© Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., Титов А.В.

(cc) BY

УДК 620.9 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-131-143**

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ

Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., Титов А.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
nova-mara0607@list.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ. Недостаточно широкая область применения газотурбинных установок (ГТУ) связана с отсутствием повсеместной доступности газовых магистралей, поставляющих основное топливо – природный газ. Интерес к альтернативным видам топлива и поиск наиболее подходящих из них с целью перехода с традиционных источников энергии интенсивно возрастал с течением времени. В настоящее время существуют методы газификации твердого топлива, расширяющие не только возможности использования самого топлива, но и раздвигающие границы применяемости ГТУ как в плане производственной специализации, так и географического расположения. Уголь является самым доступным и распространенным в мире традиционным топливом, но его использование на современных энергообъектах ограничено в связи с всемирной политикой декарбонизации энергетики. Газификация угля позволяет повысить энергетические характеристики и уменьшить количество выбросов вредных веществ в атмосферу при применении угля. ЦЕЛЬ. Определение эффективности и целесообразности использования генераторного газа, получаемого из угля, в ГТУ, а также рассмотрение возможности ее модернизации. МЕТОДЫ. Для достижения поставленной цели, будет использоваться автоматизированная система газодинамических расчетов энергетических турбомашин (АС ГРЭТ), которая позволяет производить численные исследования на математической модели газотурбинной установки при изменении характеристик с применением модуля аппроксимации компонентного состава топлива. Исследования проводятся при изменении электрической нагрузки газотурбинной установки типа НК-16-18 СТ в диапазоне от 15 до 18 МВт. РЕЗУЛЬТАТЫ. По итогам исследования были получены зависимости суммарного часового и удельного расхода топлива, эффективного коэффициента полезного действия (КПД), температуры в камере сгорания и на выходе из силовой турбины от изменения электрической нагрузки газотурбинной установки. Имея более низкую теплотворную способность, ожидаемо синтез-газ снижает электрическую эффективность ГТУ, что выражается в уменьшении КПД на 3–4,5 %. Одновременно с этим, повышается расход топлива примерно в 4–5 раз, что зависит от компонентного состава топлива. При этом значения температур на выхлопе газовой турбины изменяется на 26 до 37 °С. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование синтез-газа как топлива для газотурбинной установки может обеспечивать достаточную эффективность в генерации электрической энергии, однако его применение рационально исключительно в ситуациях отсутствия или недоступности традиционного газообразного топлива. Развитие технологий газификации повысит эффективность при использовании и снизит стоимость производства синтез-газа. Это позволит внедрять технологии газификации на действующих объектах и расширит область применения синтез-газа, что обеспечит повышенный интерес к данному направлению у потенциальных инвесторов.*

Ключевые слова: *газотурбинная установка; синтез-газ; уголь; генераторный газ, газификация; газодинамические расчеты; математическое моделирование.*

Для цитирования: Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., Титов А.В. Перспективы использования синтез-газа в газотурбинных установках // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 131-143. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-131-143.

PERSPECTIVES OF USING SYNGAS IN GAS TURBINE PLANTS

Novoselova MS., Mingaleeva GR., Marin GE., Titov AV.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
nova-mara0607@list.ru

Abstract: *RELEVANCE. The insufficiently wide scope of gas turbine plants (GTP) is associated with the lack of widespread availability of gas pipelines supplying the main fuel – natural gas. Interest in alternative fuels and the search for the most suitable ones in order to switch from traditional energy sources has increased intensively over time. Currently, there are methods of gasification of solid fuels that expand not only the possibilities of using the fuel itself, but also pushing the boundaries of the applicability of GTP both in terms of production specialization and geographical location. Coal is the most affordable energy resource in the world, due to its prevalence, but its limited use in modern energy facilities is due to the worldwide policy of decarbonization of energy. Coal gasification makes it possible to increase energy characteristics and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere when using coal. THE PURPOSE. Determination of the efficiency and expediency of using generator gas obtained from coal in gas turbine plant, as well as consideration of the possibility of its modernization. METHODS. To achieve set goal, an automated system of gas dynamic calculations of energy turbomachines (AS GDCET) will be used, which will calculate a mathematical model of a gas turbine installation and conduct numerical studies when characteristics change, as well as using a module for approximating the component composition of fuel. The research is carried out when the electric load of a gas turbine plant of the NK-16-18 ST type changes in the range from 15 to 18 MW. RESULTS. According to the results of the study, the dependences of the total hourly and specific fuel consumption, effective efficiency, temperature in the combustion chamber and at the outlet of the power turbine on changes in the electric load of the gas turbine installation were obtained. Having a lower calorific value, the expected synthesis gas reduces the electrical efficiency of the gas turbine engine, which is expressed in a decrease in efficiency by 3-4.5%. At the same time, fuel consumption increases by about 4-5 times, which depends on the component composition of the fuel. At the same time, the temperature values at the exhaust of the gas turbine change by 26-37 °C. CONCLUSION. The use of synthesis gas as fuel for a gas turbine plant can provide sufficient efficiency in generating electric energy, but its use is rational only in situations of absence or unavailability of traditional gaseous fuels. The development of gasification technologies will increase the efficiency of use and reduce the cost of synthesis gas production. This will allow the introduction of gasification technologies at existing facilities and expand the scope of synthesis gas applications, which will ensure increased interest in this area among potential investors.*

Keywords: *gas turbine plant; synthesis gas; coal; generator gas; gasification; gas dynamic calculations; mathematical modeling.*

For citation: Novoselova MS., Mingaleeva GR., Marin GE., Titov AV. Perspectives of using syngas in gas turbine plants. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 131-143. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-131-143.

Введение (*Introduction*)

Наращивание производственных мощностей в сфере энергетики требует увеличения потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Учитывая такую тенденцию и факт того, что запасы ископаемых ресурсов конечны, формируется проблема поиска альтернативных ТЭР. При поиске альтернативы традиционным ископаемым энергоресурсам руководствуются некоторыми критериями соответствия:

– экономичность производства топливного ресурса;

– сопоставимость энергетических характеристик с традиционным топливом;

– экологичность использования нетрадиционного топлива, связанного с выбросами вредных веществ, в частности NO_X и CO_2.

Однако, в данный момент нет ни одной реальной альтернативы природному газу, которая соответствовала бы всем критериям. В основном проблема состоит в высокой стоимости производства энергоресурса и относительно низкой теплотворной способности.

В настоящее время внимание приковано к новым перспективным технологиям, которые с развитием техники в состоянии конкурировать с углеводородным топливом: биотопливо, синтез-газ, водородное топливо [1-3].

Синтез-газ может иметь различный состав, зависящий от метода производства и исходного сырья, которым может быть как природный газ или метан, так и уголь и органические отходы. Но основной набор компонентов, традиционно присутствующих в генераторном газе, состоит из водорода, моно и диоксида углерода, причем содержание последнего кратно меньше остальных компонентов.

Использование биотоплива и получение из него синтез-газа путем пиролиза открывает возможность утилизации сельскохозяйственных, производственных и бытовых отходов, сохраняя состояние окружающей среды и обширные площади, выделяемые для хранения отходов [4, 5].

Уголь, несмотря на всю сложность его использования, до сих пор занимает большую часть в мировом потреблении энергоресурсов, превышающую 27% [6]. Однако значительная часть развитых стран, проводя мероприятия в направлении декарбонизации энергетики, предпринимает попытки к снижению потребления угля. Преимуществами данного вида топлива является низкая стоимость, доступность, транспортабельность и удобство хранения. К недостаткам относится большое количество не утилизируемых отходов в виде шлака, большой концентрации CO_2 в дымовых газах и необходимость тонкой и многоэтапной топливоподготовки для обеспечения эффективного процесса горения.

Так, авторы работы [7] отмечают сильную зависимость энергетического сектора от использования угля и не менее сильное его влияние на экономику Китая. Экономический анализ энергетики страны привел авторов к выводу, что даже при нарастающем интересе к альтернативной энергетике у инвесторов, развитие данной отрасли затруднено ее внутренними рисками, выраженными в взаимосвязи между ценами на нефть и востребованностью альтернативных источников энергии, а также в отсутствии государственной стимуляции инвестирования в альтернативную энергетику. Решение данной проблемы авторы работы видят в стабилизации цен на энергетический уголь, а также в снижении побочных рисков экологически чистой энергетики.

К такому же выводу приходят и авторы статьи [8], связывая продолжение использования угля в энергетике, несмотря на экологический урон окружающей среде, не только с экономическими факторами, но и сложностью выведения из эксплуатации пылеугольных станций в странах с развивающейся экономикой, которые также являются странами, чья доля в эксплуатации таких станций по миру достаточно велика. Проблемы прекращения использования угля в энергетике, выделяемые авторами исследования, разнообразны: увеличение безработицы, снижение стоимости недвижимости в районе выведения станции из эксплуатации и затраты на сам вывод, перебои в работе электросети и другие.

Литературный обзор *(Literature review)*

В настоящее время газификацию угля во многом воспринимают как способ конвертации низкосортного и дешевого твердого топлива в высококалорийное топливо с высоким содержанием водорода, что избавляет процесс производства энергии от недостатков использования твердого топлива (угля). Процесс газификации заключается в частичном окислении углеродсодержащего топлива с использованием в качестве газифицирующих агентов кислорода, воздуха, водяного пара, паровоздушной или парокислородной смеси.

Можно выделить несколько основных методов газификации угля: в плотном слое с прямоточным и противоточным подводом дутья; в кипящем слое инертного наполнителя с его циркуляцией или без нее; в потоке мелкодисперсного угля с сухим или жидким шлакоудалением. Помимо выделенных, в [9-11] отмечаются следующие современные методы: процесс в шлаковом расплаве; каталитическая газификация; гидрогазификация; газификация в циклонных и многоступенчатых газогенераторах.

Газификация в кипящем слое состоит в следующем: нагретый до высоких температур измельченный уголь проходит через слой кипящего катализатора при подаче горячего воздуха или пара. Такой метод обладает высоким КПД и делает возможным использование низкосортных видов топлива, а также создание агрегатов практически любой требуемой мощности [12, 13].

Процесс газификации угля в потоке включает стадию неполного сжигания угля в присутствии кислорода или смеси кислорода с водяным паром. Важные особенности этого процесса – отсутствие в реакторе поверхностей для генерации пара, размещение горелок в

нижней части газификатора, наличие дожимного участка вверху, восходящий поток угольного порошка и газа [14]. Температура в камере сгорания достигает 2020°С, а на выходе генератора газа – от 1450 до 1650 °С.

В работе [15] анализируются затраты, необходимые для подготовки углей разных марок к поточной газификации. Выводами, сделанными в результате проведенного исследования, стали низкие затраты при пылеприготовлении газового угля с помощью мельниц-вентиляторов, составляющие 33 кВт, однако при использовании иных углеизмельчителей значительно экономичнее происходит подготовка бурого угля к поточной газификации.

Применение генераторного газа в энергетике предполагает в первую очередь использование его в качестве топлива для газотурбинных установок, причем как для отдельных генерирующих агрегатов, так и для ГТУ в составе парогазовых установок [16, 17].

Например, авторы работы [18] утверждают, что применение очищенного синтез-газа позволит практически полностью избавиться от выбросов вредных веществ в атмосферу. При этом с повышением качества топлива для сжигания уменьшается стоимость производства электроэнергии.

В работе [19] проводилось сравнение работы ГТУ на топливе различного состава, в том числе и на синтез-газе. Исследование привело к выводам о невозможности надежной и безопасной эксплуатации газотурбинной установки без внесения изменений в ее конструкцию или параметры работы камеры сгорания. Помимо этого, происходит выброс в атмосферу большего количества NO_X при снижении в 3 раза выбросов CO_2.

Подобное исследование проводилась и в статье [20], где рассматривалась работа газотурбинной установки большой мощности SGT5-8000H, мощностью 450 МВт и с КПД брутто 41%. В результате были выявлены недостатки работы данной ГТУ как на природном газе, так и на синтез-газе, причем авторы связывают неэффективность использования как природного газа, так и синтез-газа с процессом горения топлива в камере сгорания и добавлением избыточного количества воздуха, влияние которого в случае использования синтез-газа как топлива для ГТУ только увеличивается.

Таким образом, вопрос о возможности и целесообразности использования синтез-газа в газотурбинных установках к настоящему моменту не решен, требуются дальнейшие исследования в этой области.

Целью данной работы является оценка возможности использования генераторного газа, полученного в результате поточной газификации угля различных марок.

Рассмотрение эксплуатационных характеристик ГТУ при работе на синтез-газе позволит расширить перечень используемых в установках видов топлива, увеличивая при этом область их применения. При схожих значениях данных характеристик установки, использующей различный топливный газ, можно говорить об оправданности использования газификации угля для энергообеспечения удаленного района, в котором отсутствует доступ к магистральному природному газу.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

На рис. 1 показана схема работы газотурбинной установки с внутрицикловой газификацией угля, основанная на подобных схемах, представленных в патентах [21, 22].

Воздух, забираемый из окружающей среды, после сжатия в осевом компрессоре разделяется на два потока, один из которых продолжает работать в установке, а другой поступает в установку разделения воздуха для получения кислорода, который отправляется в газогенератор, где служит окислителем для процесса поточной газификации угля. После выработки генераторный газ охлаждается, далее он направляется для сжигания в камеру сгорания.

При этом идея изобретения [21] состоит в использовании всех компонентов, участвующих в процессе газификации, в технологическом процессе производства электроэнергии для снижения экологического вреда, причиняемого процессом газификации. В то же время, в полезной модели [22] предлагается совместное использование топливных элементов, работающих на синтез-газе, и газотурбинных установок. Однако предлагаемые схемы достаточно сложны, и требуется технико-экономическое обоснование для подтверждения целесообразности их использования. В данной работе рассматривается достаточно простая принципиальная схема получения генераторного газа и использования его в ГТУ.

Для сравнительного анализа составов топлива (табл. 1) используется природный газ и осушенный синтез-газ [23], полученный при кислородной газификации в потоке следующих

углей различных марок: Бейский Д, Ирша-Бородинский Б, Соколовский ДГ, Олонь-Шибирский Д, Ургальский Г.

Исследование проводилось на математической модели газотурбинной установки типа НК-16-18 СТ при помощи автоматизированной системы газодинамических расчетов энергетических турбомашин (АС ГРЭТ) [24, 25].

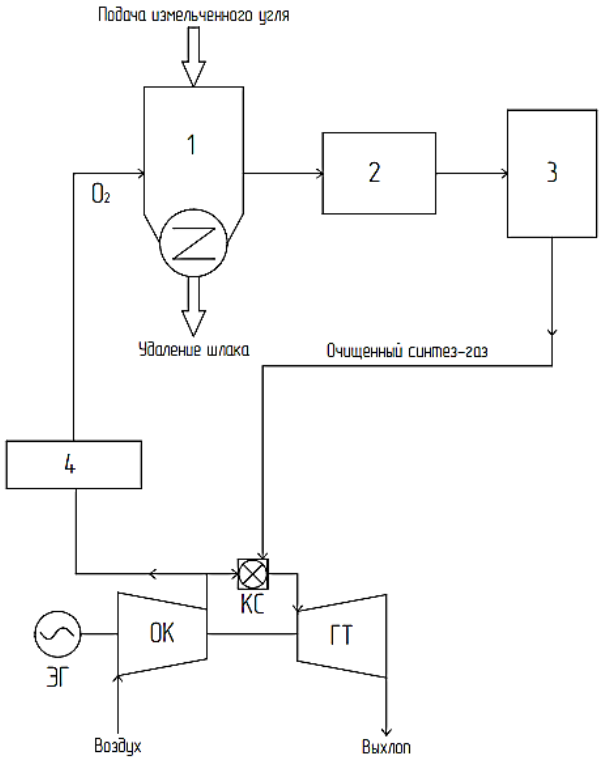

Рис. 1. Схема работы ГТУ с газификатором: *1* – газогенератор; *2* – охладитель газогенератора; *3* – фильтр; *4* – установка расщепления воздуха; *ОК* – осевой компрессор; *КС* – камера сгорания; *ГТ* – газовая турбина; *ЭГ* – электрогенератор.

Fig. 1. Scheme of work of the GTP with a gasifier: 1 – gas generator; 2 – gas cooler; 3 – filter; 4 – air splitting unit; ОК – axial compressor; КС – combustion chamber; ГТ – gas turbine; ЭГ – electric generator.

**Источник: составлено автором. Source: compiled by the author*

Таблица 1

Table 1

Компонентый состав топливного газа

The component composition of the fuel gas

Вид топлива	Компоненты, % об.							
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	N_2	CO_2	CO	H_2
Природный газ	98,6	0,12	0,02	0,1	0,1	1,01	–	–
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	–	–	–	–	–	3,82	54,6	41,6
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	–	–	–	–	–	2	48,2	49,8
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	–	–	–	–	–	2,69	53,6	43,8
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	–	–	–	–	–	3,39	62,1	34,5
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	–	–	–	–	–	3,9	54,5	41,6

**Источник: составлено автором* *Source: compiled by the author*

Исследуемая ГТУ типа НК-16-18 СТ состоит из компрессоров низкого и высокого давления, камеры сгорания и трех турбин: высокого и низкого давления, а также свободной силовой турбины. Производителем были указаны следующие технические характеристики, которые послужат входными данными для получения адекватной математической модели:

– частота вращения: 3950 об/мин;

– расход воздуха на ходе в установку: 102 кг/с;

– электрическая мощность при номинальном режиме: 18 МВт;

– температура в камере сгорания при номинальном режиме: 1147 К;

– степень сжатия в компрессорах низкого и высокого давления: 10,3.

Принятые составы газов пересчитываются в условные формулы для дальнейшего их использования в модуле аппроксимации компонентного состава в АС ГРЭТ посредством следующей методики, результаты расчета по которой сводятся в таблицу 2.

1. При задании компонентного состава в объемном эквиваленте необходимо перевести его в состав по массе смеси.

2. Определяется число атомов *i*-го элемента в условной молекуле:

$$b_{in} = 100 \cdot \frac{g_i}{\mu_i}, \quad (1)$$

где g_i – массовая доля *i*-го химического вещества в компоненте; μ_i – молярная масса *i*-го элемента.

3. Далее рассчитывается количество атомов *i*-го вещества в условной молекуле при помощи формулы:

$$b_{ik} = \sum_{n=1}^{r} b_{in} n_n, \quad (2)$$

где n_n – количество молей *n*-го химического вещества в условном моле компонента.

4. Находится энтальпия топливного газа, соответствующая компонентному составу топлива, после чего полученные условные формулы и энтальпия топлива сводятся в таблицу 2.

Таблица2
Table 2

Условные формулы топлива
Conditional fuel formulas

Вид топлива	Компоненты				Энтальпия, кДж/кг
	C	H	N	O	
Природный газ	6,1227	24,1619	0,0146	0,1358	-3253,94
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	3,2805	4,6736	–	3,4951	-5186,36
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	3,2639	6,4759	–	3,394	-4488,884
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	3,1592	4,9162	–	3,3103	-5028,981
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	3,3455	3,5243	–	3,5187	-5857,01
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	3,2788	4,6769	–	3,4979	-5219,445

**Источник: составлено автором* **Source: compiled by the author*

После аппроксимации состава топлива в модуле подготовки входных данных в автоматизированной системе ГРЭТ были найдены основные энергетические характеристики газов, такие как низшая теплота сгорания и стехиометрический коэффициент, иллюстрирующий потребное количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, которые необходимы для дальнейших расчетов математической модели газотурбинной установки (таблица 3).

Таблица 3
Table 3

Полученные энергетические характеристики топлива
The obtained fuel energy characteristics

Вид топлива	Низшая теплота сгорания H_u, кДж/кг	Стехиометрическое соотношение L_0
Природный газ	49873,2	16,6801
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	13354,8	3,7342
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	16164,2	4,4041
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	14126,9	3,9424
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	11551,7	3,4106
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	13314,1	3,7301

**Источник: составлено автором* **Source: compiled by the author*

Исследование математической модели выполнено в АС ГРЭТ, расчет в которой производится посредством системы трансцендентных уравнений [24, 25]:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) = y_1, \\ f_2(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) = y_2, \\ ..... \\ f_n(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) = y_n. \end{cases} \quad (3)$$

где f_j (j = 1, 2, …, n) – некоторые функции отличные от нуля на величину невязки y_j (j = 1, 2, …, n) вследствие приближенного задания значений независимых переменных (варьируемых параметров) x_i (i = 1, 2, …, n).

Эксплуатационные характеристики в программе рассчитываются по следующим формулам:

1. Удельный расход топлива:

$$q_m^{/} = \frac{H_{вг}^{*} - H_1^{*}}{Hu \cdot \eta_{кс} - H_{чпс}^{*} + H_0}, \quad (4)$$

где $H^{*}_{вг}$, H^{*}_{1} – энтальпии воздуха на входе и выходе из камеры сгорания соответственно, кДж/кг; H_u – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $\eta_{кс}$ – коэффициент полноты сгорания; $H^{*}_{чпс}$ – энтальпия чистых продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания, кДж/кг; H_0 = 646,944 кДж/кг – поправочная величина.

2. Суммарный часовой расход топлива:

$$G'_{т} = 3600 \cdot G_1 \cdot q'_{т.}, \quad (5)$$

где G_1 – расход воздуха на входе в камеру сгорания, кг/с.

3. Эффективный КПД установки:

$$\eta_{эфф} = \frac{3600 \cdot N_e}{G_T^{/} \cdot Hu}, \quad (6)$$

где N_e – электрическая мощность, вырабатываемая установкой, кВт.

Результаты и обсуждение *(Results and discussions)*

В результате численных исследований математической модели газотурбинной установки типа НК-16-18 СТ получены значения суммарного часового расхода топлива, эффективного КПД и удельного расхода топлива на 1 МВт вырабатываемой мощности. Численные исследования проводились при снижении электрической нагрузки на 17% до 15 МВт.

Наиболее близким по расходу топлива к природному газу является синтез-газ, произведенный из угля марки Ирша-Бородинский Б, наиболее удаленным же по этим характеристикам оказался синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д (рис. 2). Разница между этими синтез-газами составляет (в зависимости от электрической нагрузки) 5000-6000 кг/ч. Экономичность рассматривается с точки зрения затрат топлива и получаемого коэффициента полезного действия.

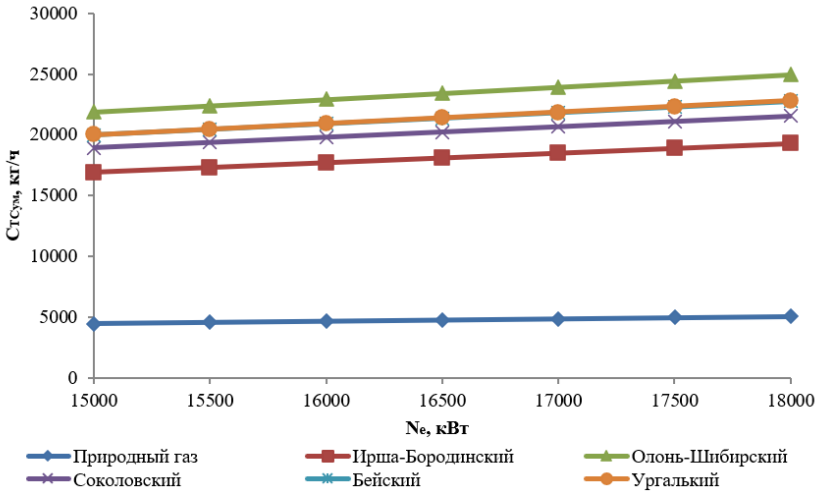

Рис. 2. Изменение суммарного часового расхода топлива в зависимости от электрической нагрузки

Fig. 2. Change in the total hourly fuel consumption depending on the electrical workload

**Источник: составлено автором*

**Source: compiled by the author*

Эффективный КПД зависит от количества вырабатываемой электрической энергии, низшей теплоты сгорания и расхода топлива. Результаты исследования, показанные на рисунке 3, указывают на снижение КПД газотурбинной установки при переходе к использованию синтез-газа из углей разных марок: наименьшее падение наблюдается для марки Олонь-Шибирский Д (в среднем около 3%), наибольшее – для марки Ирша-Бородинский Б (усредненно 4,6%), остальные марки показывают примерно одинаковое среднее снижение КПД, равное 4,14%.

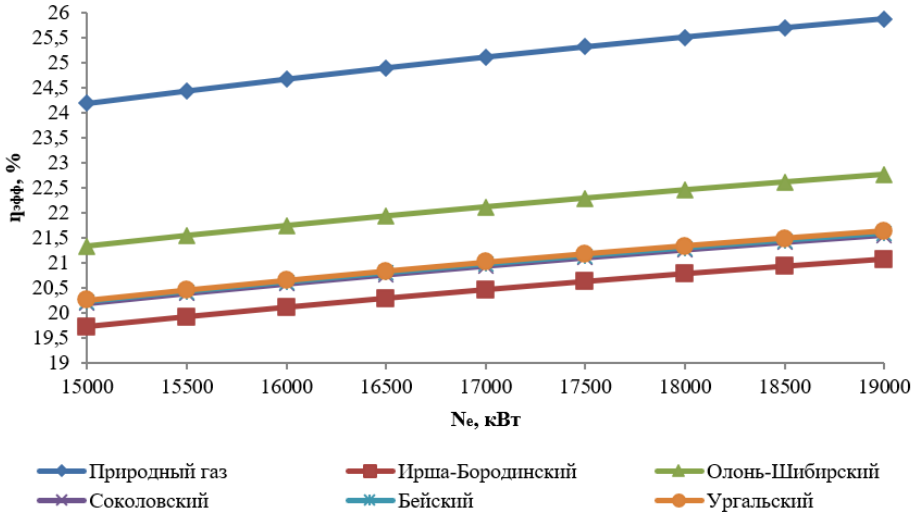

Рис. 3. Изменение эффективного КПД в зависимости от электрической нагрузки
**Источник: составлено автором*

Fig. 3. Change in effective efficiency factor depending on the electrical workload
**Source: compiled by the author*

Также отмечается большая экономичность работы ГТУ на синтез-газе, произведенном из марки Ирша-Бородинский Б, при расчете удельного расхода топлива, учитывающий эффективность его использования через отношения затрат топлива к производимой электроэнергии (рис. 4). Так, для марки Ирша-Бородинский Б увеличение расхода составило 380% от расхода природного газа, при этом для марок Бейский Д, Соколовский ДГ и Ургальский Г это значение равняется 447%, 424% и 448% соответственно, а для марки Олонь-Шибирский Д – 490%.

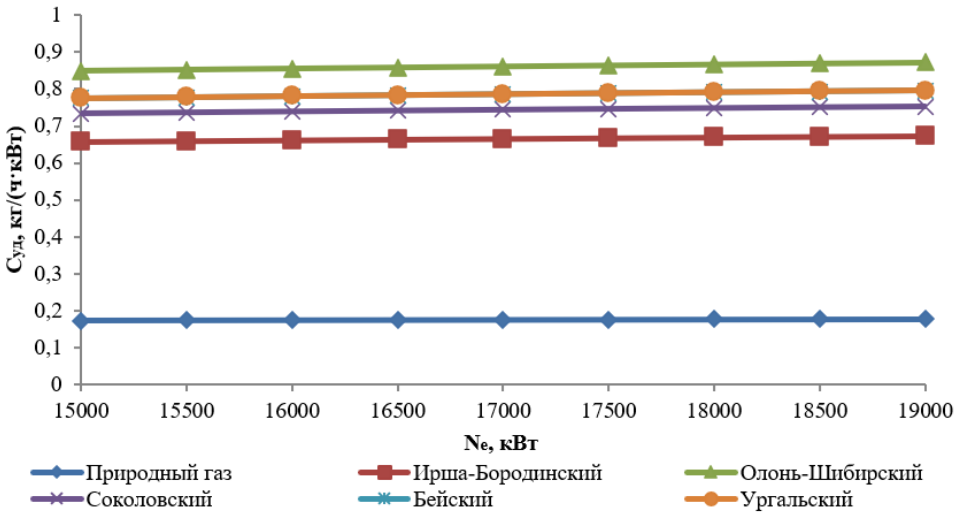

Рис. 4. Изменение удельного расхода топлива в зависимости от электрической нагрузки

Fig. 4. Change in specific fuel consumption depending on the electrical workload

**Источник: составлено автором*

**Source: compiled by the author*

Снижение температуры сгорания топлива при эксплуатации синтез-газа достаточно незначительно (26-37 °С) в зависимости от электрической нагрузки ГТУ и используемой марки угля (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Изменение температуры горения топлива $T_г$*(°С) в камере сгорания в зависимости от электрической нагрузки

The change in the combustion temperature of the fuel T_c (°C) in the combustion chamber depending on the electrical workload*

Вид топлива	Электрическая мощность N_e, кВт						
	18000	17500	17000	16500	16000	15500	15000
Природный газ	910,6	900,4	890,1	879,8	869,5	859,2	848,8
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	874,3	865,0	855,7	846,4	837,0	827,6	818,3
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	877,4	868,1	858,7	849,3	839,8	830,4	820,9
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	875,9	866,6	857,2	847,8	838,5	829,0	819,6
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	874,0	864,8	855,5	846,2	836,8	827,5	818,1
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	874,1	864,9	855,6	846,3	836,9	827,5	818,2

**Источник: составлено автором* **Source: compiled by the author*

Еще менее значимым оказалось в результате исследование падение температуры выхлопных газов, составляющее 13-18 °С (таблица 5). С одной стороны, это означает, что избежать охлаждения уходящих газов не получится, но другой стороны это показывает, что при переходе к работе установки на синтез-газе возможно повышение эффективности за счет использования регенерации.

Таблица 5
Table 5

Изменение температуры выхлопных газов T_4(°С) на выходе из установки в зависимости от электрической нагрузки

The change in exhaust gas temperature T_4 (°C) at the outlet of the plant depending on the electrical workload

Вид топливаё	Электрическая мощность N_e, кВт						
	18000	17500	17000	16500	16000	15500	15000
Природный газ	471,9	464,8	457,7	450,5	443,4	436,3	429,2
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	453,8	447,2	440,6	434,0	427,4	420,8	414,2
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	454,5	447,9	441,3	434,7	428,1	421,4	414,8
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	454,4	447,8	441,2	434,6	428,0	421,3	414,7
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	454,4	447,9	441,2	434,6	428,0	421,4	414,7
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	453,7	447,2	440,5	434,0	427,3	420,7	414,1

**Источник: составлено автором* **Source: compiled by the author*

***Заключение** (Conclusions)*

В сравнении с природным газом, синтез-газ как топливо для газотурбинных установок показывает негативное влияние на рабочие параметры установки. Наиболее близкие к природному газу рабочие характеристики показал синтез-газ, полученный из угля Ирша-Бородинский Б, при этом, сравнивая с синтез-газами, полученным из оставшихся углей, прослеживается негативное влияние на КПД установки. При иллюстрации эксплуатационных характеристик ГТУ, работающей на синтез-газе, полученном из угля Олонь-Шибирский Д, его выбор кажется нерациональным, однако его положительное влияние на КПД делает данные выводы менее однозначными.

Дальнейшее развитие технологий газификации угля и методов его очистки могут повысить энергетические характеристики получаемого синтез-газа, уменьшая потребность в постоянной настройке системы регулирования установок или их конструктивной модернизации. Эксплуатация ГТУ на синтез-газе оказывается целесообразной только в ситуации недоступности магистрального природного газа по экономическим или логистическим причинам.

Литература

1. Хайруллина, А. М. Применение альтернативных видов топлива в энергетике / А. М. Хайруллина, И. Н. Маслов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 16–17 мая 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 139-141.

2. Некрасов, С. А. Снижение издержек на интеграцию возобновляемых источников электроэнергии в энергосистему – путь повышения доступности возобновляемой энергетики / С. А. Некрасов // Теплоэнергетика. – 2021. – № 8. – С. 5-16. – doi: 10.1134/S0040363621070031.

3. Худокормов, Г. А. Экономический рост и альтернативная энергетика: взаимосвязь и противоречия / Г. А. Худокормов // Бизнес. Образование. Право. – 2023. – № 2(63). – С. 30-35. – doi: 10.25683/VOLBI.2023.63.592.

4. Зайченко, В. М. Использование биомассы для получения синтез-газа / В. М. Зайченко, В. В. Кувшинов, Е. Г. Какушина // Энергетические установки и технологии. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 43-47.

5. Макоев, С. О. Разработка когенерационных энергетических систем с применением технологии газификации твердых коммунальных отходов / С. О. Макоев, И. Г. Ахметова, А. М. Фонов // Вестник КГЭУ. – 2022. – Т. 14, № 4(56). – С. 178-194.

6. Filippov, S.P., Keiko, A.V. Coal Gasification: At the Crossroad. TechnologicalFactors. Therm. Eng. 68, pp. 209–220. 2021. doi:10.1134/S0040601521030046

7. Gu, F., Wang, J., Guo, J., & Fan, Y. How the supply and demand of steam coal affect the investment in clean energy industry? Evidence from China. ResourcesPolicy, 69, 101788; 2020. doi: 10.1016/j.resourpol.2020.1017

8. Chattopadhyay, D., Bazilian, M. D., Handler, B., & Govindarajalu, C. Accelerating the coal transition. TheElectricityJournal, 34(2), 106906; 2021. doi: 10.1016/j.tej.2020.106906

9. Савина, М. В. Разработка схемы использования генераторного газа из низкосортного угля в ПГУ / М. В. Савина, С. С. Тимофеева // Вестник КГЭУ. 2021. №2 (50).

10. Козлов, А. Н. Обзор современных тенденций развития технологий газификации твердых топлив / А. Н. Козлов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2021. – № 1. – С. 130-148. – DOI 10.31857/S0002331021010088.

11. Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., Dincer, I. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. InternationalJournalofHydrogenEnergy, 46(50), pp. 25385–25412. 2021. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.08

12. Алексеев, К. Ю. Состояние и перспективы создания в России производства СЖТ из твердых горючих ископаемых (уголь, горючие сланцы, торф) / К. Ю. Алексеев, Е. Г. Горлов, А. В. Шумовский // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2013. – С. 15-24.

13. Беляев, А. А. Автотермическая газификация низкосортных топлив в кипящем слое / А. А. Беляев // Теплоэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 9-13.

14. Watanabe, H., Kurose, R. Modeling and simulation of coal gasification on an entrained flow coal gasifier, Advanced Powder Technology, Volume 31, Issue 7. 2020. Pp. 2733-2741. ISSN 0921-8831. doi: 10.1016/j.apt.2020.05.002.

15. Валиуллин, Б. Р. Режимные параметры системы пылеприготовления для газогенераторов поточного типа / Б. Р. Валиуллин, Г. Р. Мингалеева // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 1(57). – С. 48-57.

16. Лазебный, И. П. Анализ работы термодинамической модели газотурбинной установки на искусственном газе / И. П. Лазебный, А. Ф. Рыжков, В. В. Назарова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых– Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019. – С. 818-821.

17. Исследование паровоздушной двухступенчатой поточной газификации механоактивированного угля / Н. А. Абаимов, А. П. Бурдуков, Е. Б. Бутаков, А. Ф. Рыжков // Физика. Технологии. Инновации : сборник материалов V Международной молодежной научной конференции, посвященной памяти Почетного профессора УрФУ В.С. Кортова, Екатеринбург, 14–18 мая 2018 года. – Екатеринбург: УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019. – С. 131-146.

18. Батенин, В. М. Комплексное энерготехнологическое использование угля / В. М. Батенин, В. М. Масленников, Ю. А. Выскубенко // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 5. – С. 11-17.

19. Марьин, Г.Е. Влияние состава топлива на энергетические параметры газотурбинной установки / Г.Е. Марьин, Б.М. Осипов, П. Зунино, Д.И. Менделеев // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №5.

20. Sorgenfrei, M., & Tsatsaronis, G. Detailed exergetic evaluation of heavy-duty gas turbine systems running on natural gas and syngas. Energy Conversion and Management, 107, pp. 43–51; 2016. doi:10.1016/j.enconman.2015.03.11

21. Патент № 2757404 C1 Российская Федерация, МПК F02C 1/08. Кислородно-топливная энергоустановка с газификацией угля : № 2021114047 : заявл. 18.05.2021 : опубл. 15.10.2021 / И. И. Комаров, Н. Д. Рогалев, В. П. Соколов [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

22. Патент на полезную модель № 123581 U1 Российская Федерация, МПК H01M 8/00. Гибридная углеиспользующая электрохимическая энергоустановка с выводом из цикла диоксида углерода : № 2012131683/07 : заявл. 25.07.2012 : опубл. 27.12.2012 / Д. Г. Григорук, Е. В. Касилова, А. В. Туркин ; заявитель Открытое акционерное общество "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт".

23. Галькеева, А. А. Анализ применения углей различных марок для производства энергии и химических продуктов / А. А. Галькеева, Г. Р. Мингалеева, С. Ю. Горбунов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11-12. – С. 69-79.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683683 Российская Федерация. Оптимизация термодинамических параметров ГТУ : № 2023683160 : заявл. 03.11.2023 : опубл. 09.11.2023 / А. В. Титов, Г. Е. Марьин, А. Р. Ахметшин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683685 Российская Федерация. Решение системы трансцендентных уравнений: № 2023683155 : заявл. 03.11.2023 : опубл. 09.11.2023 / А. В. Титов, Г. Е. Марьин, А. Р. Ахметшин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Авторы публикации

Новоселова Марина Сергеевна – магистр, Казанского государственного энергетического университета

Мингалеева Гузель Рашидовна – д-р техн- наук, заведующий кафедрой «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет

Марьин Георгий Евгеньевич – канд. техн. наук., старший преподаватель кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет

Титов Александр Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет

References

1. Khairullina, A.M. The use of alternative fuels in energy / A.M. Khairullina, I. N. Maslov // International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov, Belgorod, May 16-17, 2023. Belgorod: V.G. Shukhov BSTU, 2023. – pp. 139-141.

2. Nekrasov, S. A. Reducing the cost of integrating renewable energy sources into the energy system – a way to increase the availability of renewable energy / S. A. Nekrasov // Thermal power engineering. – 2021. – No. 8. – pp. 5-16. – doi: 10.1134/S0040363621070031.

3. Khudokormov, G. A. Economic growth and alternative energy: interrelation and contradictions / G. A. Khudokormov // Business. Education. The right. 2023. № 2(63). Pp. 30-35. doi: 10.25683/VOLBI.2023.63.592.

4. Zaichenko, V. M. Using biomass to produce synthesis gas / V. M. Zaichenko, V. V. Kuvshinov, E. G. Kakushina // Power plants and technologies. 2019. Vol. 5, No. 3. pp. 43-47.

5. Makoev, S. O. Development of cogeneration energy systems using solid municipal waste gasification technology / S. O. Makoev, I. G. Akhmetova, A.M. Fonov // Bulletin of the KSPEU. 2022. Vol. 14, No. 4(56). pp. 178-194.

6. Filippov, S.P., Keiko, A.V. Coal Gasification: At the Crossroads. TechnologicalFactors. Therm. Eng. 68, pp. 209–220. 2021. doi:10.1134/S0040601521030046

7. Gu, F., Wang, J., Guo, J., & Fan, Y. How the supply and demand of steam coal affect the investment in clean energy industry? Evidence from China. ResourcesPolicy, 69, 101788; 2020. doi: 10.1016/j.resourpol.2020.1017

8. Chattopadhyay, D., Bazilian, M. D., Handler, B., & Govindarajalu, C. Accelerating the coal transition. TheElectricityJournal, 34(2), 106906; 2021. doi: 10.1016/j.tej.2020.106906

9. Savina, M. V. Development of a scheme for using generator gas from low-grade coal in a PSU / M. V. Savina, S. S. Timofeeva // Bulletin of the KSPEU. 2021. №2 (50).

10. Kozlov, A. N. Review of modern trends in the development of solid fuel gasification technologies / A. N. Kozlov // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2021. No. 1. pp. 130-148. doi: 10.31857/S0002331021010088.

11. Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., Dincer, I. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. InternationalJournalofHydrogenEnergy, 46(50), pp. 25385–25412. 2021. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.08

12. Alekseev, K. Yu. The state and prospects of creating in Russia the production of LPG from solid combustible minerals (coal, oil shale, peat) / K. Yu. Alekseev, E. G. Gorlov, A.V. Shumovsky // Modern science: research, ideas, results, technologies. - 2013. – pp. 15-24.

13. Belyaev, A. A. Autothermal gasification of low-grade fuels in a fluidized bed / A. A. Belyaev // Thermal power engineering. 2009. No. 1. pp. 9-13.

14. Watanabe, H., Kurose, R. Modeling and simulation of coal gasification on an entrained flow coal gasifier, Advanced Powder Technology, Volume 31, Issue 7. 2020. Pp. 2733-2741. ISSN 0921-8831. doi: 10.1016/j.apt.2020.05.002.

15. Valiullin, B. R. Operating parameters of the dust preparation system for in-line gas generators / B. R. Valiullin, G. R. Mingaleeva // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2023. vol. 15, No. 1(57). pp. 48-57.

16. Lazebny, I. P. Analysis of the thermodynamic model of a gas turbine installation on artificial gas / I. P. Lazebny, A. F. Ryzhkov, V. V. Nazarova // Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources. Nuclear Power engineering : materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists – Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2019. pp. 818-821.

17. Investigation of steam-air two-stage in-line gasification of mechanoactivated coal / N. A. Abaimov, A. P. Burdukov, E. B. Butakov, A. F. Ryzhkov // Physics. Technologies. Innovations : collection of materials of the V International Youth Scientific Conference dedicated to the memory of Honorary Professor of UrFU V.S. Kortov, Yekaterinburg, May 14-18, 2018. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2019. pp. 131-146.

18. Batenin, V. M. Complex energy technological use of coal / V. M. Batenin, V. M. Maslennikov, Yu. A. Vyskubenko // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2011. No. 5. pp. 11-17.

19. Maryin, G.E. The influence of fuel composition on the energy parameters of a gas turbine installation / G.E. Maryin, B.M. Osipov, P. Zunino, D.I. Mendeleev // Izvestiya vuzov. Energy problems. 2020. №5.

20. Sorgenfrei, M., & Tsatsaronis, G. Detailed exergetic evaluation of heavy-duty gas turbine systems running on natural gas and syngas. Energy Conversion and Management, 107, pp. 43–51; 2016. doi: 10.1016/j.enconman.2015.03.11

21. Patent No. 2757404 C1 Russian Federation, IPC F02C 1/08. Oxygen-fuel power plant with coal gasification : No. 2021114047 : application. 05/18/2021 : publ. 10/15/2021 / I. I. Komarov, N. D. Rogalev, V. P. Sokolov [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University MEI University.

22. Utility Model Patent No. 123581 U1 Russian Federation, IPC H01M 8/00. Hybrid carbon-using electrochemical power plant with the withdrawal of carbon dioxide from the cycle : No. 2012131683/07 : application. 07/25/2012 : publ. 12/27/2012 / D. G. Grigoruk, E. V. Kasilova, A.V. Turkin ; applicant Open Joint Stock Company "All-Russian Twice Order of the Red Banner of Labor Thermal Engineering Research Institute".

23. Galkeeva A.A., Mingaleeva G.R., Gorbunov S.U. Analysis of coal different brands to production energy and chemicals. Power engineering: research, equipment, technology. 2015;(11-12):69-79. (In Russ.)

24. Certificate of state registration of the computer program No. 2023683683 Russian Federation. Optimization of thermodynamic parameters of GTU : No. 2023683160 : application 03.11.2023 : publ. 09.11.2023 / A.V. Titov, G. E. Maryin, A. R. Akhmetshin ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University".

25. Certificate of state registration of the computer program No. 2023683685 Russian Federation. Solution of the system of transcendental equations : No. 2023683155 : application 03.11.2023 : publ. 09.11.2023 / A.V. Titov, G. E. Maryin, A. R. Akhmetshin ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University".

© Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., Титов А.В.

Authors of the publication

Marina S. Novoselova– Kazan State Power Engineering University. Email: nova-mara0607@list.ru

Guzel R. Mingaleeva– Kazan State Power Engineering University. Email: mingaleeva-gr@mail.ru

George E. Marin– Kazan State Power Engineering University. Email: george64199@mail.ru

Alexander V. Titov – Kazan State Power Engineering University. Email: al.v.titov@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено ***16.01.2024 г.***

Отредактировано ***02.02.2024 г.***

Принято ***07.02.2024 г.***