

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: rector@ispu.ru

Кирилл Николаевич Бубнов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

Сергей Ильич Шувалов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Михаил Александрович Кузнецов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: mihailkuznecov908@gmail.com

Матричное моделирование и диагностика состояния регенеративных подогревателей высокого давления

Авторское резюме

Состояние вопроса. Повышение эффективности работы теплообменных аппаратов является одним из основных путей энергосбережения, которое относится к приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий Российской Федерации. Совершенствование процессов теплообмена в регенеративных подогревателях и конденсаторах турбоустановок тепловых электрических станций позволяет существенно повысить эффективность работы энергетического оборудования. Диагностика состояния и совершенствование режимов работы регенеративных подогревателей высокого давления, которые являются составной частью систем регенеративного подогрева питательной воды турбоустановок, являются актуальными научными и практическими задачами.

Материалы и методы. Для разработки модели регенеративного подогревателя высокого давления использована методология матричной формализации описания тепло- и массообменных процессов. Для решения задач диагностирования состояния поверхностей нагрева теплообменного оборудования применены методы математического программирования.

Результаты. В рамках методологии матричной формализации разработан подход к моделированию и решению задач диагностики многоступенчатых теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях. Исследована чувствительность полученного решения к входным сигналам. Получены и проанализированы решения задачи для возможного диагностирования состояния регенеративного подогревателя высокого давления.

Выводы. Анализ полученных расчетных результатов показал адекватное описание моделью реального теплообменного процесса для анализируемого подогревателя и возможность использования предложенной модели для мониторинга и оперативной диагностики состояния энергетического оборудования. Предложенный подход позволяет формулировать и решать обратные задачи диагностики состояния оборудования теплообменных установок различного назначения.

Ключевые слова: регенеративный подогрев питательной воды, паровая турбина, методология матричной формализации, уравнение баланса энергий, многоступенчатые теплообменные аппараты

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: rector@ispu.ru

Kirill Nikolaevich Bubnov

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

Sergei Ilyich Shuvalov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Mikhail Alexandrovich Kuznetsov

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

Matrix modeling and condition diagnostics of high pressure regenerative heaters

Abstract

Background. Increasing the efficiency of heat exchangers is a promising area of energy saving, which is one of the priority areas of the development of science, engineering, and technology in the Russian Federation. Improvement of heat and mass transfer in regenerative heaters and condensers of turbine units of thermal power plants can significantly increase the operating efficiency of power equipment. Diagnostics of the condition and improvement of operating modes of the high-pressure regenerative heater which are an integral part of regenerative heating systems for feedwater of turbine units, are urgent scientific and practical tasks.

Materials and methods. To develop a model of a high-pressure regenerative heater, the methodology of matrix formalization of the description of heat and mass transfer processes has been used. To solve problems of diagnosing the state of heating surfaces of heat exchange equipment, mathematical programming methods have been applied.

Results. Within the framework of the matrix formalization methodology, an approach to modeling and solving diagnostic problems of multi-stage heat exchangers considering the phase transition in coolants has been developed. The sensitivity of the resulting model to input signals has been studied. Solutions of the problem of diagnosing the state of a high-pressure regenerative heater have been obtained and analyzed.

Conclusions. Analysis of the obtained calculated results has shown an adequate description using the model of the real heat exchange process for the analyzed heater and the possibility to use the proposed model for monitoring and operational diagnostics of power equipment. The proposed approach allows us to formulate and solve inverse problems of diagnosing the state of equipment of heat exchange installations for various purposes.

Key words: regenerative heating of feedwater, steam turbine, matrix formalization methodology, energy balance equation, multi-stage heat exchangers

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.082-091

Введение. Эффективная организация функционирования системы регенеративного подогрева питательной воды (системы регенерации) турбоустановок тепловых электрических станций (ТЭС) и атомных электрических станций (АЭС) позволяет существенно (на 12 %) повысить коэффициент полезного действия энергоблока [1–6]. Загрязнение поверхностей нагрева, наличие неисправностей и дефектов в системе регенерации приводит к снижению тепловой экономичности турбоустановки [6–9]. Диагностика состояния поверхностей нагрева теплообменных аппаратов позволяет своевременно выявлять загрязнение и наличие дефектов, что, в свою очередь, позволяет прогнозировать возможное развитие аварийных и нестандартных ситуаций и оперативно их устранять [10, 11]. Для диагностики и прогнозирования состояния оборудования предлагается использовать подходы, базирующиеся на нейросетевых и регрессионных зависимостях или на математических моделях оборудования [10, 11]. Первые два подхода связаны с использованием больших массивов данных, которые должны соответствовать как штатным, так и нестандартным и аварийным режимам работы оборудования. Возможность получения таких данных для аварийных и нестандартных условий работы энергоблоков ТЭС и АЭС связана с определенными трудностями, обусловленными частичной или полной утерей данных при нестандартных или аварийных ситуациях или с ограничениями открытого доступа к этим данным. Разработка систем диагностики на базе математических моделей технологического оборудования лишена указанных ограничений, поэтому является наиболее перспективным направлением построения указанных систем [10, 11].

В настоящем исследовании под прямыми задачами теплопередачи [11] понимаются задачи, ориентированные на проведение поверочных расчетов, при выполнении которых предполагается подбор оборудования из стандартного ряда, при фиксированных конструктивных параметрах. Расчетом проверяются возможности функционирования оборудования для конкретных условий.

В обратных задачах выполняются, как правило, проектные расчеты, которые ориентированы на выбор конструктивных и режимных параметров, обеспечивающих эффективную работу [11] или диагностику состояния оборудования. Ранее нами были сформулированы и решены обратные задачи теплопередачи, построенные на матричном подходе к моделированию процессов теплопередачи, для регенеративных подогревателей низкого давления и для конденсационных установок ТЭС [11].

Ниже представлено развитие матричного подхода для моделирования и диагностики регенеративных подогревателей высокого давления, которые имеют более сложную структуру потоков и более высокие значения параметров теплоносителей по сравнению с подогревателями низкого давления [12, 13].

Регенеративные подогреватели высокого давления обычно дополнительно оборудуются поверхностями теплообмена для охлаждения пара и конденсата [14–16]. Кроме питательной воды в подогреватель дополнительно могут подаваться потоки дренажей из подогревателя с более высоким давлением. Процесс теплопередачи в подогревателях обычно сопровождается фазовым переходом при конденсации турбинного пара, что существенно усложняет моделирование процесса теплообмена в этих установках. В существующих методах расчета регенеративных подогревателей [1, 4, 6] в качестве исходных данных используются величины недогрева питательной воды в подогревателе до температуры насыщения пара. Данные параметры получают, как правило, в результате статистической обработки результатов испытания существующего исправного оборудования. Их проблематично использовать для диагностики состояния поверхностей нагрева загрязненного или неисправного оборудования. Разработка адекватных методов расчета и их использование для решения задач диагностики регенеративных подогревателей высокого давления турбоустановки с учетом сложной структуры организации потоков теплоносителей и фазового перехода

в теплоносителях является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой [9].

Объектом исследования является подогреватель высокого давления (ПВД) системы регенерации турбоустановки. В качестве **предмета** исследования рассматривается постановка и решение прямой задачи и задачи диагностики состояния подогревателей высокого давления с учетом фазового перехода в горячем теплоносителе.

Целью исследования является анализ чувствительности и прогностических возможностей модели для разработки систем диагностики состояния поверхностей нагрева подогревателя высокого давления на основе решения прямой и обратной задач теплопередачи.

Для достижения цели исследования разрабатывается матричная модель процесса теплопередачи в ПВД, на основе которой формулируется прямая задача и анализируется чувствительность и возможность модели для решения задач диагностики состояния подогревателя.

Материалы и методы. Метод и характеристика объекта исследования. Объект исследования с указанием направления движения основных потоков теплоносителей показан на рис. 1.

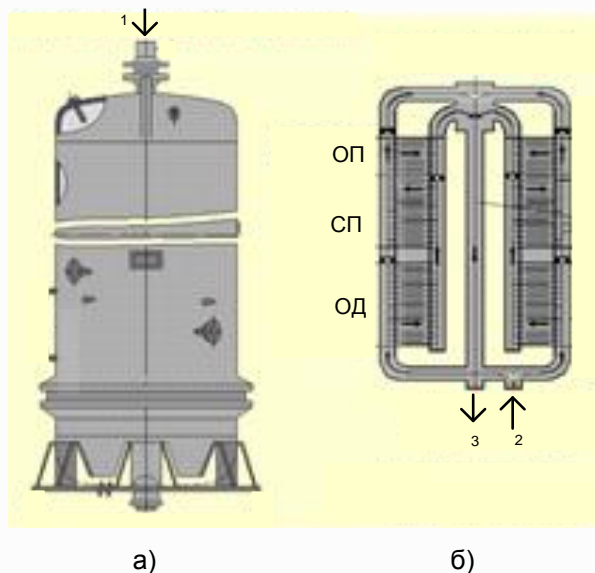


Рис. 1. Вид регенеративного подогревателя высокого давления (а) с указанием основных потоков теплоносителей (б)

Поток пара из отбора турбины 1 подается сверху в межтрубное пространство охладителя пара (ОП), затем направляется в собственно подогреватель (СП), где происходит его конденсация и переход в жидкую

фазу. Образовавшийся конденсат дополнительно охлаждается, передавая тепловую энергию питательной воде в охладителе дренажа (ОД). Питательная вода 2 сначала поступает в охладитель дренажа, затем в собственно подогреватель, где происходит ее нагрев за счет тепла конденсации отборного пара турбины. Затем питательная вода направляется в охладитель пара, после которого покидает подогреватель 3. Следует отметить, что в охладитель дренажа и охладитель пара направляется только часть питательной воды, что реализуется посредством установки дроссельных шайб. Ниже анализируется последний по ходу питательной воды подогреватель высокого давления, после которого питательная вода направляется в котел. При этом дренаж конденсата пара вышестоящего подогревателя не поступает в рассматриваемый подогреватель. Наличием отсоса паровоздушной смеси из парового пространства подогревателя ввиду малости его расхода пренебрегаем.

Традиционно в качестве исходных данных при моделировании регенеративных подогревателей [4–6] задаются величиной недогрева питательной воды до состояния насыщения, что позволяет проводить поверочные расчеты новых и чистых поверхностей нагрева. Однако такой подход проблематично использовать для расчета и диагностики подогревателей, которые имеют дефекты или загрязненные поверхности нагрева. Для моделирования многопоточных и многоступенчатых аппаратов, к которым относятся ПВД, предлагается матричный подход [9–11], который не требует задания указанных величин и может использоваться для диагностики состояния поверхностей нагрева.

Схема потоков с указанием направления движения теплоносителей в подогревателе высокого давления представлена на рис. 2,а. Расчетная схема потоков, которая используется при составлении уравнений модели, показана на рис. 2,б. 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 (змеевиков), участвующих в теплообмене.

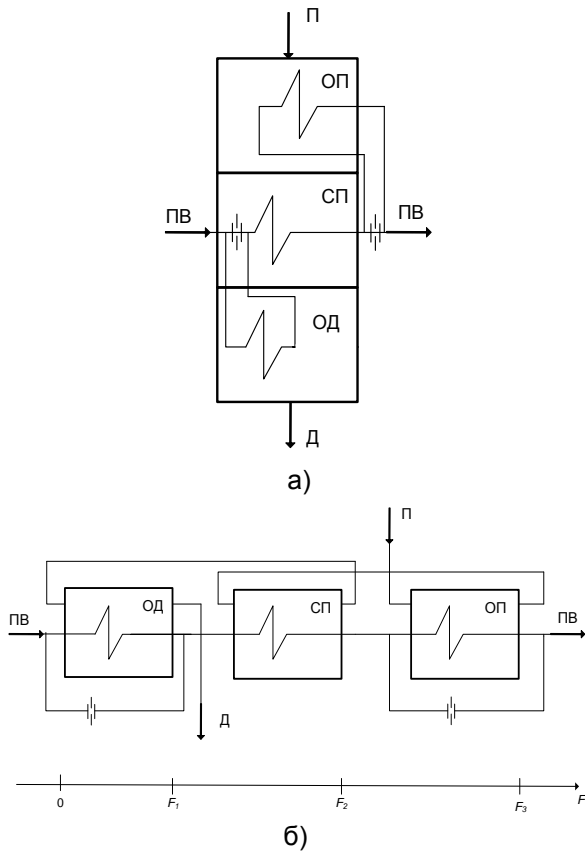


Рис. 2. Схема потоков теплоносителей в подогревателе (а), расчетная схема подогревателя (б) с указанием направления оси определяющей координаты процесса F : П – пар; ПВ – питательная вода; Д – дренаж; ОП – охладитель пара; СП – собственно подогреватель; ОД – охладитель дренажа

Согласно расчетной схеме, представленной рис. 2,б, строится модель процесса теплопередачи отдельно для каждой из трех ступеней подогревателя в виде системы двух дифференциальных уравнений. Указанная система представляется в следующем виде [9]:

– для охладителя дренажа

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = a_1(t_1 - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2(t_1 - t_2); \end{cases} \quad (1)$$

– для собственно подогревателя

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = a_3(t_{m1} - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_4(t_{m1} - t_2); \end{cases} \quad (2)$$

– для охладителя пара

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = a_5(t_1 - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_6(t_1 - t_2), \end{cases} \quad (3)$$

где $a_1 = k_1/(c_1G_1)$; $a_2 = k_1/(c_2G_{2OD})$; $a_3 = k_2/(rG_1)$; $a_4 = k_2/(c_2G_2)$; $a_5 = k_3/(c_{1p}G_1)$; $a_6 = k_3/(c_2G_{2op})$; t – температура теплоносителя; x – степень сухости пара; k – коэффициент теплопередачи (нижний индекс соответствует номеру ступени по ходу движения питательной воды: 1 – ОД; 2 – СП; 3 – ОП); r – удельная теплота парообразования; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя (одинарный индекс показывает номер теплоносителя: 1 – горячий теплоноситель (пар, дренаж); 2 – холодный теплоноситель (питательная вода)).

Состояние пара при конденсации в СП описывается степенью сухости x , которая показывает массовую долю пара в пароводяной смеси [4, 9]. Температура пара в состоянии насыщения при этом считается постоянной ($t_n = const$).

При начальных условиях $t_2|_{F=0} = t_{20}$, $t_1|_{F=F_1} = t_{10} = t_n$ решение системы дифференциальных уравнений (1) для ОД представляется в матричном виде [9, 11]:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{10}^* \\ t_{20}^* \\ t_1^* \\ t_2^* \end{pmatrix}, \quad (4)$$

или

$$\mathbf{B}_1 \times \mathbf{T}_1 = \mathbf{T}_{10}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_{10} = \begin{pmatrix} t_{10}^* \\ t_{20}^* \\ t_1^* \\ t_2^* \end{pmatrix}.$$

Матрица \mathbf{T}_1 составляется из неизвестных параметров системы (1), а матрица свободных членов \mathbf{T}_{10} заполняется значениями известных параметров, которые отмечены звездочкой. Если значение параметра неизвестно, то в матрице \mathbf{T}_{10} соответствующий элемент зануляется. Разреженная матрица \mathbf{B}_1 в уравнении (5) состоит преимущественно из нулевых элементов. Ниже приводятся выражения только для

ненулевых элементов разреженной матрицы $\mathbf{B}_1 = \{b_{ij}\}$:

$$\begin{aligned} b_{11} &= -C_3 + C_3 * a_1 / a_2; \quad b_{12} = 1 + C_3 - C_3 * a_1 / a_2; \\ b_{13} &= -1; \quad b_{14} = 0; \quad b_{21} = -C_3 + C_3 * \exp((a_1 - a_2) * F_1); \\ b_{22} &= 1 + C_3 - C_3 * \exp((a_1 - a_2) * F_1); \quad b_{23} = 0; \\ b_{24} &= -1; \quad C_3 = 1 / (a_1 / a_2 * \exp((a_1 - a_2) * F_1) - 1), \end{aligned}$$

где F_1 – площадь поверхности теплообмена ОД.

Для моделирования теплообмена в СП принимается, что степень сухости пара на входе в СП равна единице ($x_{10} = 1$), а на выходе пар полностью превращается в воду ($x_1 = 0$). Решение системы (2) с начальными условиями $x_1|_{F=F_2} = x_{10}$, $t_2|_{F=F_1} = t_{20}$, $x_1|_{F=F_1} = x_1$

записывается в виде пяти уравнений с использованием дополнительно в качестве неизвестного параметра температуры насыщения в подогревателе:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 & b_{15} \\ 0 & b_{22} & 0 & 1 & b_{25} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{10} \\ t_{20} \\ x_1 \\ t_2 \\ t_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{10}^* \\ t_{20}^* \\ x_1^* \\ t_2^* \\ t_n^* \end{pmatrix},$$

или $\mathbf{B}_2 \times \mathbf{T}_2 = \mathbf{T}_{20}$, (6)

где

$$\mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 & b_{15} \\ 0 & b_{22} & 0 & 1 & b_{25} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} x_{10} \\ t_{20} \\ x_1 \\ t_2 \\ t_n \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_{20} = \begin{pmatrix} x_{10}^* \\ t_{20}^* \\ x_1^* \\ t_2^* \\ t_n^* \end{pmatrix},$$

где $b_{11} = 1; b_{12} = a_3 / a_4 * (1 - \exp(-a_4 * F_2)); b_{13} = -1;$

$$b_{14} = 0; \quad b_{15} = -a_3 / a_4 * (1 - \exp(-a_4 * F_2));$$

$$b_{21} = 0; \quad b_{22} = -\exp(-a_4 * F_2); \quad b_{23} = 0; \quad b_{24} = 1;$$

$b_{25} = -(1 - \exp(-a_4 * F_2)); F_2$ – площадь поверхности теплообмена СП.

Для описания охладителя пара решение системы (3) при выбранных начальных

условиях $t_1|_{F=F_3} = t_{10}$, $t_2|_{F=F_2} = t_2$ записывается в матричной форме следующим образом:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{10}^* \\ t_{20}^* \\ t_1^* \\ t_2^* \end{pmatrix},$$

или

$$\mathbf{B}_3 \times \mathbf{T}_3 = \mathbf{T}_{30}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{B}_3 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & -1 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{T}_3 = \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_{30} = \begin{pmatrix} t_{10}^* \\ t_{20}^* \\ t_1^* \\ t_2^* \end{pmatrix},$$

где

$$b_{11} = -C_4 + C_4 * a_5 / a_6; \quad b_{12} = 1 + C_4 - C_4 * a_5 / a_6;$$

$$b_{13} = -1; \quad b_{14} = 0; \quad b_{21} = -C_4 + C_4 * \exp((a_5 - a_6) * F_3);$$

$$b_{22} = 1 + C_4 - C_4 * \exp((a_5 - a_6) * F_3); \quad b_{23} = 0;$$

$$b_{24} = -1; \quad C_4 = 1 / (a_5 / a_6 * \exp((a_5 - a_6) * F_3) - 1);$$

F_3 – площадь поверхности теплообмена ОП.

Через охладитель пара и охладитель дренажа проходит только часть питательной воды. На выходе из ОП и ОД потоки смешиваются, а температура питательной воды после смешивания определяется из уравнения баланса энергий:

$$\langle t \rangle_2^{\text{ОД}} = t_{20} * (1 - \alpha_1) + t_2 * \alpha_1, \quad (8)$$

$$\langle t \rangle_2^{\text{ОП}} = t_{20} * (1 - \alpha_3) + t_2 * \alpha_3,$$

где α_1, α_3 – доли питательной воды, подаваемые в ОД и ОП соответственно.

Математическая модель, представленная зависимостями (4)–(8), позволяет описывать процесс теплообмена в регенеративном подогревателе высокого давления.

Результаты. Практические расчеты. Расчетные исследования в рамках предложенной модели выполнены для регенеративного подогревателя высокого давления типа ПВ 900-380-66. Исходные данные приведены в таблице. Алгоритм расчета ПВД показан на рис. 3.

Исходные данные для расчета подогревателя

Наименование параметра, обозначение, единица измерения	Значение
Расход пара G_1 , кг/с	13,90
Расход питательной воды G_2 , кг/с	269,91
Температура пара на входе в подогреватель t_{10} , °C	375
Температура насыщения пара при давлении перед подогревателем t_n , °C	279
Температура питательной воды на входе в подогреватель t_{20} , °C	242
Теплоемкость конденсата пара c_1 , Дж/кг/К	4187
Теплоемкость пара c_{1p} , Дж/кг/К	2250
Теплоемкость питательной воды c_2 , Дж/кг/К	4347
Теплота парообразования r , Дж/кг	1944000
Поверхность нагрева общая F , м ²	980
Поверхность нагрева ОД F_1 , м ²	75
Поверхность нагрева ОП F_3 , м ²	101
Доля расхода питательной воды через ОД α_1	0,2725
Доля расхода питательной воды через ОП α_3	0,0305
Коэффициент теплопередачи в ОД k_1 , Вт/м ² /К	2627
Коэффициент теплопередачи в СП k_2 , Вт/м ² /К	2614
Коэффициент теплопередачи в ОП k_3 , Вт/м ² /К	671

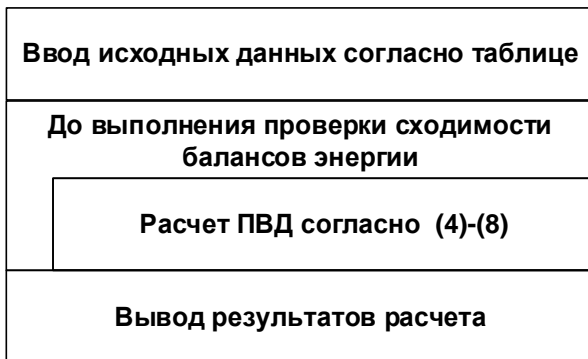


Рис. 3. Алгоритм расчета ПВД

Результаты расчетных исследований подогревателя высокого давления представлены на рис. 4 в виде зависимости температуры горячего теплоносителя (штриховая линия) и температуры питательной воды (сплошная линия) вдоль поверхностей нагрева регенеративного подогревателя.

Проверка адекватности модели проводилась посредством сопоставления нормируемой величины недогрева питательной воды до температуры насыщения, которая, согласно опубликованным данным¹, составляет 3 °C. В рамках проведенного расчета получено значение величины недогрева 2,9 °C. Отклонение расчетного значения от нормативного составило менее 0,3 %. Погрешности при сведении энергетических ба-

лансов по ступням и по подогревателю в целом составили менее 0,2 %. Анализ представленных расчетных результатов и нормативных данных показал корректность и адекватность разработанной модели.

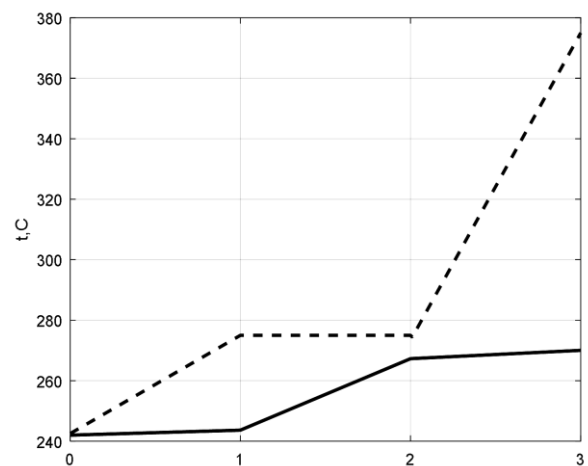


Рис. 4. Зависимость температуры пара (штриховая линия) и температуры питательной воды (сплошная линия) вдоль поверхностей нагрева от номера ступени ПВД: 1 – ОД; 2 – СП; 3 – ОП

Для оценки возможности использования представленной модели для решения задач диагностики состояния поверхностей нагрева ПВД проведен анализ чувствительности результатов модельных расчетов к возмущениям входных сигналов.

¹ Теплообменное оборудование паротурбинных установок: Отраслевой каталог. – М.: НИИЭинформэнергомаш, 1984. – 287 с.

На рис. 5 приведены результаты исследования анализа чувствительности модельных расчетов температуры насыщения пара в подогревателе и температуры питательной воды на выходе из ПВД к изменениям коэффициентов теплопередачи ОД, СП, ОП.

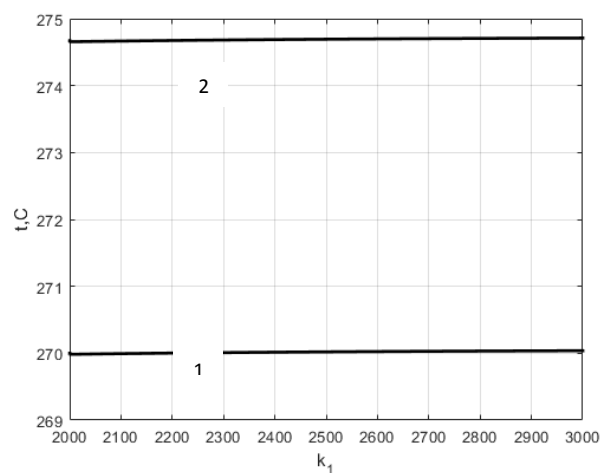
Расчетный анализ показал, что наиболее сильное влияние на рассчитанные характеристики ПВД оказывает изменение значения коэффициента теплопередачи собственно подогревателя (рис. 5,б), коэффициенты теплопередачи для ОД и ОП оказывают существенно меньшее влияние на теплообмен. Очевидно, это связано с меньшей площадью их поверхностей нагрева. Представленные результаты показывают, что в рамках предложенной модели целесообразно диагностировать состояние поверхностей нагрева собственно подогревателя по температуре насыщения или давлению пара в подогревателе.

Через охладитель пара и охладитель дренажа проходит только часть питательной воды, которая определяется параметрами дроссельных шайб. Загрязнение или износ дроссельной шайбы приводит к отклонению расходов воды от проектных значений. Для возможности диагностирования состояния дроссельных шайб проведены дополнительные расчетные исследования. На рис. 6 представлены результаты анализа чувствительности результатов модельных расчетов показателей работы подогревателя к возмущающим сигналам, в качестве которых рассматриваются доли потоков питательной воды, проходящие через охладитель пара и охладитель дренажа.

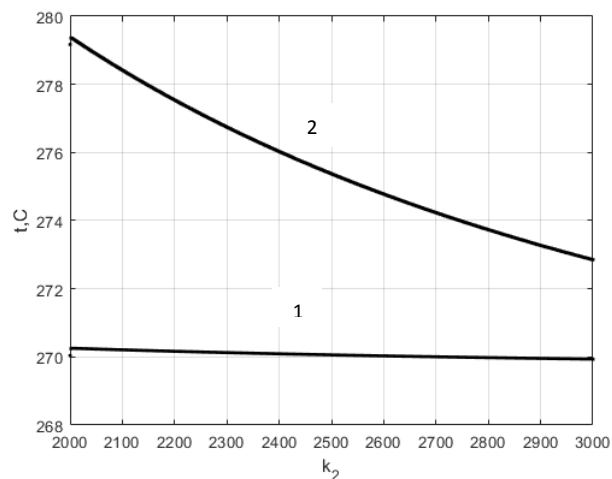
Анализ полученных результатов показал, что наиболее сильное влияние на температуру насыщения в подогревателе оказывает доля питательной воды, проходящая через ОД (рис. 6,а, кривая 2). На температуру питательной воды после подогревателя указанные анализируемые параметры оказывают практически одинаковые воздействия (рис. 6,а,б, кривые 1).

Дальнейшее исследование чувствительности и возможности использования разработанной модели при диагностике рассмотренных выше дефектов и загрязнений поверхностей нагрева предполагается выполнить в рамках постановки и решения оптимизационной задачи диагностики по аналогии с ранее выполненными исследованиями для конденсатора с теплофикационным

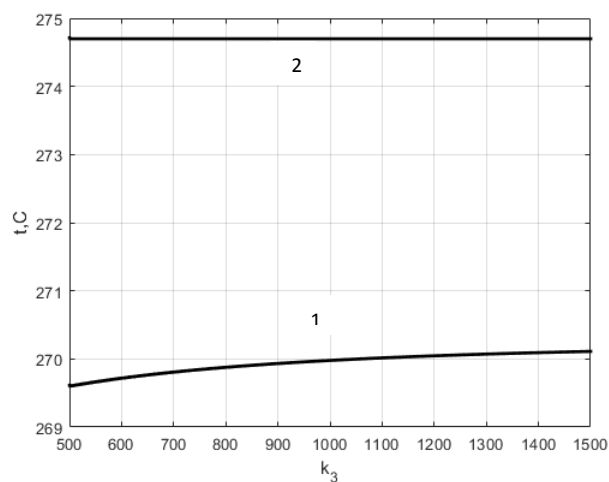
пучком [11]. Следует отметить, что каждый диагностируемый признак увеличивает число параметров оптимизации и время решения оптимизационной задачи.



а)



б)



в)

Рис. 5. Зависимости температуры насыщения (2) и питательной воды на выходе ПВД (1) от коэффициента теплопередачи ОД (а), СП (б), ОП (в)

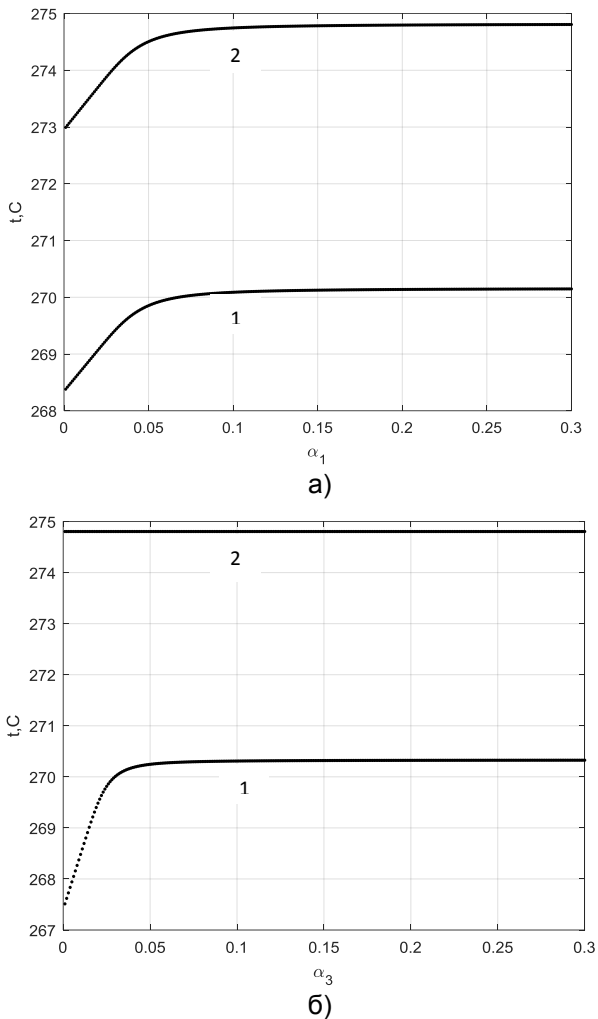


Рис. 6. Зависимости температуры воды на выходе ПВД (1) и температуры насыщения пара (2) от доли питательной воды, проходящей через ОД (а) и ОП (б)

Выводы. Выполненный расчетный анализ регенеративного подогревателя показал, что предложенная модель подогревателя и анализ ее чувствительности позволяют при ограниченном объеме используемых экспериментальных данных диагностировать состояние поверхностей нагрева охладителя дренажа, собственно подогревателя и охладителя пара.

Кроме этого, представленная модель позволяет диагностировать состояние дроссельной шайбы и контролировать расход питательной воды через охладитель пара и охладитель дренажа при ограниченном объеме используемых показаний штатных приборов.

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

Список литературы

1. Бродов Ю.М., Ниренштейн М.А. Расчет теплообменных аппаратов паротурбинных установок: учеб. пособие. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 373 с.
2. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
3. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Энергетические характеристики оборудования ТЭС. – Иваново, 2014. – 232 с.
4. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
5. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1: пер. с англ. / под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
6. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
7. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
9. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменников установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
10. 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.
11. Решение обратной задачи теплопередачи в конденсаторе турбоустановки со встроенным теплофикационным пучком / В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, М.Д. Фомичев и др. // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 1. – С. 85–91.
12. Бродов Ю.М. Атлас конструкций теплообменных аппаратов турбоустановок ТЭС и АЭС: учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1980. – 31 с.
13. Теплообменные аппараты в системах регенеративного подогрева питательной воды паротурбинных установок: учеб. пособие для вузов / Ю.М. Бродов, М.А. Ниренштейн, К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков / под ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1998. – 192 с.
14. Теплообменники энергетических установок: учебник для вузов / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др.; под ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: Сократ, 2003. – 968 с.
15. Бажан П.И., Каневец Г.М., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 366 с.
16. Берман С.С., Михеева И.М. Расчет теплообменных аппаратов турбоустановок. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

References

1. Brodov, Yu.M., Nirenshteyn, M.A. *Raschet teploobmennyykh apparatov paroturbinnyykh ustanovok* [Calculation of heat exchange devices of steam turbine installations]. Ekaterinburg: UGTU, 2001. 373 p.
2. Brodov, Yu.M., Savel'ev, R.Z. *Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin* [Condensing installations of steam turbines]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 288 p.
3. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Energeticheskie kharakteristiki oborudovaniya TES* [Energy characteristics of TPP equipment]. Ivanovo, 2014. 232 p.
4. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.
5. Martynenko, O.G. *Spravochnik po teploobmennikam v 2 t. T. 1* [Handbook of heat exchangers in 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.
6. Nazmeev, Yu.G., Lavygin, V.M. *Teploobmennyye apparaty TES* [Heat exchangers of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 288 p.
7. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat transfer during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.
8. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 416 p.
9. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass transfer installations]. Ivanovo, 2009. 176 p.
10. 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.
11. Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V., Fomichev, M.D., Belyakov, A.N., Kuznetsov, M.A. *Reshenie obratnoy zadachi teploperedachi v kondensatore turboustanovki so vstroennym teplofikatsionnym puchkom* [The solution of the inverse problem of heat transfer in the condenser of a turbine unit with an integrated thermal beam]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 1, pp. 85–91.
12. Brodov, Yu.M. *Atlas konstruksiy teploobmennyykh apparatov turboustanovok 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.
13. Brodov, Yu.M., Nirenshteyn, M.A., Aronson, K.E., Ryabchikov, A.Yu. *Teploobmennyye apparaty v sistemakh regenerativnogo podogreva pitatel'noy vody paroturbinnyykh ustanovok* [Heat exchangers in systems of regenerative heating of feedwater of steam turbine installations]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 1998. 192 p.
14. Aronson, K.E., Blinkov, S.N., Brezgin, V.I. *Teploobmenniki energeticheskikh ustanovok* [Heat exchangers of power plants]. Ekaterinburg: Sokrat, 2003. 968 p.
15. Bazhan, P.I., Kanevets, G.M., Seliverstov, V.M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam* [Handbook of heat exchangers]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989. 366 p.
16. Berman, S.S., Mikheeva, I.M. *Raschet teploobmennyykh apparatov turboustanovok* [Calculation of heat exchange apparatuses of turbine installations]. Moscow: Energia, 1973. 320 p.