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**

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](mailto: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](mailto:lgv83@yandex.ru)

**Валерий Федорович Очков**

Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Москва, телефон (495) 362-71-71,

e-mail: ochkovvf[@mpei.ru](mailto:borisov@ispu.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.** Известна 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.

**Методы и материалы.** Исследование влияния скорости и направления ветра на распределение потоков воздуха в поперечном сечении башенной градирне выполнено с использованием пакета ANSYS Fluent. Тепломассообмен в градирне описывается на основе тепловых и материальных балансов, представленных в виде матричных уравнений. Апробация 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, которая включает оценку неравномерности подачи воздуха и оценку снижения эффективности охлаждения циркуляционной воды за счет указанной неравномерности, позволяет перейти к постановке и решению обратной задаче диагностики технического состояние системы оборотного охлаждения, которая включает градирню в качестве основного элемента.

**Ключевые слова:** башенная градирня, прямая задача, скорость ветра, распределение воздуха, многопоточный теплообмен, эффективность теплообмена, обратная задача диагностики.

**MaksimDmitriyevichFomichev**

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of the Department of Nuclear Power Plants, 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, professor of the Department of Applied Mathematics, Russia, Ivanovo, telephone(4932) 26-97-45, e-mail: [zhukov-home@yandex.ru](mailto:zhukov-home@yandex.ru)

**Sergei Dmitrievich Gorshenin**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Head of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: [admin@tes.ispu.ru](mailto:admin@tes.ispu.ru)

**Valeriy Fedorovich Ochkov**

National Research University «MPEI», Doctor of Engineering Sciences, professor of the Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering, Russia, Moscow, telephone (495) 3627171, e-mail: [ochkovvf@mpei.ru](mailto:ochkovvf@mpei.ru)

**Evgeniy Vitalyevich Barochkin**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, professor of the Department of Thermal Power Plants, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13,

e-mail: bar@ivenser.com

**Taking into account 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, taking into account the uneven distribution of cooled water and cooling air over the cross-section of the cooling tower, the effect of this unevenness on the efficiency of cooling the circulating water is shown. 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 to take into account the influence of wind direction and speed when formulating and solving direct problems and the transition to the formulation and solution of inverse problems of diagnostics of the state of cooling towers and circulating cooling systems of thermal power plants and nuclear power plants.

**Materials and methods.** The task of studying the influence of wind speed and direction on the air flow and distribution in a cooling tower is solved using the ANSYS Fluent package. The task of heat and mass transfer in the cooling tower is solved based on heat and material balances for multi-flow systems presented in the form of matrix equations. The work was tested using operational data for a cooling tower with an irrigation area of 4000 m2.

**Results.** A solution to the problem of the influence of wind speed and direction on the uneven distribution of air flows in the cross section of a cooling tower is obtained, the reasons for the decrease in the efficiency of cooling circulating water due to this unevenness are shown, methods for reducing this unevenness by selectively controlling the degree of closing of air windows (transoms) are presented, and 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 in the efficiency of cooling the circulating water due to the said 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:** cooling tower, direct problem, wind speed, non-uniform distribution, multi-flow heat exchange, heat exchange efficiency, inverse diagnostic problem.

**DOI:**

**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, которые 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]. Понимание и моделирование указанных неравномерностей являются важным этапом для диагностики состояния градирен, корректировки их режима для повышения эффективности функционирования СОО. Известна 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 остались 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 – диагностику 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 градирне решается с использованием пакета ANSYS Fluent [9]. Для решения задачи тепломассообмена в градирне используется матричная формализация представления тепловых и материальных балансов [10].

**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 расчётной 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) [9]. На внешних границах наружной области определяется условие outlet (PressureOutlet), позволяющее воздуху покидать расчётную 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.

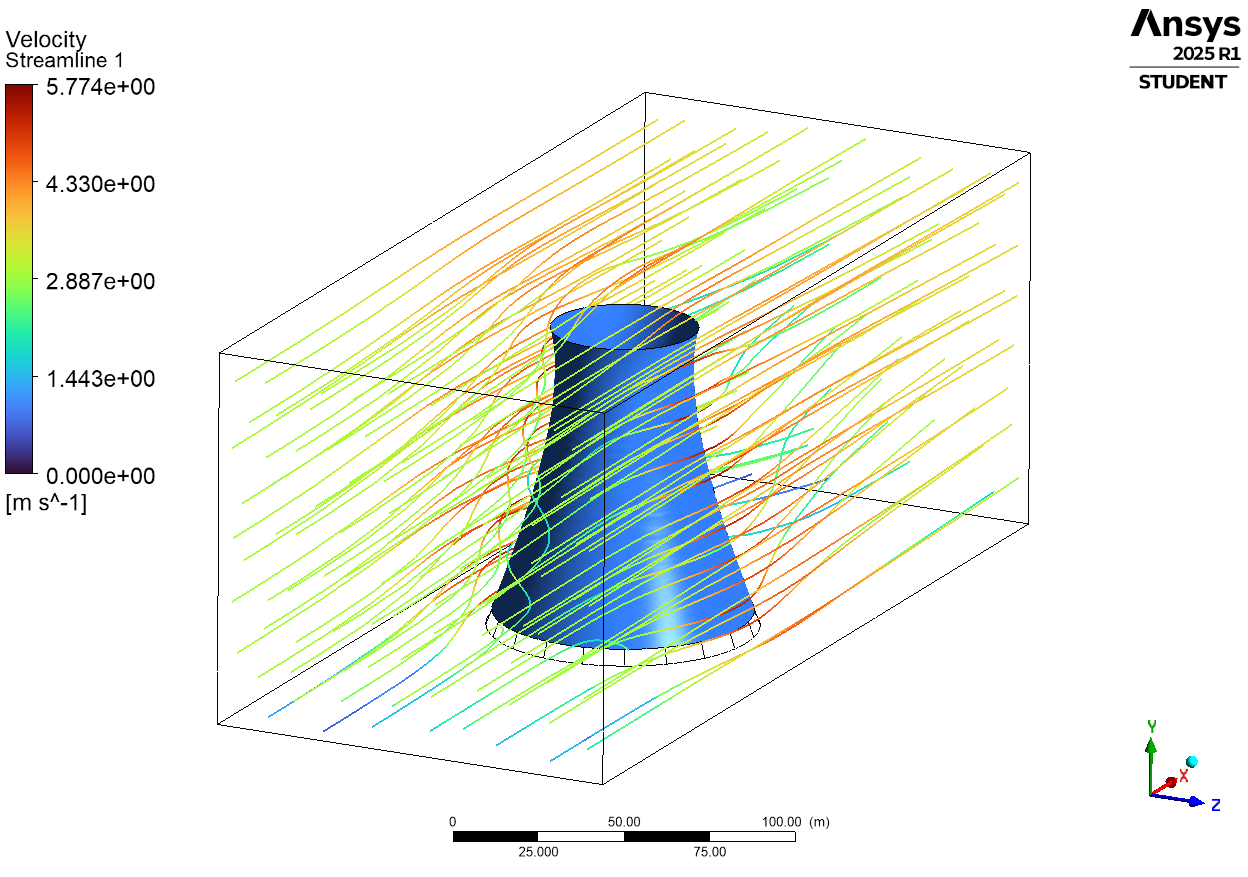


Рис. 1. Внешний вид башенной градирни и результаты первого этапа моделирования внешней расчетной области градирни в виде линий тока воздуха снаружи градирни

Моделирование внутренней области градирни производится на втором этапе с целью 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 градирни, оценка массовых расходов через выбранные области и выявление застойных зон. 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 (рис. 2,а), 3 (рис. 2,в), 12 (рис. 2,д) м/с. На этом же рисунке приведены распределения расходов воздуха по секторам поперечного сечения для тех же скоростей ветра соответственно: (рис. 2,б), (рис. 2,г), (рис. 2,е).

.

|  |  |
| --- | --- |
| а) | б) |
| в) | г) |
| д) | е) |
|  |  |

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

Таблица 1. **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 всех рассмотренных скоростей ветра результаты решения второго этапа прямой задачи в виде распределения расходов воздуха по сечению градирни представлены в табл. 1.

Для количественной оценки неравномерности распределения потоков воздуха по сечению градирни рассчитывается дисперсия и среднее квадратичное отклонение найденного распределения [11,12]. 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 распределение воздуха по выделенным секторам поперечного сечения позволяет в рамках матричной формализации решения задачи теплообмена для градирни [7,10] 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 подсистемы градирня. 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 расчеты по решению прямой задачи 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.



а) б)

Рис. 4. Алгоритм 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

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

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

**Выводы**

1. Исследовано влияние скорости и направления ветра на распределение воздушных потоков внутри градирни. Определены неравномерности распределения по секторам в поперечном сечении градирни потоков воздуха при различных погодных условиях и намечены пути их устранения. Определены скорости ветра, при которых наблюдается наибольшая неравномерность распределения потоков воздуха.

2. Намечены пути и разработаны рекомендации по уменьшению неравномерности воздушных потоков в поперечном сечении за счет управления степенью открытия фрамуг.

3. Представлена постановка обратной задачи для случая диагностики неравномерности распределения воздуха по сечению при разных скоростях ветра и намечены 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-х 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** и др. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – № 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 (ХХII Бенардосовские чтения): Материалы Международной научно-технической конференции, – Иваново, 2023. – С. 392-395.

8. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Численные методы решения обратных задач математической физики. – М.: Издательство ЛКИ, 2009. — 480 с.

9. ANSYS, Inc. (2020) ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg.Kloppers.

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

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

**12. 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 system tsirkulyatsionnogo vodosnayuzheniya [Calculation of the limitations of the electric power of the CHP plant associated with the operation of circulating water supply systems] // Elektricheskiye stantsii.1987, №4, 18-22.

2. Ryzhkin V.Ya. Teplovyye elektricheskiye stantsii [Thermal power plants]. M.: Energoatomizdat, 1987. 328 p.

3. Isachenko V.P. Teploobmen pri kondensatsii [Heat exchange during condensation]. M.: Energia, 1977. 240 p.

4. Ledukhovskiy G.V., Pospelov A.A. Raschet i normirovaniye pokazateley teplovoyekonomichnosti oborudovaniya TES [Calculation and normalization of indicators of thermal efficiency of the TPP equipment], Ivanovo: IGEU, 2015. 468 p.

5. Spravochnik po teploobmennikam [Handbook of heat exchangers]: V 2-kh t. T. 1 / Per. s angl. pod red. O. G. Martynenko i dr. M.: Energoatomizdat, 1987. 560 p.

6. Zhukov V.P. i dr. Modelirovaniye 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 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] // State and prospects for the development of electrical and heat technology (XXII Benardos Readings): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Ivanovo, 2023. p. 392-395.

8. Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. Chislennyye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. M.: LKI Publishing House, 2009. 480 p.

9. ANSYS, Inc. (2020) ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg. Kloppers.

10. Zhukov V.P., Barochkin E.V. Sistemny analiz energeticheskikh teplomassoobmennykh ustanovok [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

11. Ventzel E.S. Teoriya veroyatnostey. [Probability Theory]. M.: Higher.school, 2006. 575 p.

12. Taha H. Vvedeniye v issledovaniye operatsiy [Introduction to Operations Research] M.: Williams, 2005. 901 p.