

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.311.22

Владимир Павлович Жуков

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

Максим Дмитриевич Фомичев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: somebody.max@yandex.ru

Сергей Дмитриевич Горшенин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-34,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Роман Сергеевич Дударев

Нововоронежская атомная электрическая станция (НВАЭС), инженер, Россия, Нововоронеж, Воронежская область, e-mail: romandud111@gmail.com

Елена Александровна Шуина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующая кафедрой высшей математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-74,
e-mail: barantseva77@mail.ru

Моделирование и разработка информационно-диагностического комплекса системы оборотного охлаждения электрической станции

Авторское резюме

Состояние вопроса. Переход от планово-предупредительных ремонтов к ремонту по состоянию оборудования возможен и эффективен при наличии диагностических средств, которые достоверно определяют состояние оборудования. В связи с этим разработка системы диагностики состояния оборудования является актуальной задачей.

Материалы и методы. Решение задачи диагностики выполняется в рамках матричных математических моделей оборудования, построенных на основе балансовых уравнений энергии и массы, постановки и решения обратных задач диагностики оборудования рассматриваемой системы.

Результаты. На основе матричных моделей и решения прямых задач сформулированы и решены обратные задачи диагностики распределения потоков воды и воздуха по сечению градирни. На базе полученных решений разработаны рекомендации по устранению обнаруженных дефектов. Разработаны алгоритмы диагностики, которые успешно реализованы в информационном программном комплексе диагностики состояния оборудования системы оборотного охлаждения.

Выводы. Для тестирования, совершенствования и доведения информационной системы до практического использования необходима организация обмена актуальных данных измерительных приборов АСУТП для реального объекта.

Ключевые слова: система оборотного охлаждения, башенная градирня, конденсатор, циркуляционный насос, прямая задача диагностики, обратная задача диагностики, скорость ветра, распределение воздуха, многопоточный теплообмен, программно-диагностический комплекс

Vladimir Pavlovich Zhukov

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

Maksim Dmitriyevich Fomichev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: somebody.max@yandex.ru

Sergei Dmitriyevich Gorshenin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Roman Sergeevich Dudarev

Novovoronezh Nuclear Power Plant (NNPP), Engineer, Russia, Novovoronezh, Voronezh Region, e-mail: romandud111@gmail.com

Elena Alexandrovna Shuina

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Head of Higher Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-74, e-mail: barantseva77@mail.ru

Modeling and development of a diagnostic complex for circulating cooling system of an electric power plant

Abstract

Background. The transition from scheduled preventive maintenance to condition-based maintenance is possible and effective with the availability of diagnostic tools that reliably determine the condition of the equipment. Therefore, the development of a system to diagnose the condition of equipment is an urgent task.

Materials and methods. The diagnostic problem is solved within the framework of matrix mathematical models of equipment based on the balanced equations of energy and mass, formulation and solution of inverse diagnostic problems of the equipment of the system under consideration.

Results. Based on matrix models and the solution of direct problems, inverse problems of diagnosing the distribution of water and air flows across the cross-section of a cooling tower have been formulated and solved. Based on the obtained solutions, recommendations have been developed to eliminate the detected defects. Diagnostic algorithms have been developed and successfully implemented in an information software package to diagnose the condition of equipment in a circulating cooling system.

Conclusions. To test, improve and use the system, it is necessary to exchange up-to-date data of automated control system measuring devices of a real facility.

Key words: circulating cooling system, tower cooling tower, condenser, circulation pump, direct diagnostic problem, inverse diagnostic problem, wind speed, air distribution, multithreaded heat exchange, diagnostic software package

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.081-091

Введение. Через систему оборотного охлаждения (СОО) ТЭС и АЭС отводится в окружающую среду около 60 % энергии топлива, поступающего на станцию. Неполадки и дефекты СОО приводят к дополнительной потере энергии [1–3]. На эффективность работы СОО существенно влияет множество факторов: влажность и температура окружающего воздуха; скорость и направление ветра; биологические и механические загрязнения конденсатора турбины; качество циркуляционной воды; наличие отложений в подводящих и отводящих каналах;

угол установки лопастей осевого циркуляционного насоса; состояние водораспределительной и оросительной систем; эффективность каплеуловителей башенной градирни; исправность и степень открытия фрамуг градирни [4–7]. Часть перечисленных параметров (факторов) не зависит от персонала и может только приниматься к сведению и учитываться при настройке режимов работы (например, температура окружающего воздуха), а часть показателей состояния оборудования может оперативно диагностироваться и устраняться ремонтным или оперативным

персоналом (например, загрязнение трубок конденсатора). В любом случае оперативная информация о состоянии оборудования и возможных способах устранения обнаруженных дефектов является актуальной для оперативного и ремонтного персонала. В связи с этим разработка информационного комплекса диагностики СОО для обеспечения оперативного получения информации об указанных неисправностях является актуальной задачей.

Методы исследования. Для разработки системы диагностики СОО предлагается в качестве рабочего инструмента использовать постановку и решение прямых и обратных задач диагностики. Под прямыми задачами в общем случае [8] понимаются задачи, для которых заданы причины, а искомыми величинами являются следствия. Обратными будут задачи, в которых известны следствия, а неизвестными выступают причины. В обратных задачах определяющее уравнение и/или начальные, и/или граничные условия и/или коэффициенты не заданы полностью, но зато есть некоторая дополнительная информация. В общем случае можно говорить о коэффициентных (неизвестны некоторые коэффициенты уравнения), граничных (неизвестны граничные условия) и эволюционных (не задано начальное условие) обратных задачах математической физики. Под прямыми задачами СОО в нашем случае понимается определение температуры охлажденной циркуляционной воды по заданным исходным режимным параметрам теплоносителей, а под обратными задачами – диагностика возможных неисправностей СОО при заданных наборах параметров теплоносителей на входе и выходе. Следует отметить, что заданный набор параметров для каждой конкретной установки может отличаться, что обуславливает возможные различия в постановке обратной задачи.

Результаты исследования. На рис. 1 представлен объект исследования – система оборотного охлаждения, которая рассматривается в данном случае совокупностью трех подсистем: башенная градирня (БГ), конденсатор турбины (КТ) и гидротехническая система с циркуляционным насосом (ЦН). Выделенные на рис. 1 прямоугольные области соответствуют рассматриваемым подсистемам СОО.

Целью исследований является совершенствование системы оборотного охлаждения на базе решения прямых и обратных задач диагностики подсистем СОО. Для достижения цели предполагается решение следующих задач:

1. Моделирование процессов теплообмена и решение обратных задач диагностики для подсистемы «башенная градирня».
2. Разработка модели и метода решения обратных задач диагностики теплообменных процессов в конденсаторе турбины.
3. Разработка гидродинамической модели СОО для определения расходов воды через элементы системы.

4. Разработка информационной системы диагностики неисправностей СОО и рекомендаций по их локализации и исправлению.

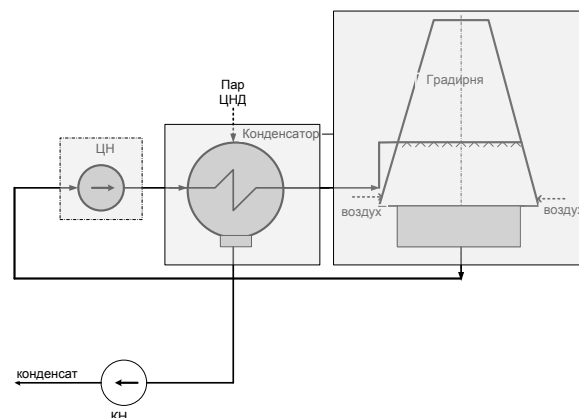


Рис. 1. Система оборотного охлаждения

Рассмотрим более подробно подходы к моделированию и анализу подсистем СОО для разработки методов их диагностики.

Задача 1. Моделирование и решение обратных задач диагностики для подсистемы башенная градирня. В рамках первой задачи рассматривается моделирование градирни и решение прямой и обратной задачи диагностики БГ.

Для оценки эффективности работы градирен требуется учет множества факторов: влажности и температуры наружного воздуха; скорости и направления ветра; степени минерализации циркулирующей воды; степени открытия воздухозаборных окон (фрамуг); распределения потоков воды и воздуха в поперечном сечении градирни [9–12]. Эффективная организация процесса охлаждения циркуляционной воды возможна на основе всестороннего анализа систем оборотного охлаждения с применением адекватных математических моделей. Для моделирования процессов теплопереноса с учетом фазовых превращений в теплоносителях применяются математические модели, основанные на уравнениях баланса массы и энергии [13, 14].

Циркуляционная вода подается в градирню через водораспределительную и оросительную системы, которые обеспечивают формирование развитой поверхности теплообмена между водой и восходящим воздушным потоком (рис. 1). Воздух поступает в градирню снизу и движется вверх навстречу потоку воды. В результате контакта с воздухом вода охлаждается за счет теплообмена и частичного испарения. Подробное описание модели теплообмена в башенной градирне представлено в [14], ниже приводятся основные сведения, необходимые для понимания представленного подхода к решению обратной задачи.

В качестве определяющей координаты процесса на рис. 2 представлена площадь поверхности теплообмена F . При этом потоки воздуха и пара двигаются в направлении

выбранной оси, а циркуляционная вода – в противоположном направлении. Хотя водяной пар входит в состав общего воздушного потока, при математическом моделировании он выделяется в самостоятельный поток для возможности отслеживания его параметров в процессе тепло-массопереноса.

Процесс теплопередачи в рассматриваемой трехпоточной системе описывается системой из трех дифференциальных уравнений, в которых искомыми функциями являются температуры охлаждаемой воды t_1 , водяного пара t_2 и воздуха t_3 .

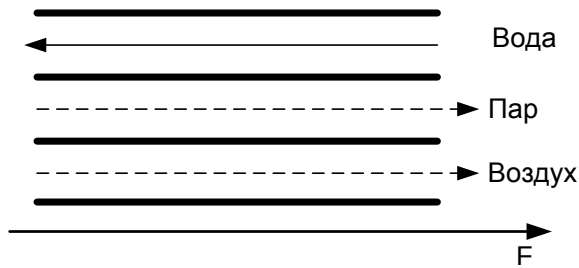


Рис. 2. Расчетная схема движения теплоносителей и тепломассообмена между теплоносителями в башенной градирне

Процесс массопереноса между циркуляционной водой и паровой фазой, происходящий за счет испарения с поверхности жидкости, описывается четвертым уравнением системы [14]. Движущей силой этого процесса является разность между текущим влагосодержанием воздуха C и его предельным значением при насыщении C_n , соответствующем данной температуре.

Таким образом, математическая модель процессов тепломассопереноса в градирне записывается в виде системы четырех дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = (-a_{12}(t_1 - t_2) - a_{13}(t_1 - t_3) + a_{14}(C - C_n))(-1), \\ \frac{dt_2}{dF} = -a_{21}(t_2 - t_1) - a_{23}(t_2 - t_3), \\ \frac{dt_3}{dF} = -a_{31}(t_3 - t_1) - a_{32}(t_3 - t_2), \\ \frac{dC}{dF} = -a_{42}(C - C_n), \end{cases} \quad (1)$$

где $a_{12} = K_{12} / (c_1 G_1)$; $a_{13} = K_{13} / (c_1 G_1)$;

$a_{14} = K_{14}^m G_3 r / (c_1 G_1)$; $a_{21} = K_{12} / (c_2 G_2)$;

$a_{23} = K_{23} / (c_2 G_2)$; $a_{31} = K_{31} / (c_3 G_3)$; $a_{42} = K_{24}^m / (G_3)$;

K – коэффициент теплопередачи; K^m – коэффициент массопередачи; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя; одинарный индекс показывает номер теплоносителя, двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует

номерам теплоносителей, между которыми происходит теплообмен; третье слагаемое в правой части первого уравнения отражает изменение температуры воды, обусловленное испарением влаги с ее поверхности (помимо испарения, возможен также капельный унос жидкости в атмосферу [3, 5, 13, 14], однако в рамках рассматриваемой модели капельный унос не учитывается).

Результаты решения системы (1) подробно представлены в [14] в виде зависимости искомых параметров от произведения определяющей координаты процесса F и коэффициента теплопередачи k . Данное произведение (Fk) соответствует числу единиц переноса [3], часто применяемому при моделировании процессов теплообмена. Для оценки достоверности модели были проведены специальные расчетные исследования, результаты которых показали адекватное описание моделью экспериментальных данных [14].

Разработанный подход к моделированию башенных градирен позволяет формулировать и решать обратные задачи по диагностике и эффективной организации процессов тепломассообмена в башенных градирнях различного назначения.

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность функционирования башенных градирен, является характер распределения воды и воздуха по поперечному сечению градирен. Идеальной ситуацией считается равномерное распределение теплоносителей по сечению. Однако в реальных условиях эксплуатации под действием конструктивных особенностей, неравномерного подвода теплоносителей, ветровых нагрузок и иных факторов часто потоки теплоносителей распределяются по сечению неравномерно. Такая неравномерность приводит к снижению общего теплового потока между теплоносителями. Анализ влияния неравномерного распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлажденной воды проведен на базе разработанной математической модели (1). Такой подход позволяет проследить изменения температуры охлажденной воды в зависимости от отклонения распределения теплоносителей от равномерного и установить взаимосвязь между распределением потоков и энергетической эффективностью всей системы охлаждения.

В рамках исследования поперечное сечение башенной градирни было условно разделено на четыре равных по площади сектора, в каждый из которых осуществлялась независимая подача воздуха и воды. Такой подход позволяет учитывать возможные отклонения от равномерного распределения потоков, возникающие в реальных условиях эксплуатации. Результаты расчета температуры охлажденной воды при различном распределении потоков воздуха и воды в поперечном сечении градирни представлены на рис. 3.

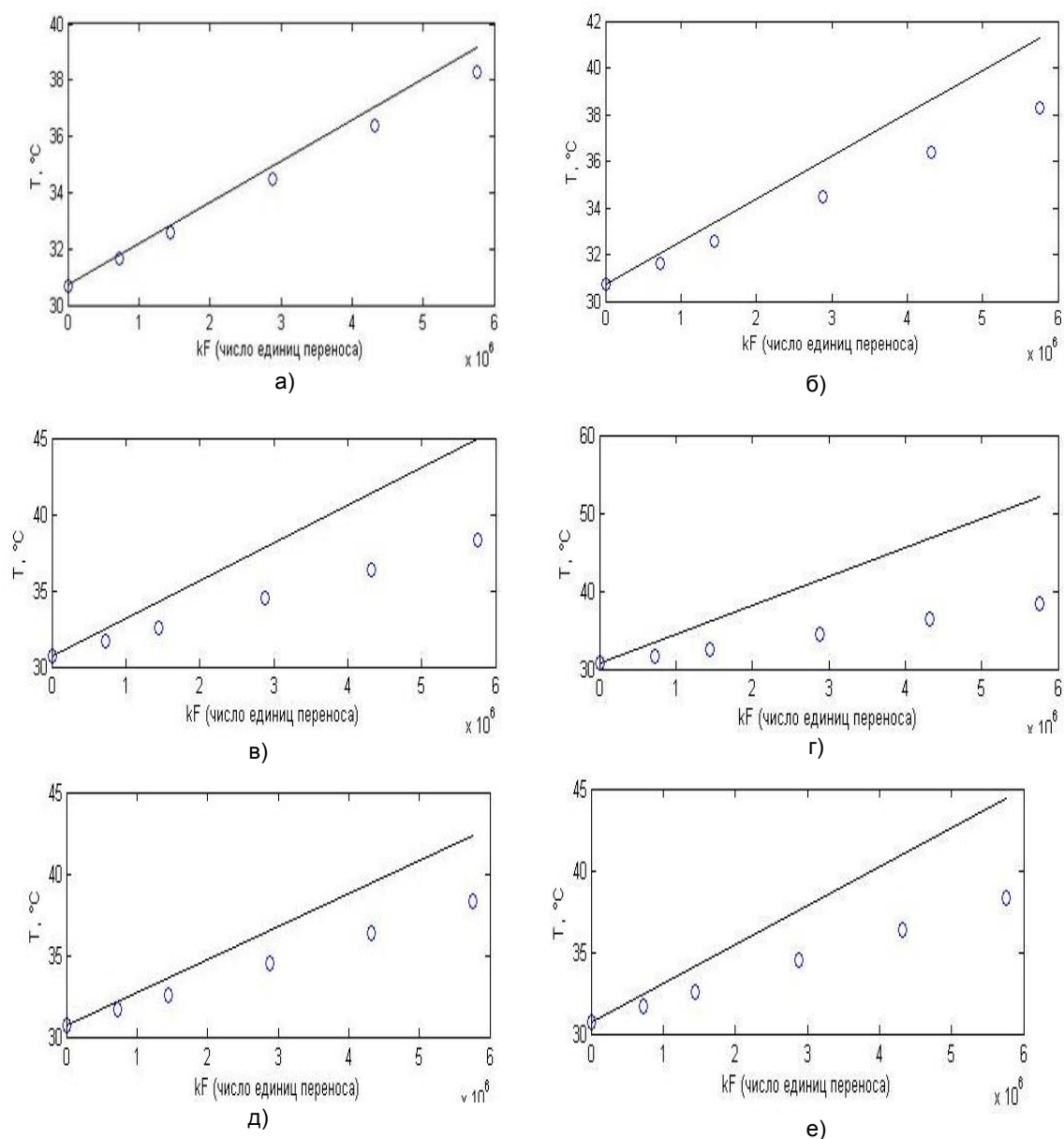


Рис. 3. Результаты расчета температуры воды при различном распределении расхода воздуха по выделенным частям сечения градирни: а – [2000 2000 2000 2000]; б – [4000 2000 1500 500]; в – [1000 1000 1000 5000]; г – [500 6500 500 500], кг/с. Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерном распределении воды по выделенным частям сечения градирни: д – [466 1100 1000 1000]; е – [1100 1100 366 1100], кг/с

В качестве тестового объекта анализа выбрана башенная градирня типа БГ-1600. Общий расход подаваемого воздуха составляет 8000 кг/с, расход воды – 3466 кг/с. Эти значения соответствуют номинальным параметрам работы оборудования при нормальных эксплуатационных условиях. Для верификации расчетных данных использовались номограммы, разработанные специалистами АО «Фирма ОРГЭЭС»¹, основанные на результатах балансовых испытаний башенных градирен. Данные балансовых испытаний при равномерном распределении потоков теплоносителей представлены на рис. 3 точками. Результаты численного расчета

согласно модели (1), иллюстрирующие изменение температуры охлажденной воды при различном распределении потоков воздуха по поперечному сечению градирни, представлены на рис. 3, а–г. Анализ представленных результатов показывает, что неравномерное распределение воздуха в поперечном сечении может приводить к снижению эффективности охлаждения циркуляционной воды до 10 С. Результаты влияния неравномерной подачи по сечению циркуляционной воды при равномерном распределении по сечению потоков воздуха приведены на рис. 3, д–е. Анализ результатов показывает, что неравномерное распределение воды в поперечном сечении

¹ РД 153-34.1-09.312-99. Положение о согласовании и утверждении ограничений установленной электрической мощности тепловых электростанций. – Утв. Российским акционерным обществом энергетики и электрификации «ЕЭС России» 13.05.1999. – Введ. в действие с 02.08.1999.

может также существенно снижать эффективность охлаждения циркуляционной воды до 8 С.

Результаты проведенных расчетов показали, что неравномерное распределение воздуха и воды по поперечному сечению башенной градирни приводит к снижению эффективности ее охлаждающей способности до 8–10 С, что обуславливает повышение давления в конденсаторе турбин [15, 16, 18–19].

Представленные данные, полученные при решении прямой задачи, позволяют предложить алгоритм диагностики, основанный на сравнении рассчитанной температуры охлажденной воды с измеренной. Если результаты совпадают в пределах допустимой погрешности, можно сделать вывод о том, что существующее распределение воздуха по сечению градирни является удовлетворительным. В случае же существенного расхождения между расчетной и измеренной температурами система диагностики указывает на отклонение от нормального режима и диагностирует возможные нарушения в работе самой градирни или в сопряженных элементах системы охлаждения. Предлагаемый порядок проведения диагностики представлен на рис. 4 в виде решения обратной задачи диагностики на примере тестового сценария определения состояния распределения воздушных потоков внутри градирни, полученного в рамках исследования [13]².

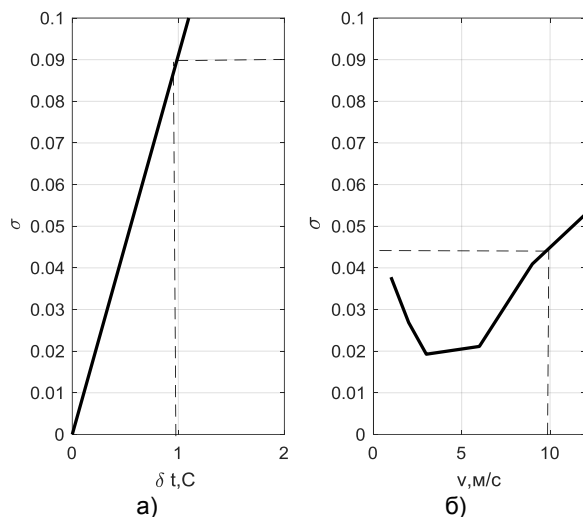


Рис. 4. Порядок численного решения обратной задачи диагностики распределения воздуха в поперечном сечении градирни: а – зависимость среднего квадратичного отклонения от недоохлаждения циркуляционной воды; б – расчетная зависимость среднего квадратичного отклонения от скорости ветра

График на рис. 4,а демонстрирует зависимость среднего квадратичного отклонения распределения воздуха от недоохлаждения циркуляционной воды при анализируемых внешних условиях, а график рис. 4,б показывает зависимость

среднего квадратичного отклонения распределения воздуха от скорости ветра. Совпадение значений среднего квадратичного отклонения на обоих графиках свидетельствует о корректной и стабильной работе оборудования, подтверждая, что распределение воздушного потока находится в пределах допустимой нормы.

В случае существенного расхождения среднего квадратичного отклонения (рис. 4,а и рис. 4,б, штриховые линии) диагностируется превышение нормативной неравномерности расхода воздуха по секторам. Такое отклонение является признаком нарушения режима работы градирни и требует принятия корректирующих мер, направленных на устранение выявленного дисбаланса в распределении воздушного потока. Это отклонение может включать изменение положения регулирующих элементов (открытие/закрытие фрамуг) или настройку режимов системы подачи воздуха.

Задача 2. Разработка модели и метода решения обратных задач диагностики теплообменных процессов в конденсаторе турбины. В качестве второй подсистемы СОО рассматривается конденсатор турбины. Эффективность теплообменных процессов в конденсаторе турбины во многом определяет эффективность генерации энергии на станции. С конденсаторами турбоустановок связаны существенные резервы повышения эффективности работы оборудования, так как с охлаждающей водой может отводиться в окружающую среду более 50 % энергии топлива. Диагностика состояния и совершенствование режимов работы конденсатора турбоустановки является актуальной научной и практической задачей.

В рамках методологии матричной формализации [4, 16] разработан подход к решению обратных задач диагностики с учетом фазового перехода в теплоносителях, получены и проанализированы решения обратной задачи диагностики состояния теплообменного оборудования на примере конденсатора турбоустановки.

Объектом исследования в данном случае является конденсационная установка турбины. В качестве предмета исследования рассматриваются постановка и решение обратной задачи теплопередачи в конденсационной установке с учетом фазового перехода.

Решение обратной задачи диагностики состояния поверхности нагрева рассматривается при фазовом переходе только в горячем теплоносителе. В представленном примере анализируются два потока охлаждающей воды, что на практике реализуется при наличии встроенного пучка сетевой воды в конденсаторе. Если второй теплоноситель в установку не подается, то его расход задается равным нулю, а представленный подход и модель применим и к конденсатору конденсационных турбин и турбин атомных

² FLUENT Incorporated, FLUENT Users Guide Release 12. – Lebanon, New Hampshire, USA, 2009.

электростанций. На основе баланса теплоты, составленного для пара двух выделенных потоков воды, получена система дифференциальных уравнений, описывающая изменение степени сухости горячего пара (x_1), температуры первого (t_2) и второго (t_3) потоков охлаждающей воды вдоль определяющей координаты процесса:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = -a_1(t_n - t_2) - a_4(t_n - t_3), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2(t_n - t_2), \\ \frac{dt_3}{dF} = a_3(t_n - t_3), \end{cases} \quad (2)$$

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 – первый поток охлаждающей воды; 3 – второй поток охлаждающей воды; двойной индекс у коэффициента теплопередачи определяет 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 (2), подробно описанное в [16], записывается в матричном виде:

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

где

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} x_{10} \\ x_1 \\ t_{n1} \\ t_{20} \\ t_2 \\ t_{30} \\ t_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_0 = \begin{pmatrix} x_{10}^* \\ x_1^* \\ t_{n1}^* \\ t_{20}^* \\ t_2^* \\ t_{30}^* \\ t_3^* \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Структура разреженной матрицы $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}$, представленная в [16], подробно не комментируется. Матрица $\mathbf{T}$ составляется из неизвестных параметров системы, 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 зануляется.

Система (3) 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 [17], т. е. $C_7^4 = 7!/(4! \cdot 3!) = 35$. 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 $C_6^3 = 6!/(3! \cdot 3!) = 20$ вариантов. Приведенная выше модель (3) и выражения для ее коэффициентов представлены для случая задания следующего варианта набора известных параметров: x_{10} , x_1 , t_{20} , t_{30} .

Решение системы линейных уравнений (3) находится методом обращения матриц [4] согласно выражению

$$\mathbf{T} = \mathbf{B}^{-1} \times \mathbf{T}_0, \quad (5)$$

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: $t_{20} = 25$ °C; $t_{30} = 40$ °C; $c = 4,187$ кДж/(кг·K); $r = 2256$ 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 выбирается температура насыщенного пара в конденсаторе, однозначно определяющая вакуум в установке, температуры циркуляционной и сетевой воды на выходе из установки. Анализ полученных зависимостей и сравнение полученных данных с нормативными показали адекватное описание моделью нормативных данных [4, 16].

Представленная модель после проверки ее адекватности используется для решения обратной задачи диагностики состояния поверхностей нагрева труб конденсатора. Считается, что состояние поверхности нагрева характеризуется коэффициентом теплопередачи. Обратная задача в данном случае формулируется в виде оптимизационной задачи, в которой в качестве целевой функции выбрано рассогласование замеренных и рассчитанных значений температур насыщенного пара в конденсаторе:

$$F_c = \sum_i (T_i^a - T_i^p)^2 = \min, \quad (6)$$

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

В качестве параметров оптимизации выбирается коэффициент теплопередачи для трубок конденсатора. Для решения сформулированной задачи используется метод перебора [4, 18–19], а результаты ее решения представлены на рис. 5.

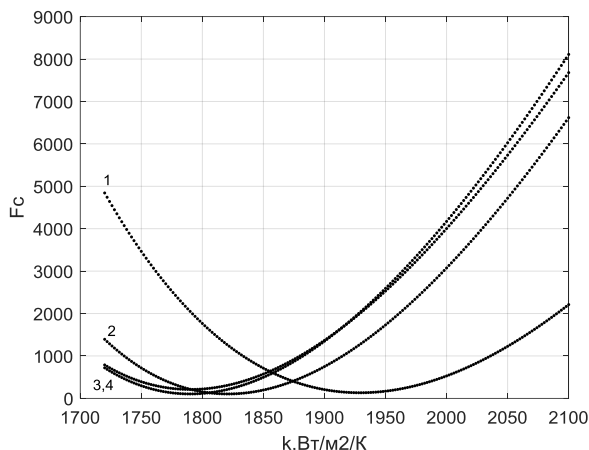


Рис. 5. Порядок численного решения обратной задачи диагностики загрязнения конденсатора путем определения минимального значения целевой функции (6) и коэффициента теплопередачи, характеризующего степень загрязнения трубок конденсатора: 1 – первая; 2 – вторая; 3 – третья; 4 – четвертая неделя эксплуатации конденсатора

Минимальное значение целевой функции соответствует значениям коэффициентов теплопередачи для основного пучка, которые представлены для первой, второй, третьей и четвертой недели мониторинга СОО соответственно: $k_{12} = [1930 \ 1820 \ 1790 \ 1790]$ Вт/(К·м²). Анализ приведенных данных показывает существенное загрязнение поверхности нагрева за первую неделю при менее значительном загрязнении за вторую, третью и четвертые недели эксплуатации конденсатора. Таким образом, в ходе решения обратной задачи удалось диагностировать загрязнение поверхности основного пучка конденсатора.

Выполненный расчетный анализ показал, что предложенная постановка и решение обратной задачи позволяют при заданном объеме используемых экспериментальных данных в режиме реального времени диагностировать состояние 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 детальной декомпозиции пакетов конденсатора.

Задача 3. Разработка гидродинамической модели СОО и определение расходов воды через элементы системы. Для получения замкнутого описания и возможности более детальной диагностики СОО разработана модель для определения расхода циркуляционной воды в элементах системы. Тракт циркуляционной воды станции представляет собой сложную

гидравлическую систему и включает в себя разнородное оборудование: водозаборные устройства; циркуляционные насосы; напорные и сливные водоводы; конденсаторы турбин; сбросные устройства охлаждающей воды в источник водоснабжения (при прямоточном водоснабжении) или в водохранилища-охладители (при оборотном водоснабжении); напорные водоводы градирен, градирни и сливные водоводы или открытые каналы, отводящие охлажденную воду в приемную камеру циркуляционных насосов (при оборотном водоснабжении с градирнями).

Для расчета расходов воды через отдельные элементы СОО разработана математическая модель, позволяющая для произвольного варианта подключения насосов и конденсаторов определять требуемые расходы.

Характеристика циркуляционного тракта системы водоснабжения с магистральными водоводами не может быть представлена однозначно в виде одной кривой вследствие большого многообразия вариантов состава работающего оборудования, а именно: различного количества параллельно работающих насосов, конденсаторов, включенных на данный магистральный водовод; количества градирен, находящихся в работе.

В ходе моделирования решаются следующие задачи: построение гидравлической модели циркуляционного тракта; построение энергетической характеристики группы циркуляционных насосов и определение расходов через каждую ветвь.

Задача 4. Разработка информационной системы диагностики неисправностей оборудования СОО и рекомендаций по их локализации и исправлению. Архитектура информационной системы мониторинга состояния оборудования СОО и его диагностики представлена на рис. 6 и построена на следующих принципах взаимодействия:

- каждый микросервис обрабатывает только те данные, которые касаются соответствующего оборудования, что делает систему слабо связанным набором компонентов, где сбой одного сервиса не влияет на остальные;
- данные по каждому объекту оборудования хранятся независимо, что позволяет гибко управлять хранением и масштабировать сервисы по нагрузке;
- frontend динамически получает список доступных модулей из конфигурации или API и строит интерфейс в зависимости от активных компонентов;
- добавление нового оборудования сводится к созданию нового микросервиса, определению его API и подключению в интерфейс (поддержка расширяемости).

Внешний вид экранных форм программного пакета и их функциональное назначение представлены на рис. 7.

Система включает в себя модульную архитектуру, ориентированную на удобство навигации и прозрачную визуализацию состояния оборудования. Интерфейс реализован на базе фреймворка React, обеспечивая отзывчивость,

масштабируемость и гибкость в развитии. Каждый модуль представляет собой функционально законченный блок с собственными разделами: схема, тренды, диагностика.

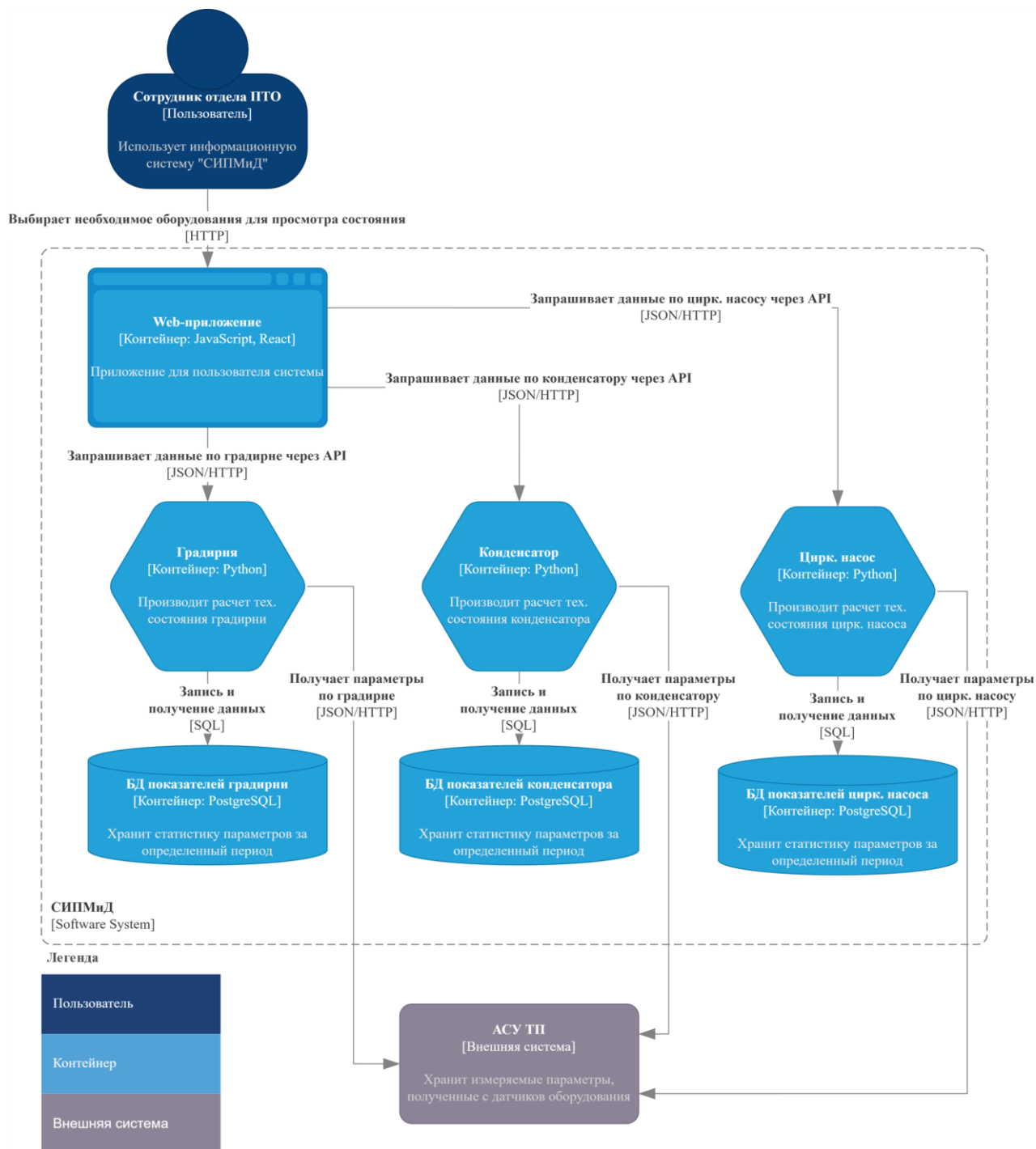


Рис. 6. Архитектура информационной системы мониторинга состояния оборудования СОО



Рис. 7. Экранная форма системы диагностики СОО. Диагностика состояния функционирования градирни

Структура интерфейса представлена тремя панелями.

1. Боковая панель навигации (Sidebar).

Позволяет пользователю выбрать нужный модуль оборудования (градирня, конденсатор, насос) и перейти к его подразделам. Поддерживает вложенность, отображает активный пункт, неактивные модули подписаны как «в разработке» и неактивны для выбора (с тултипом при наведении).

2. Основная рабочая область. Отображает текущий выбранный подраздел: визуальную схему, графики трендов или диагностическую информацию.

3. Модули оборудования:

3.1. *Модуль «Градирня».* Интерактивная схема градирни с визуализацией состояния ключевых компонентов: воздухозаборных окон, оросительной системы, водосборного бассейна и вентиляторов.

3.2. *Модуль «Конденсатор»* (в разработке). Структура будет аналогична модулю градирни с акцентом на параметры пара.

3.3. *Модуль «Циркуляционный насос»* (в разработке). Будет включать отображение давления и расхода воды в элементах СОО, а также диагностику неисправностей.

Выводы. Разработанная математическая модель башенной градирни, анализ влияния неравномерности распределения воды и воздуха в поперечном сечении градирни на охлаждение воды, решение обратной задачи диагностики распределения воздуха в поперечном сечении градирни позволили наметить пути и разработать рекомендации по уменьшению неравномерности воздушных потоков в поперечном сечении за счет управления степенью открытия фрамуг.

Разработанная модель и метод решения обратных задач диагностики теплообмена в конденсаторе турбины, а также выполненный расчетный анализ показали, что предложенная постановка и решение обратной задачи позволяют при заданном объеме используемых данных в режиме реального времени диагностировать состояние поверхностей нагрева конденсатора.

Разработанная гидродинамическая модель СОО позволяет определить расходы циркуляционной воды через выделенные элементы системы.

Разработанную информационную систему диагностики неисправностей оборудования СОО и рекомендации по их локализации и исправлению планируется использовать при планировании вывода оборудования в ремонт.

Более сложные постановки обратной задачи, включающие одновременную диагностику нескольких факторов, таких как неравномерность потоков не только воздуха, но и циркуляционной воды по сечению, а также возможное засорение трубок конденсатора, планируются в ходе предполагаемых исследований.

Список литературы

1. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
2. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
3. **Справочник** по теплообменникам: в 2 т. Т. 1: пер. с англ. / под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
4. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
5. **Калатузов В.А.** Повышение располагаемой мощности тепловых электростанций с градирнями: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2003. – 113 с.

6. Горшков А.С. Техничко-экономические показатели тепловых электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
7. Калатузов В.А., Павлов В.А. Расчет ограничений электрической мощности ТЭЦ, связанных с работой систем циркуляционного водоснабжения // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 18–22.
8. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2009. – 480 с.
9. Абрамов Н.Н. Водоснабжение: учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1982. – 440 с.
10. Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С. Аэродинамический расчет башенных градирен при реконструкции // Электрические станции. – 2000. – № 9. – С. 14–20.
11. Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П. Тепловые электрические станции / под ред. В.М. Лавыгина, А.С. Седлова, С.В. Цанева. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 466 с.
12. Ведьгаева И.А. Математическое моделирование, исследование и повышение эффективности работы промышленных градирен с сетчатой насадкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2003.
13. Комбинированная модель тепломассообмена в башенных градирях / В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 90–96.
14. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, В.Н. Виноградов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 3. – С. 57–63.
15. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.
16. 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.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 2006. – 575 с.
18. Фомичев М.Д., Жуков В.П. Расчетный анализ влияния неравномерности распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлажденной воды // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2023. – С. 392–395.
19. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Энергетические характеристики оборудования ТЭС. – Иваново, 2014. – 232 с.

References

1. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.
2. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat exchange during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.
3. Martynenko, O.G. (ed.) *Spravochnik po teploobmen-nikam. V 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers. In 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.
4. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
5. Kalatuzov, V.A. *Povyshenie raspolagaemoy moshchnosti teplovykh elektrostantsiy s gradirnyami*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the available capacity of thermal power plants with cooling towers. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2003. 113 p.

6. Gorshkov, A.S. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovykh elektrostantsiy* [Technical and economic indicators of thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 240 p.
7. Kalatuzov, V.A., Pavlov, V.A. *Raschet ograni-cheniy elektricheskoy moshchnosti TETS, svyazannykh s rabotoy sistem tsirkulyatsionnogo vodosnabzheniya* [Calculation of the limitations of the electric power of the CHP plant associated with the operation of circulating water supply systems]. *Elektricheskie stantsii*, 1987, no. 4, pp.18–22.
8. Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. *Chislennyye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow: Izdatel'stvo LKI, 2009. 480 p.
9. Abramov, N.N. *Vodosnabzhenie* [Water supply]. Moscow: Stroyizdat, 1982. 440 p.
10. Arefev, Yu.I., Ponomarenko, B.C. *Aerodinamicheskii raschet bashennykh gradiren pri rekonstruktsii* [Aerodynamic calculation of cooling towers during reconstruction]. *Elektricheskie stantsii*, 2000, no. 9, pp. 14–20.
11. Burov, V.D., Dorokhov, E.V., Elizarov, D.P. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. 466 p.
12. Ved'gaeva, I.A. *Matematicheskoe modelirovanie, issledovanie i povyshenie effektivnosti raboty promyshlennykh gradiren s setchatoy nasadkoy*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Mathematical modeling, research and improvement of the efficiency of industrial cooling towers with mesh packing. Cand. tech. sci. diss.]. Kazan', 2003.
13. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Barochkin, E.V., Shuina, E.A., Shuvalov, S.I. *Kombinirovannaya model' teplo-massobmena v bashennykh gradirnyakh* [Combined model of heat and mass exchange in cooling towers]. *Vestnik ISEU*, 2023, issue 5, pp. 90–96.
14. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. *Modelirovanie i raschet protsessa teplomassobmena v bashennykh gradirnyakh sistem oborotnogo okhlazhdeniya TES i AES* [Modeling and calculation of the heat and mass transfer process in tower-type cooling towers of CWS for thermal and nuclear power plants]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 3, pp. 57–63.
15. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Raschet i normirovanie pokazateley teplovy ekonomichnosti oborudovaniya TES* [Calculation and normalization of indicators of thermal efficiency of the TPP equipment]. Ivanovo, 2015. 468 p.
16. Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V., Fomichev, M.D., Belyakov, A.N., Kuznetsov, M.A. *Reshenie obratnoy zadachi teploperedachi v kondensatore turboustanki so vstroennym teplofikatsionnym puchkom* [Solution of the inverse problem of heat transfer in the condenser of a turbo plant with a built-in heat extraction bundle]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 1, pp. 85–91.
17. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 575 p.
18. Fomichev, M.D., Zhukov, V.P. *Raschetnyy analiz vliyaniya neravnomernosti raspredeleniya teplonositeley po secheniyu gradirni na temperaturu okhlazhdennoy vody* [Calculation analysis of the influence of uneven distribution of coolants over the cross-section of a cooling tower on the temperature of chilled water]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XXII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of international scientific and technical conference "Current state and trends of the development of electrotechnics" (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 392–395.
19. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Energeticheskie kharakteristiki oborudovaniya TES* [Energy characteristics of thermal power plant equipment]. Ivanovo, 2014. 232 p.