

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.165

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Григорий Васильевич Ледуховский

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, ректор, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-99, e-mail: lgv@ispu.ru

Максим Дмитриевич Фомичев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-15, e-mail: somebody.max@yandex.ru

Антон Николаевич Беляков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Михаил Александрович Кузнецов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, e-mail: mihailkuznecov908@gmail.com

Решение обратной задачи теплопередачи в конденсаторе турбоустановки со встроенным теплофикационным пучком

Авторское резюме

Состояние вопроса. Снижение потерь тепла в окружающую среду для энергетических установок является одним из основных путей энергосбережения, которое относится к приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий Российской Федерации. С конденсаторами турбоустановок связаны существенные резервы повышения эффективности работы оборудования, так как с охлаждающей водой может отводиться в окружающую среду более 50 % энергии топлива. Эффективность функционирования конденсатора со встроенными теплофикационными пучками существенно влияет на вакуум в конденсаторе и, соответственно, на эффективность работы всей установки. Диагностика состояния и совершенствование режимов работы конденсатора турбоустановки со встроенным теплофикационным пучком является актуальной научной и практической задачей.

Материалы и методы. Для разработки модели конденсатора со встроенным теплофикационным пучком использована методология матричной формализации описания тепло- и массообменных процессов. Для решения задачи диагностирования состояния оборудования применены методы наименьших квадратов и математического программирования.

Результаты. В рамках методологии матричной формализации разработан подход к решению обратных задач диагностики и проектирования многопоточного теплообменного оборудования с учетом фазового перехода в теплоносителях. Получены и проанализированы решения обратной задачи с точки зрения диагностики состояния теплообменного оборудования на примере конденсатора турбоустановки со встроенным теплофикационным пучком.

Выводы. Анализ полученных расчетных результатов показал адекватное описание моделью нормативных данных для анализируемого конденсатора и возможность использования модели для оперативной диагностики состояния энергетического оборудования и эффективного использования энергетических ресурсов за счет предотвращения неэффективных режимов. Предложенный подход позволяет формулировать и решать обратные задачи диагностики состояния оборудования конденсационных установок различного назначения.

Ключевые слова: конденсатор, теплофикационная турбина, встроенный пучок, сетевая вода, матричная модель, баланс энергии, обратная задача, диагностика состояния

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor, Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Grigory Vasilievich Ledukhovskiy

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Rector, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-99, e-mail: lgv@ispu.ru

Maxim Dmitrievich Fomichev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-15, e-mail: somebody.max@yandex.ru

Anton Nikolaevich Belyakov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Mikhail Alexandrovich Kuznetsov

Ivanovo State Power Engineering University, Student, Russia, Ivanovo, e-mail: mihailkuznecov908@gmail.com

Solution of inverse heat transfer problem in condenser of a turbine unit with built-in heating unit

Abstract

Background. For power plants reduction of heat losses is one of the main ways to save energy. Energy saving issue is one of the priority areas of the development of science, engineering, and technology in the Russian Federation. Efficiency upgrading of the equipment operation are associated with the condensers of turbine units, since more than 50 percent of the fuel energy is released into the environment with cooling water. The operating efficiency of a condenser with built-in heating beams significantly affects the vacuum in the condenser and, thus, the operating efficiency of the entire unit. Diagnostics of the condition and improvement of operating modes of the condenser of a turbine unit with a built-in heating unit is an urgent scientific and practical issue.

Materials and methods. To develop a model of a condenser with a built-in heating beam, the methodology of matrix formalization of the description of heat and mass transfer processes has been used. To solve the problem of diagnosing the condition of equipment, methods of least squares and mathematical programming have been used.

Results. Within the framework of the matrix formalization methodology, the authors have developed an approach to solve inverse problems of diagnosing and designing multi-flow heat exchange equipment considering the phase transition in coolants. The authors have obtained and analyzed solutions of the inverse problem from the point of view of diagnosing the state of heat exchange equipment using the example of a turbine unit condenser with a built-in heating beam.

Conclusions. Analysis of the calculated results has shown an adequate description by the model of the standard data for the analyzed condenser. Analysis results have shown the possibility to use the model for runtime diagnosis of the condition of power equipment and the efficient use of energy resources due to preventing ineffective modes. The proposed approach allows us to formulate and solve inverse problems of diagnosing the state of equipment of condensing units for various purposes.

Key words: condenser, heating turbine, built-in beam, network water, matrix model, energy balance, inverse problem, condition diagnostics

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.1.085-091

Введение. Прямые задачи теплопередачи [1, 2] ориентированы на проведение поверочных расчетов, при выполнении которых предполагается подбор оборудования из стан-

дартного ряда, при фиксированных конструктивных параметрах. Расчетом проверяются возможности оборудования для конкретного случая. В обратных задачах выполняются, как

правило, проектные расчеты, которые ориентированы на выбор конструктивных и режимных параметров, обеспечивающих эффективную работу оборудования [1]. Известна постановка и решение обратной задачи в теплообменных аппаратах тепловых электрических станций (ТЭС) [1]. Следует отметить, что большая часть энергии топлива отводится от отработавшего пара в конденсаторе турбины и сбрасывается в окружающую среду [3–8], при этом неэффективная работа конденсационной установки приводят к значительному снижению тепловой экономичности турбины или даже к ее останову [3, 4]. Следует отметить, что давление пара в конденсаторе существенным образом влияет на электрическую мощность турбины. Согласно литературным данным [6], ухудшение вакуума в конденсаторе на 1 кПа приводит к потере мощности при конденсационном режиме работы турбины примерно на 1 %.

В конденсаторе теплофикационной турбины кроме охлаждающей циркуляционной воды дополнительно может использоваться сетевая, или исходная, или подпиточная вода, а турбинный пар переходит в жидкое состояние, что существенно усложняет моделирование процесса теплообмена. Разработка адекватных методов расчета и их использование для решения обратных задач проектирования и диагностики конденсатора турбины с учетом режима работы встроенного теплофикационного пучка и фазового перехода в теплоносителях является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой [3, 6].

Объектом исследования является конденсационная установка турбоустановки со встроенным теплофикационным пучком. В качестве предмета исследования рассматриваются постановка и решение обратной задачи теплопередачи в конденсационной установке с учетом фазового перехода в горячем теплоносителе.

Целью исследования является диагностика состояния поверхностей нагрева конденсатора со встроенным теплофикационным пучком на основе решения обратной задачи теплопередачи.

Для достижения цели исследования последовательно решаются две задачи:

- 1) разработка, идентификация и проверка адекватности модели процесса теплообмена в конденсаторе турбины со встроенным теплофикационным пучком;
- 2) решение обратной задачи теплопередачи в целях диагностики состояния основной поверхности нагрева и встроенного пучка.

Метод и объект исследования. В качестве объекта исследования рассматривается конденсатор К-14000 УТЗ турбины Т-250/300-240 ТМЗ. Вид конденсатора со снятыми крышками основной водяной камеры и камеры встроенного теплофикационного пучка [6] показан на рис. 1.

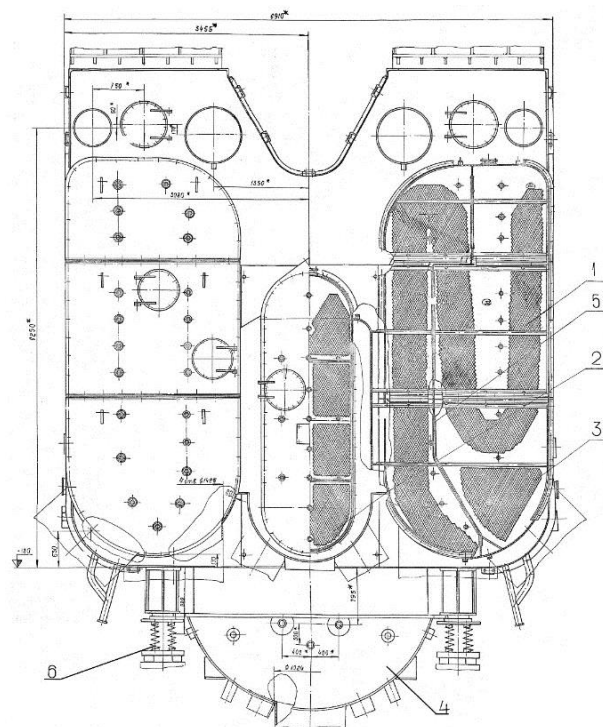


Рис. 1. Конденсатор К-14000 УТЗ (вид сбоку со снятыми крышками основной водяной камеры и камеры встроенного теплофикационного пучка): 1 – основной трубный пучок; 2 – встроенный теплофикационный пучок; 3 – воздухоохладитель; 4 – конденсатосборник; 5 – перегородка водяной камеры, делящая ее на два хода; 6 – пружинная опора [6]

Отработавший в турбине пар поступает сверху в межтрубное пространство конденсатора. Циркуляционная вода системы оборотного охлаждения (СОО) проходит основной трубный пучок 1, сетевая вода – встроенный теплофикационный пучок 2. Через конструктивные неплотности вакуумной системы в конденсатор из атмосферы может поступать воздух. Данные присосы ухудшают вакуум и приводят к снижению тепловой экономичности эксплуатации турбины. Удаление присосов воздуха организуется из межтрубного пространства конденсатора через воздухоохладитель 3. Пар после конденсации направляется в конденсатосборник 4 и затем в систему регенерации. Число основных потоков теплоносителей в рассматриваемой конструкции конденсатора равно трем: циркуляционная вода, сетевая вода и отработавший пар. Конденсатор при моделировании процессов теплообмена в данном случае рассматривается как многопоточный теплообменный аппарат [2], число потоков у которого больше двух. Для моделирования многопоточных и многоступенчатых аппаратов воспользуемся матричным подходом, который рекомендуется использовать для таких объектов [2].

Схема потоков с указанием направления движения теплоносителей в конденсаторе представлена на рис. 2,а.

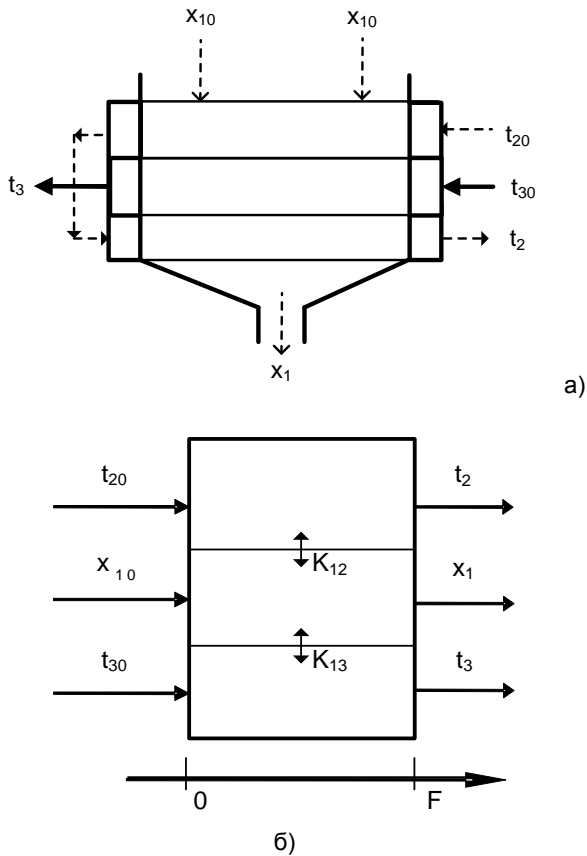


Рис. 2. Схема потоков теплоносителей в конденсаторе (а), расчетная схема потоков теплоносителей (б) с указанием направления оси определяющей координаты процесса F

Считается, что пар одновременно обменивается теплотой и с сетевой водой, и с циркуляционной водой. Считая постоянной температуру пара в состоянии насыщения $t_{n1} = \text{const}$, направление движение циркуляционной воды и сетевой воды в модели без ущерба для точности описания можно считать по отношению к направлению потока пара, согласно схеме на рис. 2,б, прямооточным. Это обусловлено независимостью температурных напоров и тепловых потоков для воды от направления движения воды по отношению к направлению движения пара, пока сохраняется постоянная температура пара, равная температуре насыщения. Охлаждающая вода воспринимает тепло пропорционально разности температур воды и пара, которая в данном случае не зависит от направления движения пара. В качестве определяющей координаты процесса теплопередачи выбирается площадь поверхности нагрева F , направление оси которой показано на рис. 2,б. Величина площади поверхности нагрева определяется суммарной площадью трубок в аппарате, участвующих в теплообмене, для циркуляционной воды и сетевой воды.

На основании расчетной схемы, представленной рис. 2,б, строится модель процесса теплопередачи для трех теплоносителей конденса-

тора сначала в виде дифференциальных уравнений. Состояние пара при его конденсации описывается степенью сухости x , которая показывает массовую долю пара в пароводяной смеси [2, 7]. Температура пара в состоянии насыщения при этом считается постоянной ($t_n = \text{const}$). При фазовом переходе только в горячем теплоносителе из баланса теплоты, составленного для пара, циркуляционной воды и сетевой воды [2], получена система дифференциальных уравнений, описывающая изменение степени сухости горячего теплоносителя x_1 , температуры циркуляционной t_2 и сетевой t_3 воды вдоль определяющей координаты процесса:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = -a_1(t_n - t_2) - a_4(t_n - t_3), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2(t_n - t_2), \\ \frac{dt_3}{dF} = a_3(t_n - t_3), \end{cases} \quad (1)$$

где $a_1 = k_{12}/(r G_1)$; $a_2 = k_{12}/(c_2 G_2)$; $a_3 = k_{13}/(c_3 G_3)$; $a_4 = k_{13}/(r G_1)$; k – коэффициент теплопередачи; r – удельная теплота парообразования; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя; одинарный индекс показывает номер теплоносителя: 1 – пар; 2 – циркуляционная вода; 3 – сетевая вода; двойной индекс у коэффициента теплопередачи показывает номера теплоносителей, между которыми происходит теплообмен.

При начальных условиях $x_1|_{F=0} = x_{10}$, $t_2|_{F=0} = t_{20}$, $t_3|_{F=0} = t_{30}$ решение системы дифференциальных уравнений (1) записывается в матричном виде [2]:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} & b_{27} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} & b_{37} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} & b_{47} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} & b_{57} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} & b_{67} \\ b_{71} & b_{72} & b_{73} & b_{74} & b_{75} & b_{76} & b_{77} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{10} \\ x_1 \\ t_{n1} \\ t_{20} \\ t_2 \\ t_{30} \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{10}^* \\ x_1^* \\ t_{n1}^* \\ t_{20}^* \\ t_2^* \\ t_{30}^* \\ t_3^* \end{pmatrix} \quad (2)$$

или

$$\mathbf{B} \times \mathbf{T} = \mathbf{T}_0, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} & b_{27} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} & b_{37} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} & b_{47} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} & b_{57} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} & b_{67} \\ b_{71} & b_{72} & b_{73} & b_{74} & b_{75} & b_{76} & b_{77} \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} x_{10} \\ x_1 \\ t_{n1} \\ t_{20} \\ t_2 \\ t_{30} \\ t_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_0 = \begin{pmatrix} x_{10}^* \\ x_1^* \\ t_{n1}^* \\ t_{20}^* \\ t_2^* \\ t_{30}^* \\ t_3^* \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица \mathbf{T} составляется из неизвестных параметров системы (2), а матрица свободных членов \mathbf{T}_0 заполняется численными значениями известных параметров, которые отмечены звездочкой. Если значение параметра неизвестно, то в матрице \mathbf{T}_0 соответствующий элемент равен нулю. Разреженная матрица \mathbf{B} (3) содержит большое число нулевых элементов. Ниже приводятся выражения только для тех элементов разреженной матрицы $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}$, которые принимают ненулевые значения:

$$\begin{aligned} b_{11} &= 1, \quad b_{12} = -1, \\ b_{13} &= -\frac{a_1}{a_2}(1 - \exp(-a_2 * F_{12})) - \frac{a_4}{a_3}(1 - \exp(-a_3 * F_{13})), \\ b_{14} &= a_1 / a_2 * (1 - \exp(-a_2 * F_{12})), \\ b_{16} &= a_4 / a_3 * (1 - \exp(-a_3 * F_{13})), \\ b_{23} &= -a_4 / a_3 * (1 - \exp(-a_3 * F_{13})), \\ b_{24} &= \exp(-a_2 * F_{12}), \\ b_{25} &= -1, \\ b_{33} &= 1 - \exp(-a_3 * F_{13}), \\ b_{36} &= \exp(-a_3 * F_{13}), \\ b_{37} &= -1, \\ b_{44} &= 1, \quad b_{53} = 1, \quad b_{66} = 1, \quad b_{72} = 1, \end{aligned}$$

где F_{12} – площадь поверхности теплообмена основного пучка; F_{13} – площадь поверхности теплообмена встроенного пучка конденсатора.

Из решения системы (1) с учетом начальных условий получаем три первых уравнения системы (2), остальные четыре уравнения системы записаны формально для возможности с их помощью задать вариант численных значений известных параметров. Таким образом, система (2) из семи уравнений может быть решена относительно трех любых неизвестных величин, а четыре параметра нужно задать в качестве исходных данных. Этот прием позволяет унифицировать и автоматизировать составление модели при решении обратных задач в различных постановках при различном наборе исходных параметров.

Следует отметить, что число вариантов задания исходных данных при постановке обратных задач проектирования в данном случае равно

числу сочетаний 4 из 7 [9], т. е. $C_7^4 = 7! / (4! * 3!) = 35$.

С учетом того что пар из конденсатора может выходить только в виде жидкости, указанное ограничение ($x_1 = 0$) уменьшает число вариантов задания исходных данных при постановке обратных задач до числа сочетаний 3 из 6, т. е. до $C_6^3 = 6! / (3! * 3!) = 20$ вариантов. Приведенная выше модель (2) и выражения для ее коэффициентов представлены для случая задания следующего варианта набора известных параметров: $x_{10}, x_1, t_{20}, t_{30}$.

Результаты. Решение системы линейных уравнений (3) находится методом обращения матриц [9] согласно выражению

$$\mathbf{T} = \mathbf{B}^{-1} * \mathbf{T}_0, \quad (6)$$

где возведение матрицы в степень (-1) означает ее обращение. В качестве расчетного примера, демонстрирующего возможности модели, рассматривается решение прямой задачи применительно к конденсатору К-14000 УТЗ. В качестве допущений принимается, что степень сухости пара, поступающего из турбины в конденсатор, равна единице. Пар покидает конденсатор после его полной конденсации со степенью сухости, равной нулю. В качестве исходных данных для решения прямой задачи используются следующие значения параметров теплоносителей: $t_{20} = 25$ °С; $t_{30} = 40$ °С; $c = 4,187$ кДж/(кг·К); $r = 2256$ кДж/кг; $G_1 = 156$ кг/с; $G_2 = 9667$ кг/с; $G_3 = 2417$ кг/с; $x_{10} = 1$; $x_1 = 0$; $F_{12} = 15400$ м²; $F_{13} = 3696$ м².

В качестве неизвестных параметров при решении прямой задачи выбираются: температура насыщенного пара в конденсаторе, которая однозначно определяет вакуум в установке; температуры циркуляционной и сетевой воды на выходе из установки. Полученные решения прямой задачи представлены на рис. 3 в виде зависимости температуры насыщенного пара от расхода пара в конденсатор.

Анализ представленных зависимостей и их сравнение с нормативными данными показали адекватное описание моделью нормативных данных, представленных на рис. 3 точками [4, 6].

Предложенная модель после проверки ее адекватности используется для решения обратной задачи диагностики состояния поверхностей нагрева основного и встроенного пучков труб конденсатора. Считается, что состояние поверхности нагрева характеризуется коэффициентом теплопередачи. В исходном состоянии при чистой поверхности коэффициенты теплопередачи приняты равными для встроенного и основного пучков конденсатора $k_{12} = k_{13} = 3000$ Вт/(К·м²). После того как поверхность основного пучка искусственно «загрязнили», задавая коэффициент теплопередачи равным $k_{12} = 2000$ Вт/(К·м²), и вы-

полнили прямой расчет согласно (6), полученные данные были использованы в качестве «экспериментальных» для диагностики состояния в рамках решения обратной задачи.

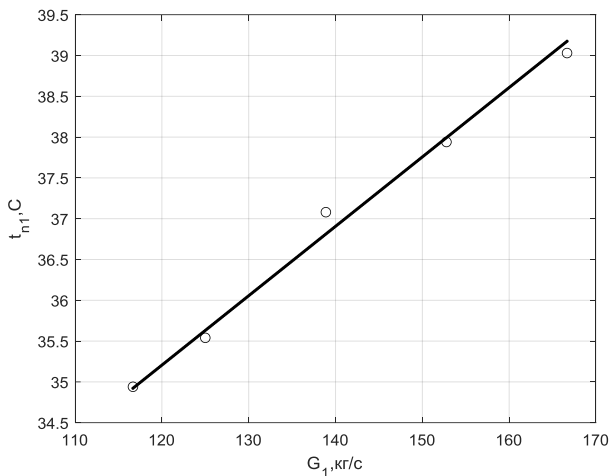


Рис. 3. Зависимость температуры насыщения пара от расхода пара в конденсатор при $G_3 = 2417 \text{ кг/с}$ и $t_{30} = 40 \text{ °C}$, $t_{20} = 25 \text{ °C}$: точками показаны нормативные данные [4, 6]

Обратная задача в данном случае формулируется в виде оптимизационной задачи, в которой в качестве целевой функции выбрано расхождение замеренных и рассчитанных значений температур насыщения, циркуляционной воды на выходе и сетевой воды на выходе конденсатора:

$$F_c = \sum_i (T_i^a - T_i^p)^2 = \min_{k_{12}, k_{13}} \quad (7)$$

где верхний индекс «р» относится к рассчитанному, «э» — к «экспериментальному» значению параметра.

В качестве параметров оптимизации выбираются коэффициенты теплопередачи для основного и встроенного пучков. Для решения сформулированной задачи используется метод перебора [10–13], а результаты ее решения представлены на рис. 4 в виде линий уровня значений целевой функции, где минимальное значение целевой функции, отмеченное точкой, равно $F_{c, \min} = 0,001$ и соответствует значениям коэффициентов теплопередачи для основного и встроенного пучков: $k_{12} = 1999 \text{ Вт/(К·м}^2\text{)}$, $k_{13} = 3004 \text{ Вт/(К·м}^2\text{)}$. Максимальная относительная погрешность найденных значений по сравнению с заданными значениями составляет менее 0,1 %. Таким образом, в ходе решения обратной задачи удалось диагностировать загрязнение поверхности основного пучка.

Закрашенная область на рис. 4 соответствует значению целевой функции менее 0,01. Найденное оптимальное решение обозначено точкой.

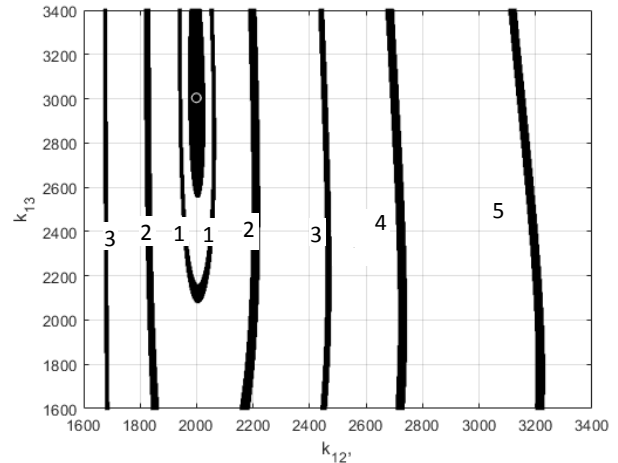


Рис. 4. Решение оптимизационной задачи диагностики состояния поверхности нагрева основного и вспомогательного пучков конденсатора: точкой отмечено оптимальное решение: $F_c = 0,001$; $k_{12} = 1999 \text{ Вт/(К·м}^2\text{)}$; $k_{13} = 3004 \text{ Вт/(К·м}^2\text{)}$; цифрами показаны линии уровня целевой функции (7): 1 – $F_c = 0,01$; 2 – $F_c = 0,1$; 3 – $F_c = 1$; 4 – $F_c = 4$; 5 – $F_c = 8 \text{ °C}^2$

Выводы. Выполненный расчетный анализ показал, что предложенная постановка и решение обратной задачи позволяют при заданном объеме используемых экспериментальных данных в режиме реального времени диагностировать состояние основного и встроенного пучков поверхностей нагрева конденсатора. Важно отметить, что представленный метод расчета, полученный с рядом допущений, может быть существенно детализирован через введение в модель более точных подмоделей при более детальном анализе основного и встроенного пучков конденсатора.

Предложенный подход может быть использован для диагностики состояния работающего оборудования и перехода от проведения планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по состоянию.

Список литературы

1. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, М.С. Боброва и др. // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 62–69.
2. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
3. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Конденсационные установки паровых турбин: расчет энергетических характеристик. – Иваново, 2014. – 112 с.
4. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Энергетические характеристики оборудования ТЭС. – Иваново, 2014. – 232 с.
5. Бродов Ю.М. Атлас конструкций теплообменных аппаратов турбоустановок ТЭС и АЭС: учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1980. – 31 с.

6. **Бродов Ю.М., Савельев Р.З.** Конденсационные установки паровых турбин: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

7. **Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М.** Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.

8. **Рихтер Л.А., Елизаров Д.П., Лавыгин В.М.** Вспомогательное оборудование тепловых электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 216 с.

9. **Выгодский М.Я.** Справочник по элементарной математике. – М.: Наука, 1973. – 416 с.

10. **Власов В.Г.** Конспект лекций по высшей математике. – М.: Айрис 1996. – 288 с.

11. **Мэтьюс Д.Г., Финк К.Д.** Численные методы. Использование MATLAB. – М.: Лань, 2001. – 720 с.

12. **Волков Е.А.** Численные методы: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2007. – 256 с.

13. **Соловьев И.А., Червяков А.В., Репин А.Ю.** Прикладная математика. Применение программной среды Python S60. – М., 2010. – 280 с.

References

1. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Bobrova, M.S., Belyakov, A.N., Shuvalov, S.I. *Matrichnyy metod resheniya obratnoy zadachi teploperedachi v teploobmennyykh apparatakh* [Matrix method to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 62–69.

2. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass transfer installations]. Ivanovo, 2009. 176 p.

3. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin: raschet energeticheskikh kharakteristik* [Condensation installations of steam turbines: calculation of energy characteristics]. Ivanovo, 2014. 112 p.

4. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Energeticheskie kharakteristiki oborudovaniya TES* [Energy characteristics of TPP equipment]. Ivanovo, 2014. 232 p.

5. Brodov, Yu.M. *Atlas konstruktivnykh teploobmennyykh apparatov turbostanovok TES i AES* [Atlas of designs of heat exchange devices of turbine installations of thermal power plants and nuclear power plants]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 1980. 31 p.

6. Brodov, Yu.M., Savel'ev, R.Z. *Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin* [Condensing installations of steam turbines]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 288 p.

7. Nazmееv, Yu.G., Lavygin, V.M. *Teploobmennyye apparaty TES* [Heat exchangers of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 288 p.

8. Rikhter, L.A., Elizarov, D.P., Lavygin, V.M. *Vspomogatel'noye oborudovaniye teplovykh elektrostantsiy* [Auxiliary equipment of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 216 p.

9. Vygodskiy, M.Ya. *Spravochnik po elementarnoy matematike* [Handbook of elementary mathematics]. Moscow: Nauka, 1973. 416 p.

10. Vlasov, V.G. *Konspekt lektsiy po vysshey matematike* [Lecture notes on higher mathematics]. Moscow: Ayris, 1996. 288 p.

11. Met'yuz, D.G., Fink, K.D. *Chislennyye metody. Ispol'zovaniye MATLAB* [Numerical methods. The use of MATLAB]. Moscow: Lan', 2001. 720 p.

12. Volkov, E.A. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Saint-Petersburg: Lan', 2007. 256 p.

13. Solov'ev, I.A., Chervyakov, A.V., Repin, A.Yu. *Prikladnaya matematika. Primeneniye programmnoy sredy Python S60* [Applied mathematics. Application of the Python S60 software environment]. Moscow, 2010. 280 p.