

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.311.22

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

Владимир Павлович Жуков

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: zhukov-home@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

Валерий Федорович Очков

Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Москва, телефон (495) 3627171, e-mail: ochkovvf@mpei.ru

Евгений Витальевич Барочкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Учет влияния направления и скорости ветра при решении прямых и обратных задач тепломассообмена в башенных градирнях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Известны постановка и решение прямой задачи тепломассообмена в башенной градирне с учетом неравномерного распределения по поперечному сечению градирни охлаждаемой воды и охлаждающего воздуха, проанализировано влияние указанной неравномерности на эффективность охлаждения циркуляционной воды. При этом не рассмотрены возможные причины неравномерного распределения воздуха в поперечном сечении градирни. Одной из главных причин неравномерного распределения воздуха по сечению градирни являются скорость и направление ветра. Актуальным и логичным развитием исследований тепломассообмена в башенной градирне является учет и моделирование влияния направления и скорости ветра при постановке прямых и обратных задач тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭЦ и АЭС.

Материалы и методы. Исследование влияния скорости и направления ветра на распределение потоков воздуха в поперечном сечении башенной градирни выполнено с использованием пакета ANSYS Fluent. Тепломассообмен в градирне описывается на основе тепловых и материальных балансов, представленных в виде матричных уравнений. Апробация результатов работы выполнена с использованием эксплуатационных данных по башенной градирне площадью орошения 4000 м².

Результаты. Получено решение прямой задачи влияния скорости и направления ветра на неравномерность распределения потоков воздуха в поперечном сечении градирни. Показаны причины снижения эффективности охлаждения циркуляционной воды за счет указанной неравномерности. Представлены пути снижения рассматриваемой неравномерности за счет избирательного управления степенью закрытия воздушных окон (фрамуг). Сформулирована обратная задача диагностики состояния градирен.

Выводы. Предложенная методика расчета градирни, включающая оценку неравномерности подачи воздуха и оценку снижения эффективности охлаждения циркуляционной воды за счет указанной неравномерности, позволяет перейти к постановке и решению обратной задачи диагностики технического состояния системы оборотного охлаждения, включающей градирню в качестве основного элемента.

Ключевые слова: системы оборотного охлаждения воды, башенная градирня, прямая задача тепломассообмена, обратная задача диагностики, многопоточный теплообмен

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

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

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

Valeriy Fedorovich Ochkov

National Research University «MPEI», Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Moscow, telephone (495) 3627171, e-mail: ochkovvf@mpei.ru

Evgeniy Vitalyevich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Considering the influence of wind direction and speed when solving direct and inverse problems of heat and mass transfer in cooling towers

Abstract

Background. The formulation and solution of the direct problem of heat and mass transfer in a chimney cooling tower are known, considering the uneven distribution of cooled water and cooling air over the cross-section of the cooling tower. The influence of the above-noted unevenness on the efficiency of cooling the circulating water has been analyzed. At the same time, possible causes of uneven air distribution in the cross-section are not considered. One of the main causes of uneven air distribution over the cross-section is the wind speed and direction. The relevant and logical development of studies of heat and mass transfer in a chimney cooling tower is consideration and modeling the influence of wind direction and speed when formulating direct and inverse problems of heat and mass transfer in cooling towers of thermal power plants and nuclear power plants.

Materials and methods. The study of the influence of wind speed and direction on the distribution of air flow in the cross-section of a cooling tower has been carried out using the ANSYS Fluent package. Heat and mass transfer in the cooling tower is described based on heat and material balances presented in the form of matrix equations. The results of the study have been tested using operational data for a cooling tower with an irrigation area of 4000 m².

Results. The authors have obtained a solution of the direct problem of the influence of wind speed and direction on the uneven distribution of air flows in the cross section of a cooling tower. The reasons of the decline of the efficiency of cooling circulating water due to above-noted this unevenness are shown. The methods to reduce the above-noted unevenness by means of selective control of the degree of closing of air windows (transoms) are presented. An inverse problem of diagnosing the condition of cooling towers is formulated.

Conclusions. The proposed calculation method for a cooling tower, which includes an assessment of the unevenness of air supply and an assessment of the reduction of the efficiency of cooling the circulating water due to the above-noted unevenness, allows us to move on to the inverse problem of diagnosing the technical condition of the circulating cooling system, which includes a cooling tower as its main element.

Key words: water cooling systems, cooling tower, direct heat and mass transfer problem, inverse diagnostic problem, multi-flow heat exchange

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.080-085

Введение. Башенные градирни представляют собой ключевые элементы систем оборотного охлаждения (СОО), функционирование которых существенно влияет на общую эффективность выработки электроэнергии на ТЭС и АЭС [1–5]. Современные градирни работают в сложных погодных условиях, кото-

рые характеризуются температурой и влажностью наружного воздуха, а также скоростью ветра. Перечисленные факторы часто приводят к неравномерному распределению воздушных потоков в поперечном сечении градирни, что негативно сказывается на эффективности охлаждения циркуляционной воды [6–7]. Понима-

ние и моделирование указанных неравномерностей являются важным этапом в диагностике состояния градирен, корректировке их режима для повышения эффективности функционирования СОО. Известны постановка и решение прямой задачи тепломассообмена в башенной градирне с учетом неравномерного распределения по поперечному сечению градирни охлаждаемой воды и охлаждающего воздуха [6–7], в рамках которой исследовано влияние указанной неравномерности на эффективность охлаждения циркуляционной воды [7]. При этом остаются нерассмотренными возможные причины неравномерного распределения потоков воздуха в поперечном сечении. Одной из главных причин неравномерного распределения воздуха по сечению градирни является скорость и направление ветра. Актуальным и логичным направлением развития исследований тепломассообмена в башенной градирне является учет влияния направления и скорости ветра при моделировании тепломассообмена и диагностике технического состояния градирен и систем оборотного охлаждения ТЭЦ и АЭС.

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 [8]. 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. Обратные задачи часто являются некорректными в классическом смысле задачами [8]. В нашем конкретном случае под прямыми задачами расчета градирен понимается определение температуры охлажденной циркуляционной воды по заданным исходным режимным параметрам теплоносителей, а под обратными задачами – диагностика возможных режимных нарушений работы при заданных параметрах теплоносителей на входе и выходе.

Методы исследования. Прямая задача влияния скорости и направления ветра на распределение воздуха в поперечном сечении башенной градирни решается с использованием пакета ANSYS Fluent¹. Для решения задачи тепломассообмена в градирне используется матричная формализация представления тепловых и материальных балансов [9].

Результаты исследования. В качестве объекта моделирования выбрана башенная градирня площадью орошения 4000 м², схематично представленная на рис. 1.

Воздух поступает в градирню через нижние окна, поднимается вверх за счет

естественной тяги, обусловленной разностью плотностей холодного и нагретого воздуха. Охлаждаемая вода, двигаясь в противоположном направлении, передает тепловую энергию воздуху за счет разности температур теплоносителей и испарения части воды. Охлажденная вода собирается в приемном бассейне, откуда циркуляционными насосами подается в конденсатор турбины.

Решение прямой задачи влияния направления и скорости ветра и температуры наружного воздуха на распределение потоков теплоносителей внутри градирни выполняется в два этапа. На первом этапе моделируется поле скоростей воздуха во внешней расчетной области снаружи градирни. Результаты моделирования на первом этапе используются для формирования граничных условий при моделировании движения воздуха внутри градирни на втором этапе решения прямой задачи. Окна градирни моделируются как внутренние интерфейсы (interior)². На внешних границах наружной области определяется условие outlet (PressureOutlet), позволяющее воздуху покидать расчетную область.

После достижения устойчивого состояния производится экспорт полей скоростей и полного давления на поверхностях окон градирни для формирования граничных условий для второго этапа. Результаты первого этапа моделирования расчетной области представлены на рис. 1 в виде линий тока воздуха снаружи градирни.

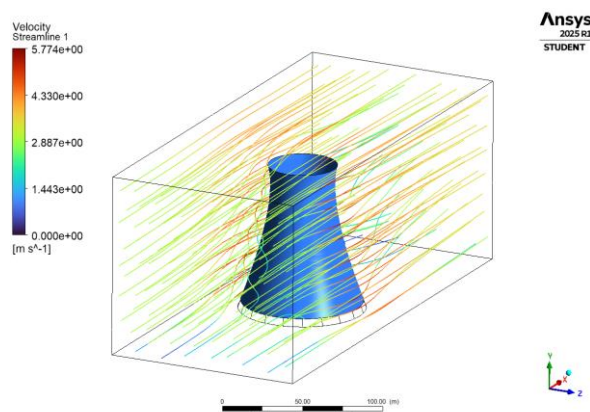


Рис. 1. Внешний вид башенной градирни и результаты первого этапа моделирования внешней расчетной области градирни в виде линий тока воздуха снаружи градирни

Моделирование внутренней области градирни производится на втором этапе для анализа неравномерности распределения воздушных потоков внутри установки. Поле давлений и скорости воздуха в окнах градирни, найденных на первом этапе, используется для задания граничных условий во внутренней модели градирни.

На втором этапе решения прямой задачи определяется распределение потоков внутри

¹ ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg. Kloppers.

² Там же.

градирни, оценка массовых расходов через выбранные области и выявляются застойные зоны. Расчетный анализ производился для скоростей ветра 1, 2, 3, 6, 9, 12 м/с. Характерные поля скоростей воздуха во внутренней области градирни представлены на рис. 2 для трех скоростей ветра: 1 м/с (рис. 2,а), 3 м/с (рис. 2,в), 12 м/с (рис. 2,д). Здесь же приведены распределения расходов

воздуха по секторам поперечного сечения для тех же скоростей ветра соответственно: (рис. 2,б), (рис. 2,г), (рис. 2,е).

Для всех рассмотренных скоростей ветра результаты решения второго этапа прямой задачи в виде распределения расходов воздуха по сечению градирни представлены в таблице.

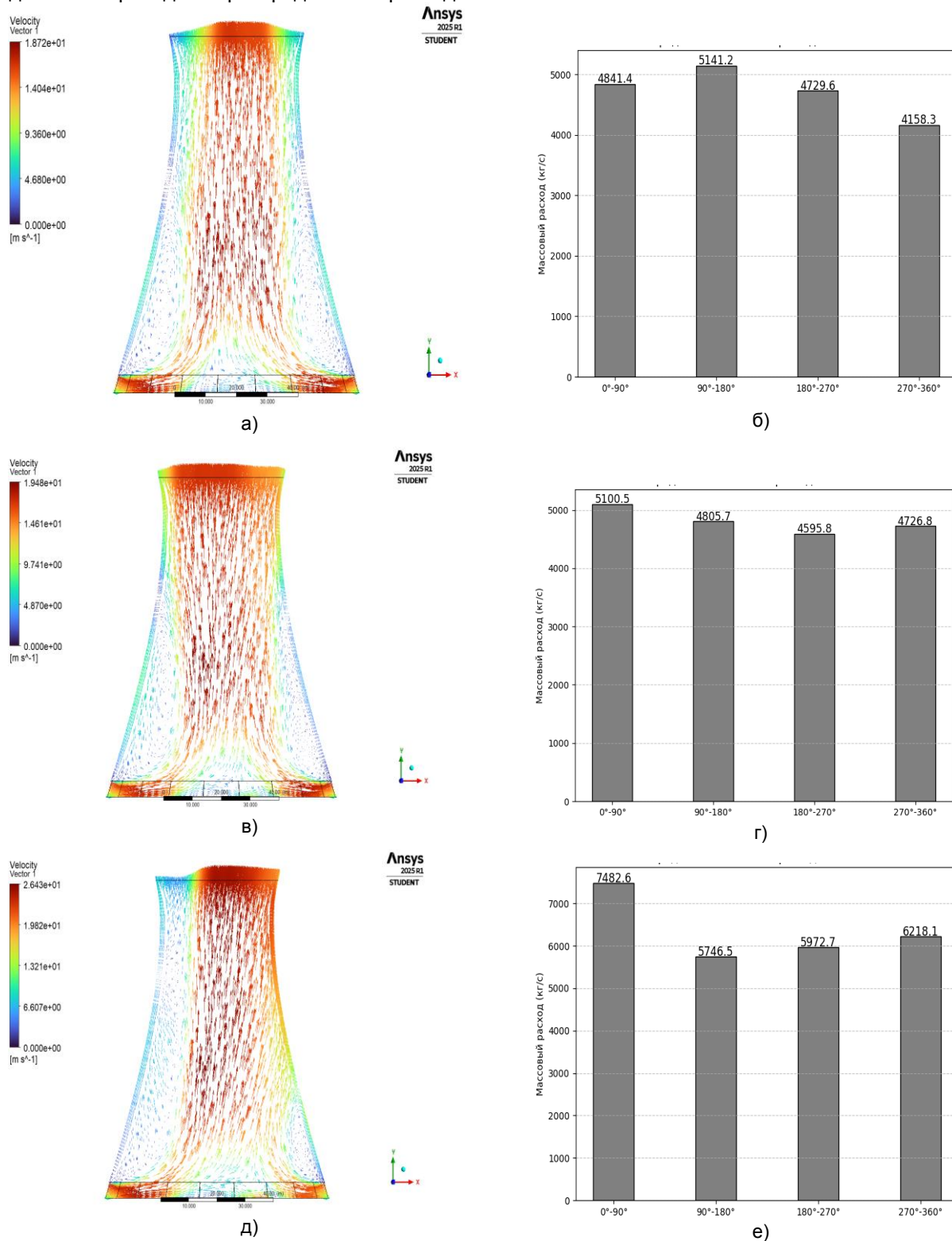


Рис. 2. Результаты решения второго этапа прямой задачи в виде полей скоростей воздуха внутри градирни (а, в, д) и распределения расходов воздуха по секторам в поперечном сечении (б, г, е) градирни при разных скоростях ветра: а, б – 1; в, г – 3; д, е – 12 м/с

Результаты решения второго этапа прямой задачи в виде распределения расходов воздуха по секторам в поперечном сечении градирни при различных скоростях ветра

Скорость ветра, м/с	Массовый расход, кг/с				Суммарный расход, кг/с
	сектор 1	сектор 2	сектор 3	сектор 4	
1	4841,3551	5141,2289	4729,5524	4158,281	18870,4
2	5035,7469	4372,4252	4919,471	4663,4834	18991,1
3	5100,5319	4805,7128	4595,7931	4726,7836	19228,8
6	5171,8503	5309,139	4888,6725	5492,8107	20862,5
9	6308,5102	5003,4566	5825,6847	5854,555	22992,2
12	7482,5753	5746,5153	5972,6528	6218,093	25419,8

Для количественной оценки неравномерности распределения потоков воздуха по сечению градирни рассчитываются дисперсия и среднее квадратичное отклонение найденного распределения [10, 11]. Зависимость среднего квадратичного отклонения от скорости ветра в виде столбчатой диаграммы представлена на рис. 3. Анализ результатов расчета показывает, что наиболее равномерное распределение, которому соответствует минимальное значение среднего квадратичного отклонения, достигается в диапазоне скоростей ветра 3–6 м/с.

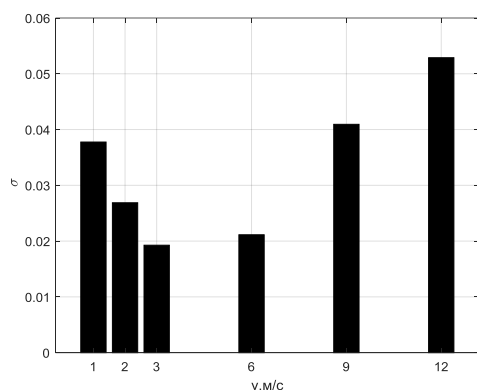


Рис. 3. Зависимость среднего квадратичного отклонения распределения расходов воздуха по поперечному сечению градирни от скорости ветра

Найденное на втором этапе решения задачи распределение воздуха по выделенным секторам поперечного сечения позволяет в рамках матричной формализации решения задачи теплообмена для градирни [7, 9] определить температуру охлажденной воды после градирни.

Полученное таким образом решение прямой задачи тепломассообмена в башенной градирне позволяет перейти к постановке и решению обратной задачи диагностики состояния системы оборотного охлаждения и башенной градирни. В общем случае системы оборотного охлаждения воды на ТЭС и АЭС включают три наиболее важные подсистемы: башенная градирня, конденсатор турбины и циркуляционный насос. При отклонении температуры циркуляционной воды от регламентируемого допустимого значения диагностировать состояние и возможные нарушения в работе необходимо для всех трех перечисленных подсистем. Указанную диагностику можно реализовать в рамках решения обратной задачи сразу для трех подсистем

или выполнять последовательно, отдельно для каждой подсистемы. Нам представляется, что поочередная диагностика трех подсистем более перспективна в силу своей простоты, однозначности и ожидаемой точности решения.

В рамках рассмотренного подхода формулируется обратная задача применительно к диагностике состояния градирни. Для демонстрации возможности постановки обратной задачи ограничимся случаем диагностики допустимой неравномерности распределения воздуха в поперечном сечении градирни. Сформулируем обратную задачу при этом следующим образом: по заданной температуре охлажденной воды, известной скорости ветра и температуре наружного воздуха диагностировать неравномерность распределения потоков воздуха по сечению градирни. Проведенные при решении прямой задачи расчеты позволяют предложить для решения обратной задачи следующий алгоритм, представленный на рис. 4.

Результаты решения прямой задачи позволяют определить температуру охлажденной воды за градирней. Ее совпадение с замеренной температурой позволяет диагностировать удовлетворительное состояние неравномерности распределения потоков воздуха по сечению градирни. При несовпадении указанных значений система диагностики сигнализирует о нарушении нормального режима работы и необходимости поиска дефектов или причин таких отклонений.

На рис. 4 представлен вариант решения обратной задачи диагностики для тестового примера определения состояния распределения потоков воздуха на основании известной скорости ветра (рис. 4,а) и известной разности температур циркуляционной воды на входе и выходе градирни при заданной скорости ветра (рис. 4,б). Совпадение неравномерности в виде среднего квадратичного отклонения на графиках показывает, что оборудование работает в штатном режиме. Существенное отличие среднего квадратичного отклонения распределений потоков воздуха на графиках рис. 4,а,б, которые показаны штриховыми линиями, свидетельствует о превышении регламентируемой неравномерности распределения расхода воздуха по секторам и о необходимости принятия мер для устранения указанной неравномерности.

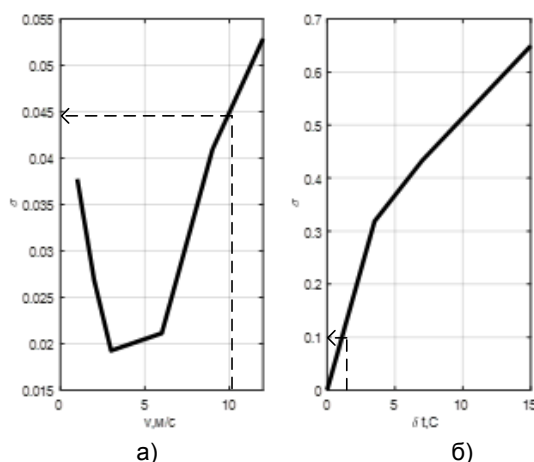


Рис. 4. Вариант численного решения обратной задачи диагностики распределения воздуха в поперечном сечении градирни: а – расчетная зависимость среднего квадратичного отклонения от скорости ветра; б – зависимость среднего квадратичного отклонения от недоохлаждения циркуляционной воды

Постановка и решение обратной задачи диагностирования в более сложных случаях, при которых диагностируется неравномерность распределения не только потоков воздуха, но и потоков циркуляционной воды по сечению, возможное загрязнение трубок конденсатора минеральными или органическими соединениями или неоптимальный угол установки лопастей циркуляционного насоса, не входят в круг задач настоящего исследования и планируются к более подробному рассмотрению при дальнейшем развитии предложенного подхода. Также планируется выполнить серию расчетов с разной степенью открытия фрамуг для выравнивания распределения потоков теплоносителей по сечению.

Выводы. В результате разработанного подхода к исследованию влияния скорости и направления ветра на распределение воздушных потоков внутри градирни и решения прямой задачи, в ходе которой определены неравномерности распределения по секторам в поперечном сечении градирни потоков воздуха при различных погодных условиях и скорости ветра, при которых наблюдается наибольшая неравномерность распределения потоков воздуха, намечены пути и разработаны рекомендации по уменьшению неравномерности воздушных потоков в поперечном сечении за счет управления степенью открытия фрамуг.

Постановка обратной задачи для случая диагностики неравномерности распределения воздуха по сечению при разных скоростях ветра позволила наметить подходы к решению задач диагностики технического состояния градирни при сочетании нескольких неисправностей в системе оборотного охлаждения.

Список литературы

1. Калатузов В.А., Павлов В.А. Расчет ограничений электрической мощности ТЭЦ, связанного с работой систем циркуляционного водоснабжения // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 18–22.
2. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

3. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.

4. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 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. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирнях 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.

7. 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 (XXII Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново, 2023. – С. 392–395.

8. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2009. – 480 с.

9. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 2006. – 575 с.

11. Таха Х. Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

References

1. Kalatuzov, V.A., Pavlov, V.A. Raschet ogranicheniy elektricheskoy moshchnosti TETs, svyazannogo 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.
2. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.
3. Isachenko, V.P. *TeplООbmen pri kondensatsii* [Heat exchange during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.
4. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Raschet i normirovanie pokazateley teplovoy ekonomichnosti oborudovaniya TES* [Calculation and normalization of indicators of thermal efficiency of the TPP equipment]. Ivanovo, 2015. 468 p.
5. Martynenko, O.G. (ed.) *Spravochnik po teplООbmen-nikam. V 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers. In 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.
6. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. Modelirovanie i raschet protsessa teplomassoobmena 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.
7. Fomichev, M.D., Zhukov, V.P. Raschetnyy analiz vliyaniya neravnomernosti raspredeleniya teplositeley 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]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii" (XXII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "State and prospects for the development of electrical and heat technology" (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 392–395.
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. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
10. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 575 p.
11. Takha, Kh. *Vvedeniye v issledovaniye operatsiy* [Introduction to Operations Research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.