

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-97/-98

Дмитрий Станиславович Агапов

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис», Россия, Пушкин, e-mail: different76@list.ru

Александр Петрович Кartoшkin

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис», Россия, Пушкин, телефон (812) 470-04-22, e-mail: akartoshkin@yandex.ru

Максим Игоревич Куколев

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор технических наук, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства; Инженерно-строительный институт, Россия, Санкт-Петербург, телефон (812) 552-64-01, e-mail: maksim.kukolev@spbstu.ru

Комплексная параметрическая оптимизация структурно дифференцированных теплотехнических систем

Авторское резюме

Состояние вопроса. Эффективность работы теплотехнических систем определяется как их структурой, так и режимами функционирования. Любая теплотехническая система на протяжении всего жизненного цикла (от синтеза, включая эксплуатацию, до утилизации) подвергается структурной и параметрической оптимизации. Анализ существующих данных показывает, что к настоящему моменту накоплен опыт совершенствования структуры систем на этапах создания и реконструкции, заложены основы структурного совершенства нестационарных систем, а также с учетом различной локализации отдельных элементов системы на основе пинч-технологии. С другой стороны, известны методы оптимизации рабочих параметров систем на основе энталпийных и эксергетических показателей. Эти методы рассматривают, как правило, систему в целом, без декомпозиции на отдельные подсистемы. Это обусловлено тем обстоятельством, что не всегда совершенство отдельного элемента системы аддитивно или мультиплексивно определяет глобальное совершенство системы в целом. В связи с этим появляется принципиальная возможность использования низкоэффективных устройств для построения совершенных систем.

Материалы и методы. Используемые сегодня методы структурной и параметрической оптимизации позволяют вести синтез систем и поиск оптимальных рабочих параметров с учетом термоэкономических показателей, таких как стоимость единицы теплоты, эксергии и других видов энергетических и материальных ресурсов.

Результаты. Разработан метод комплексной оптимизации теплотехнических систем, позволяющий производить комплексную параметрическую оптимизацию структурно дифференцированных систем. На примере газопоршневой когенерационной установки JMS 612 GS-B.L определены оптимальные регулировочные параметры ее функционирования.

Выводы. Предложенный метод комплексной параметрической оптимизации структурно дифференцированных систем может применяться как на этапе синтеза теплотехнических систем, так и в процессе реконструкции. Определенные в процессе исследования оптимальные параметры функционирования установки JMS 612 GS-B.L могут быть использованы при ее эксплуатации.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, транспортировка теплоты, термомеханическая эксергия, эффективность теплотехнических систем

Dmitry Stanislavovich Agapov

Saint Petersburg State Agrarian University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Cars, Tractors and Technical Service Department, Russia, Pushkin, e-mail: different76@list.ru

Alexander Petrovich Kartoshkin

Saint Petersburg State Agrarian University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Cars, Tractors and Technical Service Department, Russia, Pushkin, telephone (812) 470-04-22, e-mail: akartoshkin@yandex.ru

Maksim Igorevich Kukolev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering; Civil Engineering Institute, Russia, St. Petersburg, telephone (812) 552-64-01, e-mail: maksim.kukolev@spbstu.ru

Complex parametric optimization of structurally differentiated heat engineering systems

Abstract

Background. The efficiency of heat engineering systems is determined by both their structure and operating modes. Any heat engineering system is subject to structural and parametric optimization throughout its entire life cycle (from synthesis, including operation, to disposal). Analysis of existing data shows that by now experience has been accumulated to improve the structure of systems at the stages of creation and reconstruction. The foundations have been laid for the structural perfection of non-stationary systems, as well as taking into account the different localization of individual elements of the system based on pinch technology. On the other hand, methods are known for optimizing the operating parameters of systems based on enthalpy and exergy indicators. These methods as a rule consider the system as a whole, without decomposing it into individual subsystems. It is due to the fact that the perfection of an individual system element does not always additively or multiplicatively determine the overall perfection of the system as a whole. Thus, it is a possibility in principle to use low-efficiency devices to develop perfect systems.

Materials and methods. The methods of structural and parametric optimization used today allow us to synthesize systems and search for optimal operating parameters taking into account thermo-economic indicators, such as the cost of a unit of heat, exergy and other types of energy and material resources.

Results. A method for complex optimization of heat engineering systems has been developed, allowing for complex parametric optimization of structurally differentiated systems. Using the example of the gas piston cogeneration JMS 612 GS-B.L unit, the optimal control parameters of its operation have been determined.

Conclusions. The proposed method for complex parametric optimization of structurally differentiated systems can be used both at the stage of synthesis of heat engineering systems and in the process of reconstruction. The optimal parameters of the operation of the JMS 612 GS-B.L unit determined during the study can be used during its operation.

Key words: parametric optimization, heat transport, thermomechanical exergy, efficiency of heating systems

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.005-009

Введение. При рассмотрении небольших систем, находящихся в одном помещении, возможно вести структурную оптимизацию. При этом можно рассматривать систему в целом, поскольку создание внутрисистемных теплообменных связей не вызывает технических затруднений и существенных потерь при транспортировке теплоты [1, 2, 3, 4, 5]. В случае более глобальных систем (например, нефтеперегонный завод или пищевой комбинат) создание отдельных теплообменных связей может быть экономически нецелесообразно из-за преобладающих энергетических потерь при передаче теплоты или высоких капитальных затрат при создании связи [6]. Настоящее исследование направлено на комплексную оптимизацию таких структурно дифференцированных систем, что представляет актуальную задачу современной энергетики [7, 8, 9].

Структурно дифференцированные системы нередко возникают при многоэтапном производстве конечной продукции с отдельными производственными циклами получения промежуточных продуктов и полуфабрикатов.

Комплексная оптимизация позволяет определить наилучшую структуру системы и подобрать оптимальные рабочие параметры функционирования этой системы. Целью настоящего исследования является разработка метода комплексной оптимизации теплотехнических систем.

Методы исследования. Поиск оптимального комплексного структурно-параметрического решения системы начинается с декомпозиции системы на кластеры экономически приемлемых теплообменных связей. Это такие части системы, в которых создание теплообменных связей является экономически оправданным решением с учетом всех капитальных и эксплуатационных расходов.

Грубо учесть экономически неприемлемые связи можно, задав снижение температуры потока при транспортировке теплоты с помощью промежуточного агента. При этом необходимо повторно провести пинч-анализ, и если структурное решение изменится, то это указывает на экономически неприемлемую теплооб-

менную связь. Она неприемлема пока только энергетически, но если добавить капитальные и эксплуатационные расходы, то картина может только усугубиться.

Задать снижение температуры потока при транспортировке теплоты можно эмпирически, учитывая опыт эксплуатации теплосетей с похожими термодинамическими параметрами теплоносителя. При отсутствии опытных данных снижение температуры потока при транспортировке теплоты можно определить расчетным путем на основе двух уравнений: теплопередачи и теплоемкости:

$$\delta\Phi = k(T - T_0)dS; \quad (1)$$

$$\delta\Phi = Gc_P(-dT), \quad (2)$$

где Φ – тепловой поток от агента к окружающей среде, Вт; k – коэффициент теплопередачи теплоты от агента к окружающей среде, Вт/(м²·град); T и T_0 – температуры агента и окружающей среды соответственно, град; S – средне логарифмическая площадь теплообменной поверхности, м²; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; c_P – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·град).

Частным решением системы из уравнений (1) и (2) будет уравнение

$$\Delta T_{\text{кон}} = \Delta T_{\text{нач}} e^{-\frac{k}{G \cdot c_P} S_{\text{общ}}}. \quad (3)$$

Тогда снижение температуры потока при транспортировке теплоты составит $\Delta T_{\text{нач}} - \Delta T_{\text{кон}}$.

Определив с помощью пинч-технологии структурные решения подсистем, перейдем к их параметрической оптимизации. Чтобы оптимизировать рабочие параметры i -й структурной группы, необходимо для каждой такой подсистемы определить критерий оптимизации (целевую функцию) F_i , варьируемые (регулировочные) параметры \bar{X}_i , уравнения связи этих параметров в неявном виде и граничные условия $\varphi_i(\bar{X})$.

Поскольку целей может быть несколько, то желательно свести задачу к одному критерию, чтобы упростить поиск решения. Это достигается назначением весовых коэффициентов каждого критерия. Так, например, потери энергии, эксплуатационные и капитальные затраты, а также показатели надежности и долговечности можно выразить через стоимость в денежных единицах, получив единый обобщенный критерий оптимизации для i -й структурной группы $F_i(\bar{X}_i)$.

Таким образом, имеем:

$$F_i(\bar{X}_i) \rightarrow \text{extr},$$

$$\varphi_{i,j}(\bar{X}_i) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

$$\varphi_{i,k}(\bar{X}_i) \geq 0,$$

$$\varphi_{i,l}(\bar{X}_i) \leq 0.$$

При этом следует помнить, что число ограничений-равенств должно быть меньше числа переменных \bar{X}_i , а количество ограничений-неравенств может быть произвольным.

Подобные задачи решаются численными методами математического программирования, однако в большинстве случаев, когда задача имеет небольшую размерность (количество неизвестных), удобно использовать метод Лагранжа [1]. Метод множителей Лагранжа широко используется для решения сложных задач ограниченной оптимизации и является одним из основных методов решения задач на поиск условного экстремума в математическом анализе. Он не только широко используется для нелинейной оптимизации, но и лежит в основе еще более сложных методов оптимизации, несмотря на отдельные недостатки.

Этот метод позволяет задачу поиска условного экстремума целевой функции на множестве допустимых значений преобразовать к задаче безусловной оптимизации функции L_i :

$$L_i(\bar{X}_i, \bar{\lambda}_i) = F_i(\bar{X}_i) + \sum_{j=1}^{j=m} (\lambda_{i,j} \varphi_{i,j}). \quad (4)$$

Необходимым условием использования метода Лагранжа является преобразование неравенств в равенства путем добавления дополнительных переменных \bar{X}_i , число которых равно числу этих неравенств. Кроме того, вводятся дополнительные переменные λ_i , число которых равно общему числу ограничений задачи. Таким образом, решение задачи методом Лагранжа повышает ее размерность за счет включения дополнительных переменных. Этот недостаток ограничивает область применения метода Лагранжа сравнительно простыми задачами, поэтому с повышением числа переменных и ограничений целесообразно переходить к численным методам математического программирования.

Суть метода Лагранжа заключается в том, что в точке экстремума все частные производные равны нулю:

$$\frac{\partial L_i}{\partial \bar{X}_i} = \frac{\partial L_i}{\partial \lambda_{i,j}} = 0. \quad (5)$$

Зависимость (5) позволяет найти экстремум при условии независимости переменных \bar{X}_i и λ_i , т.е., когда они не оказывают никакого влияния друг на друга. Если для переменных это условие выполняется автоматически, то для вектора \bar{X}_i это не всегда так. В случае наличия связи между переменными \bar{X}_i должен быть найден условный экстремум функции L_i , что достигается введением дополнительных уравнений связи $\varphi_i(\bar{X})$.

Таким образом, осуществляется локальная параметрическая оптимизация для каждой структурной группы. Однако, как было показано

выше, совершенство отдельных подсистем не всегда обуславливает глобальное совершенство системы, поэтому глобальная параметрическая оптимизация структурно дифференцированных систем должна осуществляться на аддитивной основе, но со своими весовыми коэффициентами k_i :

$$L = \sum_{i=1}^{i=n} (k_i L_i). \quad (6)$$

При этом оптимизация осуществляется по всем переменным локальных подсистем.

В качестве примера приведем результаты параметрической оптимизации когенерационной установки JMS 612 GS-B.L на основе термоэкономического анализа [1, 10].

Для данной установки в качестве целевой функции было составлено уравнение стоимости всех энергетических потоков (7):

$$C = c_{\text{см}} Ex_{\text{см}} + c_{\text{o.ж}} Ex_{\text{o.ж}} + c_{\text{инт.1}} Ex_{\text{инт.1}} + \\ + c_{\text{инт.2}} Ex_{\text{инт.2}} + c_{\text{см}} Ex_{\text{см}} + c_{\text{t}} Ex_{\text{t}} + c_{\text{T}} Ex_{\text{T}}, \quad (7)$$

где C – суммарная стоимость всех энергетических потоков установки (целевая функция), руб.; $Ex_{\text{см}}$, $Ex_{\text{o.ж}}$, $Ex_{\text{инт.1}}$, $Ex_{\text{инт.2}}$, Ex_{L} , Ex_{T} – значения термомеханической эксергии смазочного масла, охлаждающей жидкости, потока воздуха интеркулера первой ступени, потока воздуха интеркулера второй ступени, механической работы и теплоты соответственно, Дж; $c_{\text{см}}$, $c_{\text{o.ж}}$, $c_{\text{инт.1}}$, $c_{\text{инт.2}}$, c_{L} – стоимости единицы термомеханической эксергии смазочного масла, охлаждающей жидкости, потока воздуха интеркулера первой ступени, потока воздуха интеркулера второй ступени и механической работы соответственно.

В качестве регулировочных параметров оптимизации выступают: частота вращения коленчатого вала ДВС n , мин⁻¹; угол опережения зажигания Θ , град. п.к.в.; температура наддувочного воздуха t_k , °C; температура охлаждающей жидкости $t_{\text{ж}}$, °C; нагрузочный фактор β (положение органа управления подачей топлива).

В качестве уравнений связи параметров оптимизации выступают функции стоимости эксергий от регулировочных параметров: смазочного масла $fEx_{\text{см}}$; охлаждающей жидкости $fEx_{\text{o.ж}}$; потока воздуха интеркулера первой ступени $fEx_{\text{инт.1}}$; потока воздуха интеркулера второй ступени $fEx_{\text{инт.2}}$ и механической работы fEx_{L} , а также функции стоимости единицы эксергии от регулировочных параметров: смазочного масла $fEx_{\text{см}}$; охлаждающей жидкости $fEx_{\text{o.ж}}$; потока воздуха интеркулера первой ступени $fEx_{\text{инт.1}}$; потока воздуха интеркулера второй ступени $fEx_{\text{инт.2}}$ и механической работы fEx_{L} .

Функциональные зависимости потоков эксергии от оптимизируемых параметров определены в ходе экспериментов по уточнению теплового баланса энергоустановок:

$$\begin{cases} Ex_{\text{см}} = f_{Ex_{\text{см}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ Ex_{\text{o.ж}} = f_{Ex_{\text{o.ж}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ Ex_{\text{инт.1}} = f_{Ex_{\text{инт.1}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ Ex_{\text{инт.2}} = f_{Ex_{\text{инт.2}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ Ex_{\text{L}} = f_{Ex_{\text{L}}}(n; \Theta; t_k; t_{\text{ж}}; \beta), \\ c_{\text{см}} = f_{c_{\text{см}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{o.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_{\text{L}}; Ex_{\text{T}}), \\ c_{\text{o.ж}} = f_{c_{\text{o.ж}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{o.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_{\text{L}}; Ex_{\text{T}}), \\ c_{\text{инт.1}} = f_{c_{\text{инт.1}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{o.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_{\text{L}}; Ex_{\text{T}}), \\ c_{\text{инт.2}} = f_{c_{\text{инт.2}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{o.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_{\text{L}}; Ex_{\text{T}}), \\ c_{\text{L}} = f_{c_{\text{L}}}(Ex_{\text{см}}; Ex_{\text{o.ж}}; Ex_{\text{инт.1}}; Ex_{\text{инт.2}}; Ex_{\text{L}}; Ex_{\text{T}}). \end{cases} \quad (8)$$

Условия, представленные в виде неравенств (например, минимальная нагрузка не может быть менее 40 %), были преобразованы в равенства.

После того как все ограничения при поиске оптимальных параметров системы были заданы равенствами, была составлена регулярная функция Лагранжа, которую нашли при условии равенства нулю частных производных по всем оптимизируемым параметрам.

Результаты исследования. В результате решения получены следующие оптимальные параметры когенерационной установки JENBACHER шестого модельного ряда JMS 612 GS-B.L: $n = 1837$ мин⁻¹; $\Theta = 26,2$ град. п.к.в.; $T_k = 177,18$ °C; $T_{\text{ж}} = 117,5$ °C; $\beta = 0,962$.

При стоимости газа в ценах 2017 года $c_{ExT} = 5,1$ руб/м³ и его эксергии $ExT = 35$ МДж/м³ стоимость вырабатываемой механической энергии составила $c_{ExL} = 0,51$ руб/(кВт·ч) = 0,188 руб/МДж, а теплоты – $c_{ExQ} = 0,365$ руб/(кВт·ч) = 0,101 руб/МДж.

Выводы. Таким образом, в результате параметрической оптимизации установки JMS 612 GS-B.L на основе термоэкономического анализа определение оптимальных параметров работы композитных систем возможно на любом уровне декомпозиции. Так, например, можно разделить всю установку на отдельные энергосистемы (газоводные теплообменники, ДВС, насосы), составить функции Лагранжа для них, а затем по уравнению (6) определить оптимальные параметры всей установки. То же справедливо и в направлении укрупнения: например, если данная установка работает в составе какого-либо производственного оборудования или энергосистемы, то функция (6) войдет в состав более глобальной Лагранжевой функции со своим весовым коэффициентом.

Список литературы

1. Кartoшкин А.П., Агапов Д.С. Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации технологического оборудования энергетических систем. – СПб.: Проспект Науки, 2021. – 311 с.

2. Тверской Ю.С., Муравьев И.К. О методологии структурного синтеза эффективных систем управления технологическим процессом // Газотурбинные технологии. – 2022. – № 5(188). – С. 32–37. – EDN IIXOJY.

3. Матричная модель цифрового двойника энергетического оборудования / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, К.Н. Бубнов // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: материалы I Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Ульяновск, 6–7 октября 2021 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 14–18. – EDN ANWXBG.

4. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Дунаев В.А. Повышение эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI Междунар. науч.-техн. конф., Иваново, 9–13 ноября 2015 года. Т. 2. – Иваново, 2015. – С. 335–338. – EDN WASQHB.

5. Киселев В.Г., Калютик А.А., Куклев М.И. Металлоемкость тепловых машин и теплоемкость их рабочего тела // Проблемы региональной энергетики. – 2020. – № 2(46). – С. 53–64. DOI: 10.5281/zenodo.3898237. – EDN GRGKIG.

6. Совершенствование pinch-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов с учетом их локализации / Д.С. Агапов, А.П. Картошкин, А.А. Калютик, А.В. Кондрашов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 5. – С. 115–125. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125.

7. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения / под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

8. Тсатсаронис Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергосберегающей системы / пер. с англ. Т.В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – С. 152.

9. Луканин П.В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 3–11. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11. – EDN WOZNTV.

10. Belinskaia I., Agapov D. Parametric optimization of energy conversion systems based on thermo economic indicators // Engineering for Rural Development: Proceedings, Jelgava, 25–27 May 2016. Vol. 15. – Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2016. – P. 274–277. – EDN WPFVQF.

References

1. Kartoshkin, A.P., Agapov, D.S. Resursosberzhenie pri proektirovani i ekspluatatsii tekhnologicheskogo oborudovaniya energeticheskikh sistem [Resource conservation in the design and operation of process equipment for power systems]. Saint-Petersburg: Prospekt Nauki, 2021. 311 p.

2. Tverskoy, Yu.S., Murav'ev, I.K. O metodologii strukturnogo sinteza effektivnykh sistem upravleniya tekhnologicheskim protsessom [On the methodology of structural synthesis of efficient process control systems].

Gazoturbinnye tekhnologii, 2022, no. 5(188), pp. 32–37. EDN IIXOJY.

3. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Ledukhovsky, G.V., Bubnov, K.N. Matrixnaya model' tsifrovogo dvoynika energeticheskogo oborudovaniya [Matrix model of the digital twin of power equipment]. Materialy I Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Razvitiye metodov prikladnoy matematiki dlya resheniya mezhdisciplinarnykh problem energetiki», Ul'yanovsk, 6–7 oktyabrya 2021 goda [Proceedings of the 1st All-Russian scientific and technical conference with international participation “Development of applied mathematics methods for solving interdisciplinary problems of energy”, Ulyanovsk, October 6–7, 2021]. Ul'yanovsk: Ul'yanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2021, pp. 14–18. EDN ANWXBG.

4. Gorbunov, V.A., Lonshakov, N.A., Dunaev, V.A. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii teplomekhanicheskogo oborudovaniya AES [Improving the operating efficiency of thermal-mechanical equipment at NPPs]. Trudy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi», Ivanovo, 9–13 noyabrya 2015 goda. T. 2 [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference “Electric Power Industry through the Eyes of Youth”, Ivanovo, November 9–13, 2015. Vol. 2]. Ivanovo, 2015, pp. 335–338. EDN WASQHB.

5. Kiselev, V.G., Kalyutik, A.A., Kuklev, M.I. Metalloemkost' teplovykh mashin i teploemkost' ikh rabochego tela [Metal consumption of heat engines and heat capacity of their working fluid]. Problemy regional'noy energetiki, 2020, no. 2(46), pp. 53–64. DOI: 10.5281/zenodo.3898237. EDN GRGKIG.

6. Agapov, D.S., Kartoshkin, A.P., Kalyutik, A.A., Kondrashov, A.V. Sovershenstvovanie pinch-tehnologii dlya vozmozhnosti integratsii nestatsionarnykh teplovykh protsessov s uchetom ikh lokalizatsii [Improving pinch technology to integrate non-stationary thermal processes taking into account their localization]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 115–125. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125.

7. Brodyaniskiy, V.M., Fratsher, V., Mikhalek, K. Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya [Exergy Method and Its Applications]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 288 p.

8. Tsatsaronis, D. Vzaimodeystvie termodynamiki i ekonomiki dlya minimizatsii stoimosti energosberegayushchey sistemy [Interaction of Thermodynamics and Economics to Minimize the Cost of an Energy-Saving System]. Odessa: Studiya «Negotsiant», 2002, p. 152.

9. Lukanin, P.V. Otsenka energeticheskoy effektivnosti proizvodstva sul'fatnoy tsellyulozy metodom prirashcheniya eksergiy [Assessment of the energy efficiency of sulfate pulp production using the exergy increment method]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 3–11. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11. EDN WOZNTV.

10. Belinskaia, I., Agapov, D. Parametric Optimization of Energy Conversion Systems Based on Thermo-Economic Indicators. Proceedings “Engineering for Rural Development”, Jelgava, 25–27 May 2016. Vol. 15. Jelgava: Latvian University of Agriculture, 2016, pp. 274–277. EDN WPFVQF.