000F, посредством которой проведены исследования по оценке влияния изменений температуры и влажности поступающего в компрессор воздуха на стабильность работы турбины.

**Методы исследования.** Исследования выполнены с использованием теоретических методов расчета процесса горения топлива, термодинамических основ теории газотурбинных двигателей, методов математического и имитационного моделирования, а также данных из архива автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП).

Разработка имитационной модели турбины велась в среде динамического моделирования технических систем SimInTech, которая предназначена для детального исследования и анализа нестационарных процессов в различных объектах, разработки математических моделей и алгоритмов управления [5, 6].

Среда SimInTech позволяет рассчитывать, моделировать, исследовать и синтезировать различные математические модели устройств (механических, гидравлических, теплотехнических, электротехнических и др., в том числе средств и систем автоматики) [6].

При разработки математической модели ГТУ SGT5-4000F за основу принята разработанная ранее модель ГТУ электрической мощностью 110 МВт, адаптированная по части применения расчетных формул и уравнений под технологические характеристики и режимные параметры ГТУ SGT5-4000F с учетом ее конструктивных особенностей.

В состав модели SGT5-4000F (рис. 1) включены расчеты основных конструктивных и технологических характеристик оборудования [7–10], в том числе: объема жаровой трубы; полноты сгорания топлива; коэффициента форсировки; коэффициента запаса устойчивости компрессора; приведенной и осевой скорости воздуха; температуры газов за ГТУ; времени пребывания топливовоздушной смеси в камере сгорания (КС) и др.

Совокупность расчетных уравнений в рамках единой модели установки обеспечивает достаточно точное описание физических процессов внутри ГТУ и ее технологических участков, в том числе определение характеристик параметров поступающего топлива и воздуха, описание стабильности процесса горения и распределения потоков воздуха на охлаждение турбины.

Среди уравнений, используемых для реализации моделирования работы ГТУ, можно выделить следующие [7–11]:

1) расчет температуры воздуха на выходе компрессора  $T''_K$ , К:

$$T''_K = T'_K + \left( \frac{l_k}{c_B} \right), \quad (1)$$

где  $T'_K$  – температура воздуха на входе в компрессор, К;  $l_k$  – удельная работа компрессора, кДж/кг;  $c_B$  – средняя теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/(кг·К);

2) расчет температуры газов перед газовой турбиной (ГТ)  $T'_G$ , °С:

$$T'_G = \frac{H_u \eta_r + \alpha_{КС} L_0 c_B T''_K}{(1 + \alpha_{КС} L_0) c_G}, \quad (2)$$

где  $H_u$  – низшая теплотворная способность, Дж/кг;  $\eta_r$  – приближенная оценка полноты сгорания;  $\alpha_{КС}$  – коэффициент избытка воздуха в КС;  $L_0$  – количество воздуха, необходимое для полного сгорания топлива при  $\alpha = 1$ , кг/кг;  $c_G$  – средняя теплоемкость газа при постоянном давлении, кДж/(кг·К);

3) оценка близости режима работы компрессора к границе устойчивости [12]:

$$K_y = \left| \frac{G_K \pi_{K,уст}^*}{G_{K,уст} \pi_{K,уст}^*} \right|_{\bar{n}_{пр} = const} \approx 1,1 - 1,5, \quad (3)$$

где  $\bar{n}_{пр} = \sqrt{\frac{T''_K}{T'_K}} = \sqrt{\frac{288,15}{T'_K}}$  – удельная приведенная частота вращения;  $G_{K,уст}$ ,  $\pi_{K,уст}^*$  – расход и степень повышения давления на границе устойчивости при той же частоте вращения  $n$ , при которой определены  $G_K$ ,  $\pi_K^*$  в данном режиме;

4) определение границы устойчивого горения в КС по «бедному» составу смеси по предельному значению коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{ср}$ :

$$\alpha_{ср} = \frac{G_{КС} \cdot 10^6}{P_K^{0,5} T_K^{1,7} V_{КС}}, \quad (4)$$

где  $V_{КС}$  – объем зоны, отвечающей за стабилизацию пламени, м<sup>3</sup>;  $G_{КС}$  – расход воздуха на входе в КС, кг/с.

Полученное значение  $\alpha_{ср}$  является предельно допустимым для стабилизации пламени в камере сгорания, т.е. для обеспечения устойчивого горения необходимо обеспечить условие  $\alpha_{ср} > \alpha_{КС}$ ;

5) оценка зависимости КПД компрессора от степени сжатия воздуха в компрессоре:

$$\eta_{oi\_к} = \frac{-0,131948 \pi_K^2 + 5,1569 \pi_K + 39,0447}{100}; \quad (5)$$



Рис. 1. Обобщенная структурная схема имитационной модели ГТУ в SimInTech

б) расчет удельной работы компрессора  $l_k$ , кДж/кг:

$$l_k = \varphi_a c_B T'_k (\pi_k^{k_b-1} - 1) \eta_{oi-k}^{-1} \quad (6)$$

где  $\varphi_a$  – поправочный коэффициент к удельной работе сжатия компрессора для учета влажности воздуха (табл. 1).

Таблица 1. Поправочный коэффициент к удельной работе сжатия компрессора [13]

$t_b, ^\circ\text{C}$	Относительная влажность воздуха, %			
	60	70	80	90
10	1,0027	1,0031	1,0038	1,0044
20	1,0055	1,0065	1,0075	1,0085
30	1,0099	1,0116	1,0133	1,0154
40	1,0174	1,0210	1,0222	1,0263

В разработанной модели также реализовано охлаждение с определенных ступеней компрессора в соответствии с инструкцией по эксплуатации ГТУ [4]. Воздух отбирается для охлаждения лопаток газовой турбины. Процентное соотношение воздуха для этого охлаждения в разных технологических зонах задано постоянной величиной, и это является одним из допущений, принятых при разработке модели. Еще одним допущением является отсутствие учета работы антиобледенительной системы ГТУ.

**Результаты исследования.** Полученная имитационная модель позволяет оценить основные параметры работы ГТУ и физических процессов, проходящих в компрессоре, камере сгорания, газовой турбине, а также устойчивость работы компрессора и стабильность горения в камере сгорания.

Выполнена оценка адекватности модели в статическом номинальном режиме работы. Результаты исследований сопоставлены с данными режимной карты (РК), определены относительные погрешности ряда технологических параметров:

- отклонение значения электрической мощности составило 0,71 % (280 МВт – модель; 282 МВт – РК);

- отклонение значения КПД ГТУ составило 1,68 % (37,5 % – модель; 38,14 % – РК);

- отклонение значения температуры уходящих газов составило 1,58 % (561 °С – модель; 570 °С – РК).

Таким образом, абсолютная погрешность расчета температуры уходящих газов равна 9 °С, что можно объяснить неточным расчетом площади проточной части на входе в компрессор, которая изменяется при изменении положения направляющего аппарата и определяется в математической модели ГТУ по эмпирической формуле, а повышение точности ограничено нехваткой конструктивных данных по осевому компрессору [4].

Для верификации математической модели использованы данные из архива АСУТП энергоблока ПГУ-800 (г. Кириши, Ленинградская область, протокол эксплуатации ГТУ за 08.02.2018 на момент времени 14 ч 03 мин) (рис. 2). Диапазон изменения мощности составил от 160 до 282 МВт; диапазон изменения расхода топлива – от 8,33 до 14,6 кг/с; диапазон изменения угла входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора – от 10,16 до 94,61%; диапазон изменения температуры наружного воздуха – от –4,44 до –3,56 °С. Температура подогретого газа принимается 70 °С.

Сравнив полученные результаты с экспериментальными (рис. 2), можно сделать следующие выводы о работе полученной имитационной модели:

- график электрической мощности ГТУ совпадает с экспериментом достаточно точно (отклонения  $\pm 1$  МВт);

- температура уходящих газов за ГТ отличается от эксперимента, но не превышает отклонения в 5 °С;

- КПД газотурбинной установки изменяется в диапазоне от 39,5 до 34 %;

- коэффициент запаса устойчивости работы компрессора находится в допустимых пределах от 1,1 до 1,5 во всем диапазоне нагрузок;

- горение в камере сгорания протекает стабильно, так как предельное значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{ср}$  превышает коэффициент избытка воздуха в камере сгорания  $\alpha_{к.с.}$ .

В ходе исследования эффективности работы газотурбинной установки была произведена оценка влияния нагрузки на показатели ГТУ. Значения технологических параметров были получены по режимной карте в диапазоне нагрузок от 40 до 100 % (от 113 до 282 МВт) и при различных температурах наружного воздуха  $T_{нв}$  (табл. 2): 15 °С (номинальный режим работы ГТУ) и –12 °С (средняя температура воздуха зимой в г. Кириши, Ленинградская обл.). Температура уходящих газов за ГТ ( $T_{yx}$ ) подерживалась постоянной на уровне 570 °С.

При изменении нагрузки от 40 до 100 % КПД ГТУ возрастает на 9 %, при этом значения коэффициентов избытка воздуха в камере сгорания понижаются.

Оценка близости режима работы компрессора к границе устойчивости количественно определяется коэффициентом запаса устойчивости. Этот коэффициент изменяется от 1,24 до 1,28. Срыв потока воздуха приводит к возникновению колебаний воздуха, вихрей и движению воздуха в различных направлениях в проточной части компрессора [12]. При этом экономичность компрессора начинает резко падать, возникают вибрации по всему агрегату. Работа ГТУ в таком режиме недопустима.

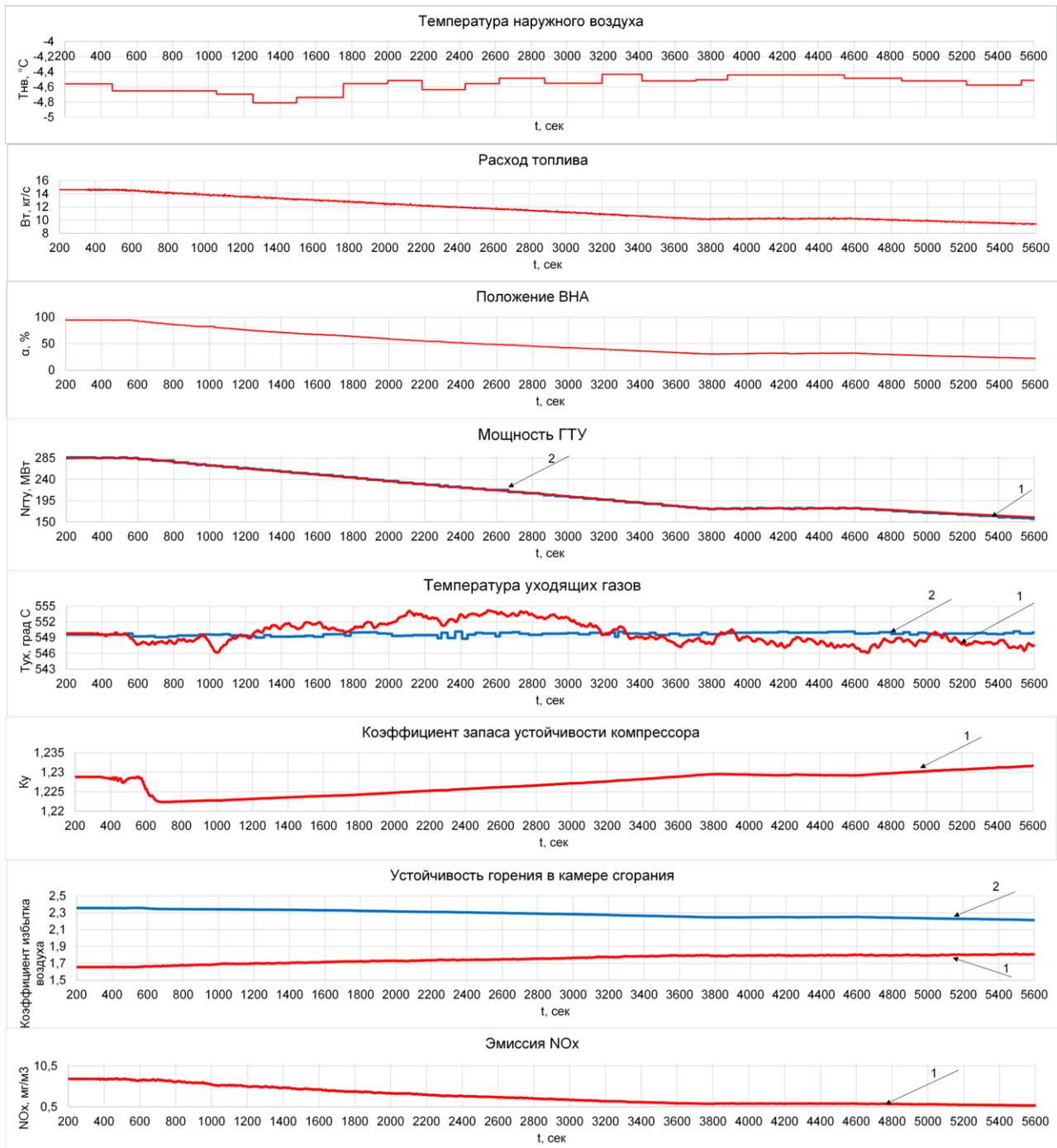


Рис. 2. Результаты исследования: 1 – модель; 2 – данные архива АСУТП;  $T_{нв}$  – температура наружного воздуха, °C;  $B_t$  – расход топлива, кг/с;  $\alpha$  – положение ВНА, %;  $N_{ГТУ}$  – электрическая мощность ГТУ, МВт;  $T_{ух}$  – температуры уходящих газов за ГТУ, °C;  $K_y$  – коэффициент запаса устойчивости компрессора;  $\alpha_{КС}$  – коэффициент избытка воздуха в камере сгорания;  $\alpha_{ср}$  – предельное значение коэффициента избытка воздуха в КС;  $NO_x$  – эмиссия выбросов оксидов азота, мг/м<sup>3</sup>

Таблица 2. Оценка влияния нагрузки на показатели ГТУ (при  $T_{нв} = 15\text{ }^{\circ}\text{C} / -12\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Технологический параметр	Электрическая мощность ГТУ, МВт					
	282	254	197,5	169	141	113
Расход топлива, кг/с	15,1/14,9	13,9/13,8	11,6/11,4	10,4/10,2	9,1/8,9	7,7/7,65
Массовый расход воздуха, кг/с	707/663	660/619	570/534	523/490	472/440	414/425
КПД ГТУ, %	37,8/38,2	36,9/37,3	34,7/35,0	33,3/33,5	31,4/31,7	29,1/29,9
Коэффициент запаса устойчивости	1,24/1,24	1,27/1,27	1,28/1,28	1,28/1,27	1,26/1,25	1,28/1,27
Коэффициент избытка воздуха в КС	2,52/2,40	2,55/2,43	2,64/2,52	2,70/2,58	2,78/2,66	2,88/2,99
Коэффициент срыва пламени	3,84/4,51	3,81/4,47	3,72/4,36	3,66/4,27	3,58/4,18	3,49/4,13

Предельные значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{ср}$  при всех режимах работы ГТУ количественно больше коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{кс}$  в КС, а значит, горение в камере сгорания протекает стабильно во всем диапазоне рабочих нагрузок (рис. 3).

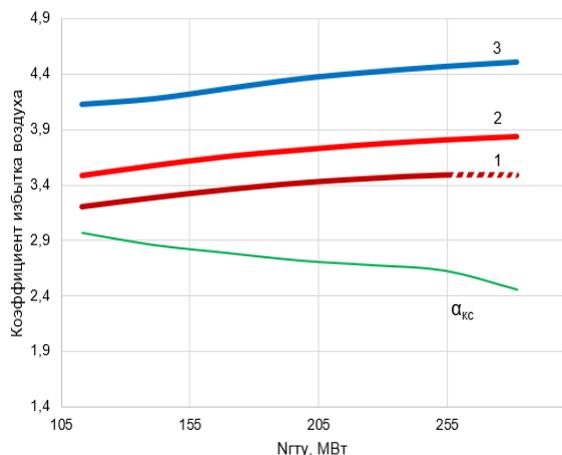


Рис. 3. Оценка устойчивости процесса горения в камере сгорания при изменении электрической мощности: 1 –  $\alpha_{ср}$  при  $T_{нв} = +30$  °С; 2 –  $\alpha_{ср}$  при  $T_{нв} = +15$  °С; 3 –  $\alpha_{ср}$  при  $T_{нв} = -12$  °С;  $\alpha_{кс}$  – коэффициент избытка воздуха в камере сгорания при  $T_{нв} = +30$  °С

Необходимо отметить, что в случае работы ГТУ с поддержанием значения  $T_{yx}$  на уровне 570 °С и  $T_{нв} = +30$  °С (рис. 3, график 1) электрическая мощность  $N_{ГТУ}$  будет на уровне около 257,5 МВт при 100 %-ном открытии ВНА компрессора.

С учетом полученных результатов исследований возникает отдельный интерес к оценке устойчивости горения в КС при работе ГТУ без поддержания значения  $T_{yx}$  в одном из самых сложных режимах ее работы (при  $T_{нв} = +30$  °С) и двух вариантах нагрузки: минимальной, что соответствует минимально возможному положению ВНА ( $\alpha_{ВНА} = 10,16$  %) (рис. 4), и максимальной, что соответствует открытому состоянию ВНА ( $\alpha_{ВНА} = 100$  %) (рис. 5).

Для ГТУ SGT5-4000F значения уставок срабатывания предупредительной сигнализации по понижению и повышению  $T_{yx}$  составляют соответственно 520 °С (при условии погасания одной горелки) и 620 °С (со значением по любому из датчиков), а значения уставок на срабатывание защиты по ее понижению и повышению составляют соответственно 520 °С (при условии погасания двух или более горелок) и 660 °С (со значениями по трем из шести датчиков) [4]. Работа ГТУ в диапазонах предупредительных сигнализаций отмечена на рис. 4, 5 отдельной зоной.

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что в случае, когда ВНА компрессора находится в максимально возможном закрытом состоянии (рис. 4), устойчивое горение в КС протекает во всем диапазоне тестируемых нагрузок, но из-за ограничений в зна-

чениях  $T_{yx}$  безопасная работа ГТУ будет происходить в области нагрузок от 95 до 120 МВт.

В варианте работы ГТУ, когда ВНА компрессора находится в полностью открытом состоянии (рис. 5), в областях значений электрической мощности от 95 до 175 МВт происходит срыв горения ( $\alpha_{ср} < \alpha_{кс}$ ), а при повышении нагрузки стабильность горения увеличивается, при этом значение  $T_{yx}$  становится близким к оптимальному (расчетному) уровню. Несмотря на то что работа ГТУ при электрической нагрузке от 95 до 230 МВт невозможна (в силу требований к значениям  $T_{yx}$ ), имитационная модель позволяет гипотетически оценивать состояние параметров установки при работе на различных режимах и может быть использована на этапах конструкторского проектирования.

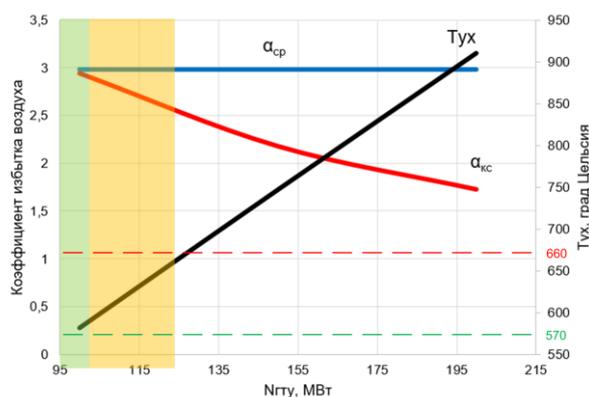


Рис. 4. Оценка устойчивости процесса горения в камере сгорания при максимально возможном закрытом ВНА компрессора и  $T_{нв} = +30$  °С

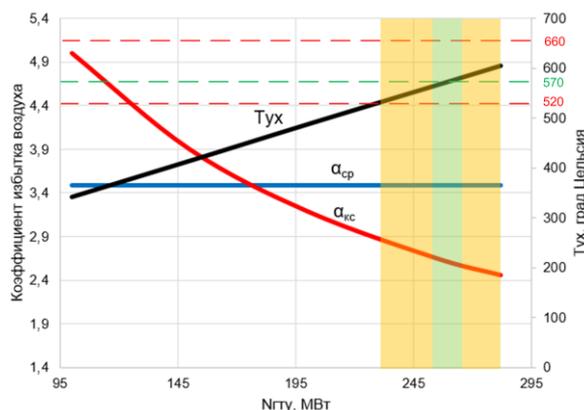


Рис. 5. Оценка устойчивости процесса горения в камере сгорания при открытом ВНА компрессора и  $T_{нв} = +30$  °С

Рассмотрим также влияние еще одного начального параметра для ГТУ – изменения относительной влажности воздуха (рис. 6), поступающего в компрессор.

Повышенная влажность воздуха может привести к образованию конденсата на поверхности внутренних стенок камеры сгорания и других частях ГТУ, что негативно скажется на работе турбины.

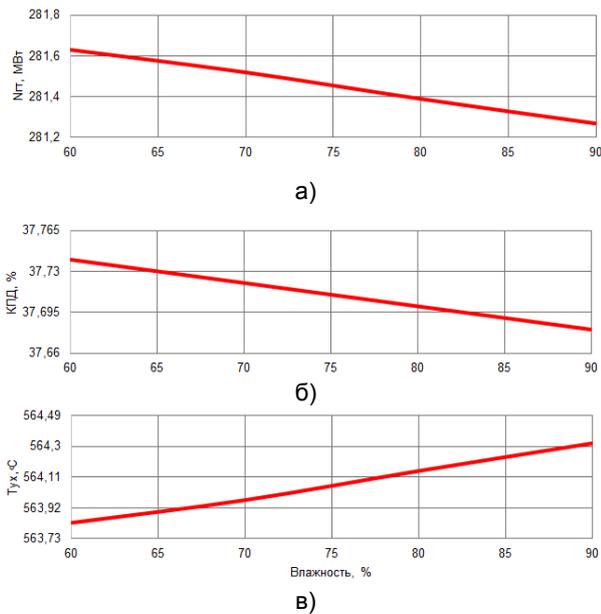


Рис. 6. Зависимость параметров ГТУ от относительной влажности воздуха: а – электрической мощности; б – КПД; в – температуры уходящих газов за ГТУ

В ходе исследования было получено, что изменение относительной влажности наружного воздуха на 10 % приводит к изменению следующих параметров:

- мощность ГТУ падает в среднем на 0,1 МВт на каждые 10 % повышения влажности;
- КПД уменьшается на 0,01 %;
- температура уходящих газов возрастает на 0,2 °С.

Таким образом, разработанная имитационная модель ГТУ позволяет исследовать влияние влажности воздуха, поступающего в компрессор (по сравнению с влиянием температуры наружного воздуха, оно не столь критичное).

**Выводы.** Разработанные математическая и имитационная модели ГТУ SGT5-4000F позволяют оценивать основные показатели ГТУ в широком диапазоне нагрузок, а также дополнительно оценивать близость режима работы компрессора к границе устойчивости, определять границы процесса устойчивого горения в камере сгорания, оценивать полноту сгорания топлива и определять параметры топливовоздушной смеси, пребывающей в камере сгорания, с учетом климатических факторов внешней среды. Кроме того, приведенные результаты имитационного моделирования продемонстрировали адекватность и перспективность использования разработанной модели ГТУ в качестве инструментального средства на стадии технического проектирования.

Проведенные экспериментальные исследования работы ГТУ в области рабочего диапазона нагрузки от 113 до 282 МВт и в диапазонах изменений температуры наружного воздуха от –12 до 30 °С показали, что горение в камере сгорания протекает стабильно во всем диапазоне рабочих нагрузок.

Полученные результаты также могут быть полезны при разработке эффективных систем автоматического управления ГТУ на стадиях функционального (алгоритмического) проектирования АСУТП.

#### Список литературы

1. **Газотурбинные** энергетические установки: учеб. пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка; под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – 428 с.
2. **Lefebvre A.H., Ballal D.R.** Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. Third Edition. – Boca Raton, United States: CRC Press, 2010. – 560 p.
3. **Башуров Б.П.** Техническая эксплуатация судовых энергетических установок: учеб. пособие. – Новороссийск: МГА им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2007. – 196 с.
4. **Инструкция** по эксплуатации газотурбинной установки SGT5-4000F, филиал ПАО «ОГК-2»-Киришская ГРЭС. – Кириши, 2017. – 191 с.
5. **Среда** динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Цекатуров. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
6. **Введение** в работу с программным обеспечением. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech.: учеб. пособие. Ч. 1. – М.: ООО «ЗВ Сервис», 2017. – 109 с.
7. **Муравьев И.К., Шинкевич Д.А.** Разработка математической модели газотурбинной установки с малозмиссионной камерой сгорания и особенности ее интеграции в среду SimInTech // Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетические системы» (ICES-2022). Белгород, 2022. – 2022. – Т. 7, № 1. – С. 27–36.
8. **Муравьев И.К., Тверской Ю.С.** Исследование на математической модели эффективности совместной работы газовой и паровой турбин энергоблока с ПГУ // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 1. – С. 53–57.
9. **Буданов В.А., Григорьев Е.Ю.** Проектировочный расчет камеры сгорания газовой турбины: учеб.-метод. пособие / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 62 с.
10. **Коломиец П.В.** Расчет горения топлива: метод. указания к практическим занятиям по дисциплине «Химмотология». – Тольятти: ТГУ, 2011. – 38 с.
11. **Теория** авиационных двигателей. Теория лопаточных машин: учебник для студентов, обучающихся по специальности «Эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» / П.К. Казанджан, Н.Д. Тихонов, А.К. Янко; под ред. П.К. Казанджана. – М.: Машиностроение, 1983. – 217 с.
12. **Клячкин А.Л.** Эксплуатационные характеристики авиационных газотурбинных двигателей: учеб. пособие. – М.: Транспорт, 1967. – 196 с.
13. **Комаров О.В.** Тепловые и газодинамические расчеты газотурбинных установок: учеб.-метод. пособие / О.В. Комаров, В.Л. Блинов, А.С. Шемякин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 164 с.
14. **Гостелову Дж.** Аэродинамика решеток турбомашин: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 392 с.

## References

1. Tsanev, S.V., Burov, V.D., Zemtsov, A.S., Osyka, A.S. *Gazoturbinnye energeticheskie ustanovki* [Gas turbine power plants]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2011. 428 p.
2. Lefebvre, A.H., Ballal, D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. Third Edition. Boca Raton, United States: CRC Press, 2010. 560 p.
3. Bashurov, B.P. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Technical operation of ship power plants]. Novorossiysk: MGA imeni admirala F.F. Ushakova, 2007. 196 p.
4. *Instruktsiya po ekspluatatsii gazoturbinnoy ustanovki SGT5-4000F* [Operating instructions for the gas turbine unit SGT5-4000F]. Kirishi, 2017. 191 p.
5. Kartashov, B.A., Shabaev, E.A., Kozlov, O.S., Shchekaturov, A.M. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech: praktikum po modelirovaniyu sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Environment for dynamic modeling of technical systems SimInTech: Workshop on modeling automatic control systems]. Moscow: DMK Press, 2017. 424 p.
6. *Vvedenie v rabotu s programmym obespecheniem. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech* [Introduction to working with software. Environment for dynamic modeling of technical systems SimInTech]. Moscow: OOO «ZV Servis», 2017. 109 p.
7. Murav'ev, I.K., Shinkevich, D.A. *Razrabotka matematicheskoy modeli gazoturbinnoy ustanovki s maloemissionnoy kameroy sgoraniya i osobennosti ee integratsii v sredu SimInTech* [Development of a mathematical model of a gas turbine plant with a low-emission combustion chamber and features of its integration into the SimInTech environment]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energeticheskie sistemy», Belgorod* [Proceedings of VI International scientific-technical conference "Power systems", Belgorod], 2022, vol. 7, no. 1, pp. 27–36. DOI: 10.34031/ES.2022.1.003.
8. Murav'ev, I.K., Tverskoy, Yu.S. *Issledovanie na matematicheskoy modeli effektivnosti sovmestnoy raboty gazovoy i parovoy turbin energobloka s PGU* [Research on the mathematical model of the effectiveness of the joint operation of gas and steam turbines of a power unit with a CCGT]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2016, no. 1, pp. 53–57.
9. Budanov, V.A., Grigor'ev, E.Yu. *Proektirovochnyy raschet kamery sgoraniya gazovoy turbiny* [Design calculation of the combustion chamber of a gas turbine]. Ivanovo, 2015. 62 p.
10. Kolomiets, P.V. *Raschet goreniya topliva* [Calculation of fuel combustion]. Tol'yatti: TGU, 2011. 38 p.
11. Kazandzhan, P.K., Tikhonov, N.D., Yanko, A.K. *Teoriya aviatsionnykh dvigateley. Teoriya lopatochnykh mashin* [Theory of aircraft engines. Theory of blade machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 217 p.
12. Klyachkin, A.L. *Ekspluatatsionnye kharakteristiki aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Performance characteristics of aircraft gas turbine engines]. Moscow: Transport, 1967. 196 p.
13. Komarov, O.V., Blinov, V.L., Shemyakinskiy, A.S. *Teplovye i gazodinamicheskie raschety gazoturbinnnykh ustanovok* [Thermal and gas dynamic calculations of gas turbine plants]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2018. 164 p.
14. Gostelou, Dzh. *Aerodinamika reshetok turbomashin* [Aerodynamics of turbomachine gratings]. Moscow: Mir, 1987. 392 p.