

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ В ПРАКТИКУ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА

А.С. Андреев, К.В. Аксенчик

Александр Сергеевич Андреев (ORCID 0000-0002-2244-1590), Константин Васильевич Аксенчик (ORCID 0000-0001-8096-0674)\*

Кафедра химических технологий, Череповецкий государственный университет, пр. Луначарского, 5, Череповец, Российская Федерация, 162600

E-mail: asandreev@chsu.ru, kvaksenchik@chsu.ru\*

*Предлагается организация предварительного использования тепловой энергии высокотемпературного процесса горения природного газа для получения электроэнергии с ее дальнейшим вовлечением в технологический процесс. Путем усложнения традиционных топков до газотурбинного модуля технически совмещаются энергетические и технологические функции, превращая топочное устройство в составе технологической системы в энерготехнологический блок. При этом повышается термодинамическая эффективность топочных устройств и решается проблема исключения полной потери эксергии тепла при сжигании природного газа в традиционных технологических топках. Для оперативной оценки термодинамической эффективности и экономической целесообразности внедрения энерготехнологического топочного устройств разработана формализованная математическая модель, позволяющая оценить эксергетический коэффициент полезного действия устройства и чистую дисконтируемую стоимость инвестиционного проекта при его внедрении в практику. С целью программного управления расходом природного газа в зависимости от температуры горячих газов на выходе камеры сгорания получена математическая модель в виде полиномиальной функции регрессии, которую удобно использовать в системе автоматического управления устройством для выработки задающего воздействия. Систематизация восприятия и оценка возможностей разработанных моделей демонстрируется на конкретном примере исследования условного энерготехнологического топочного устройства с тепловой мощностью 1,5 МВт, характерной для топков, используемых в технологических процессах, например, в производстве гранулированных минеральных удобрений. Разработана математическая модель системы автоматического управления топочным устройством, в которой объект управления описывается аperiodическим звеном первого порядка. Для определения динамических параметров пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора, соответствующей оценки качества переходного процесса и быстродействия управления использована отечественная среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Проведенное экспресс-моделирование условного топочного устройства и оценка результатов позволяет сделать вывод о том, что по сравнению с традиционными топками эксергетический коэффициент полезного действия устройства можно повысить от 0 до 21%. Инвестиционный проект является эффективным, если его чистая приведенная стоимость больше нуля. В демонстрационном примере это соответствует тому, что при ставке банка 11,8% требуемые инвестиции в проект не могут быть больше 160 млн. руб.*

**Ключевые слова:** эксергия, газотурбинный модуль, энерготехнология, топочное устройство, эксергетический КПД, чистая дисконтируемая стоимость, математическая модель, минеральные удобрения, система автоматического управления

### Для цитирования:

Андреев А.С., Аксенчик К.В. Моделирование и оценка внедрения в практику энерготехнологического топочного устройства. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 81–87

### For citation:

Andreev A.S., Aksenchik K.V. Modeling and evaluation of the implementation of an energy technological furnace device into practice. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 81–87

## MODELING AND EVALUATION OF THE IMPLEMENTATION OF AN ENERGY TECHNOLOGICAL FURNACE DEVICE INTO PRACTICE

A.S. Andreev, K.V. Aksenchik

Aleksandr S. Andreev (ORCID 0000-0002-2244-1590), Konstantin V. Aksenchik (ORCID 0000-0001-8096-0674)\*

Department of Chemical Technologies, Cherepovets State University, Lunacharskogo ave., 5, Cherepovets, 162600, Russia

E-mail: asandreev@chsu.ru, kvaksenchik@chsu.ru\*

*The organization of the preliminary use of thermal energy from the high-temperature combustion process of natural gas to generate electricity with its further involvement in the technological process is proposed. Energy and technological functions are technically combined by complicating traditional furnaces to a gas turbine module, converting a furnace as part of a technological system into an energy technological unit. At the same time, the thermodynamic efficiency of combustion devices increases and the problem of eliminating the complete loss of heat exergy when burning natural gas in traditional technological furnaces is solved. A formalized mathematical model for an operational assessment of the thermodynamic efficiency and economic feasibility of introducing energy-technological combustion devices has been developed. The model makes it possible to estimate the exergy efficiency of the device and the net discounted value of the investment project when it is put into practice. A mathematical model in the form of a polynomial regression function was obtained for the purpose of programmed control of natural gas consumption depending on the temperature of hot gases at the outlet of the combustion chamber. The model is convenient to use in the automatic control system of the device for generating the reference action. The systematization of perception and assessment of the capabilities of the developed models is demonstrated by a specific example of a study of a conventional energy-technological combustion device with a thermal power of 1.5 MW, typical for furnaces used in technological processes, for example, in the production of granular mineral fertilizers. The mathematical model of the automatic control system of the combustion device, in which the control object is described by the aperiodic link of the first order, has been developed. To determine the dynamic parameters of the proportional-integral-derivative controller, the corresponding assessment of the quality of the transient process and control speed, the domestic environment for dynamic modeling of technical systems SimInTech was used. The express modeling of the conventional combustion device and the evaluation of the results allows us to conclude that, in comparison with traditional furnaces, the exergy efficiency of the device can be increased from 0 to 21%. An investment project is effective if its net present value is greater than zero. In the demo example, this corresponds to the fact that at a bank rate of 11.8%, the required investment in the project cannot exceed 160 million of rubles.*

**Key words:** exergy, gas turbine module, energy technology, combustion device, exergy efficiency, net discounted value, mathematical model, mineral fertilizers, automatic control system

### ВВЕДЕНИЕ

В публикации [1] сообщалось, что основное направление развития производств аммиака связано со снижением расходных коэффициентов по сырью и энергоресурсам, в том числе снижением и даже исключением потребления природного газа. В технологических системах производства минеральных удобрений и других крупнотоннажных химических производств значительное количество природного газа сжигается в топках для получения греющих газов с температурным потенциалом 150-350 °С. Эксергия получаемой при этом

тепловой энергии полностью теряется и не используется для производства полезной работы. Если оценивать термодинамическую эффективность топки эксергетическим коэффициентом полезного действия (КПД), то в рассматриваемом случае он равен нулю, что абсолютно не согласуется с требованиями энергосбережения и энерготехнологичности систем.

Одним из путей решения проблемы является организация предварительного использования тепловой энергии высокотемпературного процесса горения природного газа для получения электроэнергии. При ее дальнейшем вовлечении в техно-

логический процесс существенно повышается степень энергетической автономности технологических систем.

Технически совместить энергетические и технологические функции в топочном устройстве можно путем усложнения традиционных топок до газотурбинного модуля. Греющими технологическими газами в этом случае являются отработавшие газы на выходе турбины, которые дополнительно могут смешиваться с воздухом. Блок-схема топочного устройства представлена на рис. 1.

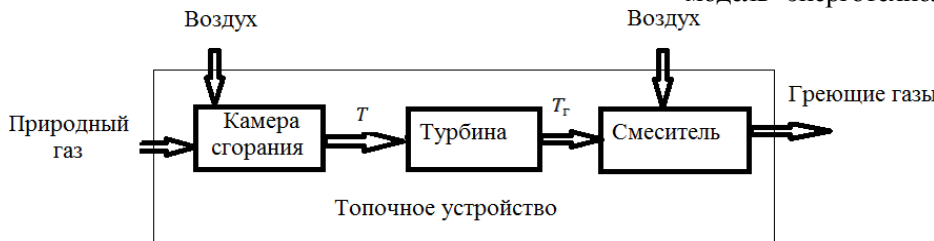


Рис. 1. Функциональные элементы топочного устройства  
Fig. 1. Functional elements of the combustion device

Рабочим инструментом при проведении экспресс-анализа и принятии соответствующего решения по внедрению таких усложненных топочных устройств является их формализованная модель. Формализованная в том смысле, что при моделировании в рассмотрение включается только тот минимальный набор реальных свойств процесса, который без учета многих частных уже позволяет оперативно и достаточно адекватно описывать объект исследования.

Анализ литературных данных, показал, что сохраняется интерес исследователей к изучению возможностей внедрения газотурбинных установок и диагностики их работы в различных отраслях промышленности с применением методов математического моделирования.

В работе [2] представлен обзор, посвященный проблеме создания энергоэффективных систем на основе полезного использования теплоты отходящих газов газотурбинных установок в газовой промышленности и предложено решение по построению системы с использованием утилизационного модуля, а также приведены результаты экономической оценки эффективности внедрения.

В работе [3] возможность применения газотурбинной установки в тепловой технологии обжига сидеритовой руды рассмотрена на основе математического моделирования процесса горения природного газа в камере сгорания газовой турбины с последующим использованием отработавших продуктов сгорания в печи обжига сидеритовой руды. Также в работе приведены результаты экономической оценки эффективности внедрения.

В работе [4] для решения задачи диагностики газотурбинных установок предлагается метод построения нелинейных математических моделей технологических процессов теплоэнергетического оборудования на основе статистического метода аппроксимации.

В работе [5] представлен подход к экспресс-моделированию термодинамической эффективности модернизированных топочных устройств химических производств.

В данной статье излагается математическая модель энерготехнологического топочного устройства, которую предполагается использовать для оперативной оценки термодинамической эффективности и экономической целесообразности внедрения таких устройств. Включение газотурбинных блоков в технологические процессы повышает требования к системам их управления. В этой связи, в статье затронут вопрос программного управления температурой топочных газов на входе турбины и регулирования температуры греющих газов на выходе газовой турбины.

При разработке математической модели использовались известные постулаты термодинамики и вытекающие из них уравнения связи между термодинамическими параметрами процесса [6-15].

#### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Основопологающим параметром, включенным на стадии формализации в математическую модель, является *эксергия* тепла, характеризующая *максимальную работу*, которую можно получить от тепла ( $Q$ ), если в качестве холодильника выступает окружающая среда. Эксергия определяется из термического КПД идеального цикла Карно:

$$E = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (1)$$

где  $E$  – эксергия;  $T_0$  – температурный потенциал окружающей среды;  $T$  – температурный потенциал тепла на уровне его преобразования.

В процессе получения греющих газов в традиционной топке эксергия тепла полностью теряется. При включении в состав топочного устройства газотурбинного блока потери эксергии  $E_1$  определяются температурой газов на выходе турбины:

$$E_1 = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_T}\right), \quad (2)$$

где  $T_T$  – температурный потенциал тепла на уровне греющих газов на выходе турбины.

В результате количество электрической энергии, вырабатываемой в турбине топочного устройства, определяется выражением:

$$L = E - E_1 = T_0 \cdot Q \cdot \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right), \quad (3)$$

Эксергетический КПД рассматривается как отношение полезно использованной эксергии к эксергии на входе топочного устройства:

$$\eta_s = \frac{L}{E}. \quad (4)$$

Экономическую целесообразность и эффективность инвестиционного проекта реализации топочного устройства можно количественно оценить чистой дисконтированной стоимостью [16]:

$$NPV = -In + \sum_{i=0}^t \frac{L \cdot c}{(1+r)^i}, \quad (5)$$

где  $In$  – вложенные инвестиции;  $r$  – процентная ставка банка;  $c$  – цена электроэнергии;  $t$  – временной горизонт.

Инвестиционный проект является эффективным, если выполняется условие  $NPV > 0$ .

Дисконтированный срок окупаемости проекта  $t_{OK}$  определяется из условия:

$$-In + \sum_{i=0}^{t_{OK}} \frac{L \cdot c}{(1+r)^i} = 0.$$

Объединенные в систему уравнения выражения (1)–(5) представляют собой математическая модель для технико-экономического анализа топочного устройства с газовой турбиной.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведем моделирование термодинамики топочного устройства, приняв температуру окружающей среды, равной 0 °С. Для конкретизации анализа рассмотрим условное топочное устройство с тепловой мощностью 7 МВт. Такая тепловая мощность необходима для работы стандартизованного газотурбинного блока ГТУ-1,5 МВт. Так в соответствии с уравнением (3), например, при температуре газов на выходе турбины равной 405 °С, и поддержании температуры в камере сгорания, равной 850 °С, расчетное количество вырабатываемой электрической энергии составляет 1,28 МВт. Если понизить температуру в камере сгорания до 750 °С, то количество вырабатываемой электрической энергии при прочих равных условиях снизится до 1,1 МВт. Расчетный эксергетический КПД установки в первом случае равен 0,21, а во втором снижается до 0,19.

Экспресс-моделирование топочного устройства позволяет говорить о существенной экономии электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе из внешних источников. Термодинамическая эффективность подтверждается тем, что эксергетический КПД устройства достигает 21%, а не 0%, как в традиционной технологической топке.

Оценим условие экономической эффективности при практической реализации топочного устройства. Для примера выбираем газовую турбину со стандартной номинальной электрической мощностью 1,5 МВт. Стоимость коммерческой электроэнергии на рассматриваемый период можно считать равной 4000 руб/(МВт·ч).

Требуется определить предельные максимальные инвестиции на закупку ГТУ и монтаж топочного устройства. Для этого воспользуемся моделью (5) для чистой приведенной стоимости. Инвестиционный проект является эффективным, если его чистая приведенная стоимость больше нуля.

Из рис. 2 следует, что инвестиции в проект при ставке банка 11,8% не могут быть больше 160 млн. руб., иначе он будет экономически не эффективным. Основная доля в инвестициях – это стоимость турбины. Для топочных устройств не обязательно использовать турбины с повышенной жаропрочностью лопаток, и тогда стоимость турбины в составе топочного устройства значительно снижается. Кроме того, в технологических системах требуются газовые турбины небольшой мощности, стоимость которых намного ниже по сравнению с используемыми в теплоэнергетике.

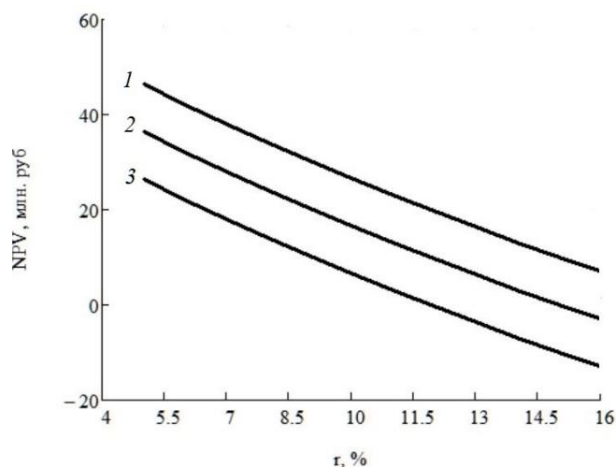


Рис. 2. Зависимость эффективности инвестиционного проекта от процентной ставки банка и величины вложенных инвестиций, млн. руб.: 1 - 140; 2 - 150; 3 - 160

Fig. 2. Dependence of the efficiency of the investment project on the bank's interest rate and the amount of invested investments, million rub.: 1 - 140; 2 - 150; 3 - 160

Рабочие режимы газовой турбины, включенной в топочное устройство, не должны допускать перегрева ее лопаток. Поэтому при управлении технологическим режимом топочного устройства задающим воздействием в системе автоматического управления (САУ) является допустимая температура топочных газов на выходе камеры сгорания. Эта температура поддерживается соответствующим изменением расхода природного газа в камеру сгорания топочного устройства. При программном управлении расходом природного газа необходимо иметь математическую модель, отражающую зависимость расхода от текущей температуры топочных газов. Эту зависимость можно получить на основе стехиометрических расчетов по методике, изложенной в [17].

Для удобства практического использования результаты стехиометрического эксперимента представляются в виде полиномиальной функции регрессии:

$$G = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_n \cdot t^n, \quad (6)$$

где  $t$  – температура газов на выходе камеры сгорания, °С;  $G$  – расход природного газа в топочное устройство, м<sup>3</sup>/ч. Степень полинома  $n$  определяет точность аппроксимации результатов эксперимента.

Поддержание необходимой температуры греющих технологических газов обеспечивается разбавлением воздухом отработанных газов на выходе турбины. Для этого не требуется организовывать замкнутый контур управления, и расход воздуха определяется расчетом теплового баланса процесса смешения.

Основные функциональные элементы САУ топочным устройством представлены на рис. 3. Математическая модель системы управления топочным устройством формируется на основе данной функциональной схемы. Объект управления – камера сгорания представляется реактором полного смешения, и как динамический элемент описывается аperiодическим звеном первого порядка с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{T_{ep} \cdot s + 1}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент передачи звена;  $T_{ep}$  – постоянная времени звена, с.

В систему управления включается датчик температуры, исполнительный двигатель с редуктором и клапаном, регулирующим подачу природного газа в топку. Динамические свойства этих элементов САУ описываются типовыми звеньями, ма-

тематическое описание которых подробно изложено в [18, 19].



Рис. 3. Функциональная схема САУ топочным устройством  
Fig. 3. Functional diagram of the ACS with a combustion device

Разработку модели САУ проведем для условного энерготехнологического топочного устройства с тепловой мощностью 1,5 МВт, характерной для топок, используемых в технологических процессах, например, в производстве гранулированных минеральных удобрений. Суммарный расход воздуха в топку принимаем равным 5280 м<sup>3</sup>/ч. В качестве базового расхода природного газа принимаем  $Q_H = 160$  м<sup>3</sup>/ч. Базовый в том смысле, что этот расход природного газа при принятом расходе воздушного дутья обеспечивает получение температуры топочных газов 750 °С.

Для удобства представления задающего воздействия в рассмотрение вводится нормированный расход природного газа как отношение текущего расхода природного газа к базовому:  $q = \frac{Q}{Q_H}$ .

Предполагается, что управление температурой и объемом технологических греющих газов обеспечивается путем смешения выходящих из турбины газов с воздухом. Принимается, что температура топочных газов при управлении может варьироваться в диапазоне:  $t = 600 - 850$  °С. Результаты вычислительного эксперимента на основе стехиометрических расчетов по методике, изложенной в [17] и обработка результатов методом наименьших квадратов показывает, что в рассматриваемом диапазоне температур предложенная выше модель (6) является линейной и имеет вид:

$$q = -0,21744 + 0,0016257 \cdot t, \quad (8)$$

Динамической моделью камеры сгорания является передаточная функция (7). Коэффициент передачи звена в первом приближении может быть принят равным объемной концентрации природного газа в исходной газовой смеси реактора, т.е.



0,03. В свою очередь, постоянная времени передаточной функции принимается равной времени пребывания газов в камере сгорания. Если учесть, что удельная мощность камерных топок, как отношение их тепловой мощности к их объему, составляет 140-350 кВт/м<sup>3</sup> [20], то в нашем случае постоянную времени можно принять равной 4 с.

Настройка ПИД-регулятора с учетом динамических свойств элементов САУ проводилась компьютерным моделированием и в отечественной программной среде SimInTech, и в Matlab [21] с использованием известного метода Зиглера-Никольса, алгоритм применения которого изложен, например, в [19].

Качество переходного процесса и быстродействие САУ можно оценить по переходной функции, рис. 4, где отражен результат воздействия на систему стандартной ступенчатой функции Хевисайда. Оценка возмущений и различных законов задающего воздействия предполагается как дальнейший этап при включении модели в конкретную систему управления технологическим процессом.

Переходный процесс характеризуется одним перерегулированием, составляющим примерно 7%. Рассматриваемые технологические процессы, в которых используется регулирование температуры, топочные газы не являются резко меняющимися. В этом случае изначально нет необходимости обеспечивать высокое быстродействие САУ и в этом смысле полученное при моделировании быстродействие 28 с можно считать приемлемым. Вместе с тем при возникновении практической необходимости быстродействие САУ можно легко

изменить включением в нее дополнительных типовых интегрирующих или дифференцирующих динамических звеньев.

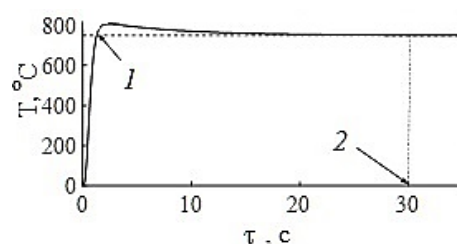


Рис. 4. Переходная характеристика САУ температурой на входе турбины: 1 – уровень стабилизации; 2 – быстродействие САУ

Fig. 4. ACS transient response with turbine inlet temperature: 1 – stabilization level; 2 – speed of ACS

## ВЫВОДЫ

На наш взгляд, изложенные в статье данные подтверждают техническую возможность и экономическую эффективность совмещения энергетических и технологических функций в топочных устройствах. Такие энерготехнологические блоки могут быть использованы в химических производствах, зерносушильных комплексах и других в масштабных производствах, использующих в своих технологиях греющие газы. Необходимо только иметь рынок газовых турбин малой мощности.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенчик К.В. Эволюция и перспективы энерго- и ресурсосберегающих подходов в технологии аммиака. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 1. С. 4-21. DOI: 10.6060/ivkkt.20216401.6310.
2. Дудников В.Ю., Дудникова С.А. К вопросу о выработке электроэнергии использованием теплоты отходящих газов газотурбинных установок. *Усп. совр. науки*. 2017. Т. 2. № 5. С. 72-77.
3. Мурзадеров А.В., Нешпоренко Е.Г. Анализ возможности энергетической модернизации теплотехнологии переработки сидеритовых руд с применением газовых турбин. *Теория и технол. металлург. пр-ва*. 2019. № 3 (30). С. 8-11.
4. Колчев К.К., Мезин С.В. Построение математических моделей технологических процессов теплоэнергетического оборудования на основе статистических методов аппроксимации. *Теплоэнергетика*. 2015. № 7. С. 44-51. DOI: 10.1134/S0040363615070048.
5. Андреев А.С., Синицын Н.Н. Экспресс-моделирование термодинамической эффективности модернизированных топочных устройств химических производств. *Вестн. Череповец. Гос. ун-та*. 2008. № 4 (19). С. 32-34.

## REFERENCES

1. Aksenchik K.V. Evolution and prospects of energy and resource saving approaches in ammonia technology. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 1. P. 4-21 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216401.6310.
2. Dudnikov V.Yu., Dudnikova S.A. To the question of power generation using the heat of the exhaust gases of gas turbines. *Usp. Sovr. Nauki*. 2017. V. 2. N 5. P. 72-77 (in Russian).
3. Murzaderov A.V., Neshporenko E.G. Analysis of possibility of energy modernization of the processing siderite ores technology with the use of gas turbines. *Teoria Tekhnol. Metallurg. Pr-va*. 2019. V. 30. N. 3. P. 8-11 (in Russian).
4. Kolchev K.K., Mezin S.V. Constructing mathematical models for simulating the technological processes in thermal power equipment on the basis of statistical approximation methods. *Teploenergetika*. 2015. N 7. P. 44-51 (in Russian). DOI: 10.1134/S0040363615070048.
5. Andreev A.S., Sinitsyn N.N. Express modeling of the thermodynamic efficiency of modernized furnaces for chemical production. *Vestn. Cherepovets. Gos. Un-ta*. 2008. N 4 (19). P. 32-34 (in Russian).

6. **Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Сычев В.В.** Техническая термодинамика. М.: Изд-во МЭИ. 2016. 496 с.
7. **Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В.** Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Изд-во Юрайт. 2021. 454 с.
8. **Белов Г.В.** Техническая термодинамика. М.: Изд-во Юрайт. 2021. 252 с.
9. **Францева А.А., Григорьева О.К.** Основы эксергетического анализа топливоиспользующих установок. Новосибирск: Новосиб. Гос. техн. ун-т. 2019. 88 с.
10. **Цирельман Н.М.** Техническая термодинамика. СПб.: Изд-во «Лань». 2018. 352 с.
11. **Амирханов Д.Г., Амирханов Р.Д., Курбангалеев М.С., Мухамадиев А.А., Хайруллин И.Х.** Техническая термодинамика. Казань: Изд-во КНИТУ. 2017. 320 с.
12. **Злобин В.Г., Горбай С.В., Короткова Т.Ю.** Техническая термодинамика. Ч. 1. Основные законы термодинамики. Циклы тепловых двигателей. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД. 2016. 146 с.
13. **Казakov В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С.** Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок. СПб.: СПб ГТУРП. 2013. 93 с.
14. **Бурдаков В.П., Дзюбенко Б.В., Меснянкин С.Ю., Михайлова Т.В.** Термодинамика. Ч. 2. Специальный курс. М.: Дрофа. 2009. 361 с.
15. Основы теории тепловых процессов и машин. Ч. II. Под ред. Н.И. Прокопенко. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2009. 571 с.
16. **Шапкин А.С., Шапкин В.А.** Теория риска и моделирование рискованных ситуаций. М.: Изд-во «Дашков и К». 2006. 880 с.
17. Теплотехника и теплоэнергетика металлургического производства. Под ред. И. А. Прибыткова. М.: Металлургия. 1993. 335 с.
18. **Никulin Е.А.** Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем. СПб.: БХВ-Петербург. 2015. 632 с.
19. **Карташов Б.А., Шабаяев Е.А., Козлов О.С., Шчекатуров А.М.** Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Практикум по моделированию систем автоматического регулирования. М.: ДМК Пресс. 2017. 424 с.
20. **Андрижиевский А.А., Володин В.И.** Энергосбережение и энергетический менеджмент. Мн.: Выш. шк. 2005. 294 с.
21. **Ощепков А.Ю.** Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB. СПб.: Изд-во «Лань». 2013. 208 с.
6. **Kirillin V.A., Sheindlin A.E., Sychev V.V.** Technical thermodynamics. M.: Izd. MEI. 2016. 496 p. (in Russian).
7. **Kudinov V.A., Kartashov E.M., Stefanyuk E.V.** Technical thermodynamics and heat transfer. M.: Izd. Urait. 2021. 454 p. (in Russian).
8. **Belov G.V.** Technical thermodynamics. M.: Izd. Urait. 2021. 252 p. (in Russian).
9. **Frantseva A.A., Grigorieva O.K.** Fundamentals of exergy analysis of fuel-using plants. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University. 2019. 88 p. (in Russian).
10. **Tsirelman N.M.** Technical thermodynamics. SPb.: Izd. «Lan'». 2018. 352 p. (in Russian).
11. **Amirkhanov D.G., Amirkhanov R.D., Kurbangaleev M.S., Mukhamadiev A.A., Khayrullin I.Kh.** Technical thermodynamics. Kazan: Izd. KNITU. 2017. 320 p. (in Russian).
12. **Zlobin V.G., Gorbai S.V., Korotkova T.Yu.** Technical thermodynamics. Part 1. Basic laws of thermodynamics. Heat engine cycles. SPb.: VShTE SPbGUPTD. 2016. 146 p. (in Russian).
13. **Kazakov V.G., Lukanin P.V., Smirnova O.S.** Exergetic methods for assessing the efficiency of heating plants. SPb.: SPb GTURP. 2013. 93 p. (in Russian).
14. **Burdakov V.P., Dzyubenko B.V., Mesnyankin S.Yu., Mikhailova T.V.** Thermodynamics. Part 2. Special course. M.: Drofa. 2009. 361 p. (in Russian).
15. Foundations of the theory of thermal processes and machines. Part II. Ed. by N.I. Prokopenko. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy. 2009. 571 p. (in Russian).
16. **Shapkin A.S., Shapkin V.A.** Risk theory and modeling of risk situations. M.: Izd. «Dashkov and K». 2006. 880 p. (in Russian).
17. Heat engineering and heat power engineering of metallurgical production. Ed. by I.A. Pribytkova. M.: Metallurgy. 1993. 335 p. (in Russian).
18. **Nikulin E.A.** Foundations of the theory of automatic control. Frequency methods of analysis and synthesis of systems. SPb.: BHV-Petersburg. 2015. 632 p. (in Russian).
19. **Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M.** SimInTech technical systems dynamic modeling environment. Workshop on modeling of automatic control systems. M.: DMK Press. 2017. 424 p. (in Russian).
20. **Andrzhievsky A.A., Volodin V.I.** Energy saving and energy management. Minsk: Vysh. shk. 2005. 294 p. (in Russian).
21. **Oshchepkov A.Yu.** Automatic control systems: theory, application, modeling in MATLAB. SPb.: Izd. «Lan'». 2013. 208 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 06.10.2021  
Принята к опубликованию 14.04.2022*

*Received 06.10.2021  
Accepted 14.04.2022*