

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 519.87

Максим Дмитриевич Фомичев

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

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

Мария Владимировна Козлова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-24, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Исследование влияния скорости ветра на неравномерность распределения воздушного потока в башенных градирнях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Дефицит источников слабоминерализованной воды в местах строительства и эксплуатации мощных энергоблоков ТЭС и АЭС обуславливает необходимость повышения эффективности систем оборотного охлаждения. В этих условиях важную роль приобретают системы оборотного охлаждения воды с башенными градирнями, повышение эффективности которых при различных погодных условиях путем моделирования и оптимизации процессов теплообмена имеет особую актуальность.

Материалы и методы. Моделирование движения потоков воздуха в градирне осуществляется с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Процесс охлаждения воды в рамках методологии матричного моделирования многопоточных теплообменных установок рассчитывается с учетом найденного распределения потоков воздуха в градирне.

Результаты. Найдено поле скоростей воздуха и распределение потоков воздуха по сечению градирни при различных скоростях ветра. Приведена оценка влияния неравномерности потоков воздуха по сечению на эффективность охлаждения воды. Предложены пути и методы выравнивания данных неравномерностей при различных погодных условиях.

Выводы. Разработанная комбинированная модель процесса теплообмена в градирне позволяет эффективно решать задачи выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров оборудования систем охлаждения при различных погодных условиях, а также проводить диагностику состояния системы оборотного охлаждения.

Ключевые слова: система охлаждения, башенная градирня, матричное моделирование, поле скоростей, теплообмен, многопоточный теплообменник

Maxim Dmitrievich Fomichev

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

Vladimir Pavlovich Zhukov

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

Maria Vladimirovna Kozlova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-24, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Study of wind speed influence on non-uniformity of air flow distribution in tower cooling towers

Abstract

Background. The shortage of sources of low-mineralized water in the areas of construction and operation of powerful power units of thermal power plants and nuclear power plants necessitates to increase the efficiency of circulating cooling systems. Under these conditions, water recycling systems with cooling towers play a key role, increasing efficiency of which by modeling and optimizing heat and mass transfer processes becomes an urgent task.

Materials and methods. Modeling of the movement of air flows in a cooling tower is carried out using a package in ANSYS Fluent. The water-cooling process, considering the found distribution of air velocities across the cross section of the cooling tower, is calculated within the framework of the matrix modeling methodology of multi-flow heat and mass transfer installations.

Results. As a result of the study, the air velocity field and the distribution of air flows across the cross section of the cooling tower at different wind speeds have been found. The influence of uneven air flows across the cross section on the efficiency of water cooling has been assessed. The ways and methods for leveling these unevennesses under different weather conditions have been proposed.

Conclusions. The developed combined model of the heat and mass transfer process in a cooling tower makes it possible to effectively solve the problem of choosing the optimal design and operating parameters of cooling system equipment under various weather conditions, as well as to diagnose the state of the recirculation cooling system.

Key words: cooling system, cooling tower, matrix simulation, velocity field, heat and mass transfer, multiflow heat exchanger

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.075-080

Введение. В настоящее время энергетическая отрасль все чаще сталкивается с необходимостью повышения эффективности и надежности систем оборотного охлаждения (СОО) [1–8], что в первую очередь связано со строительством новых мощных блоков АЭС в местах с ограниченными ресурсами слабоминерализованной воды. В этой связи особую актуальность приобретают системы воздушного охлаждения циркуляционной воды, одним из ключевых элементов которых являются воздушные градирни [9–13]. За счет понижения температуры охлаждающей воды улучшается вакуум в конденсаторе паровой турбины, повышается термодинамический коэффициент полезного действия установки. То есть чем эффективнее охлаждается циркуляционная вода в градирне, тем эффективнее работает энергетическая установка. С ростом числа новых мощных энергоблоков, особенно в регионах с ограниченными водными ресурсами, проблема совершенствования конструкций и режимов эксплуатации градирен становится все более актуальной.

Результаты ранее проведенных исследований [5, 10, 12] показали, что неравномерное распределения потоков воздуха и воды по сечению градирни может приводить к существенному (на 5–10 °С) недоохлаждению циркуляционной воды, что, соответственно, обуславливает, согласно литературным данным [5, 10], ухудшение вакуума в конденсаторе примерно на 1 кПа и может приводить к потере мощности при конденсационном режиме работы турбины до 1%. В [10] показано, что такое увеличение температуры циркуляционной воды после градирни может происходить из-за неравномерного распределения потоков воды и воздуха в поперечном сечении градирни.

На эффективность работы градирен существенное влияние оказывают погодные условия. Одним из основных факторов, влияющих на равномерность распределения воздушного потока, на охлаждение циркуляционной воды и, следовательно, на общую эффективность энергетической установки, являются скорость и направление ветра.

Целью исследования является повышение эффективности функционирования энергетической установки путем повышения эффективности охлаждения циркуляционной воды в башенных градирнях на основе моделирования градирни с учетом скорости ветра.

Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие задачи:

- построение модели полей скоростей воздуха в градирне при разных скоростях ветра с использованием пакета ANSYS Fluent [14–17];
- анализ влияния неравномерности распределения потоков воздуха по сечению с учетом влияния скорости ветра на эффективность охлаждения воды и разработка мероприятий по устранению указанной неравномерности;
- анализ эффективности предлагаемых мероприятий по устранению неравномерности потоков воздуха по сечению градирни.

Решение поставленных задач позволит более детально и всесторонне исследовать процессы, происходящие в башенных градирнях, и выявлять ключевые факторы, влияющие на эффективность охлаждения циркуляционной воды.

Методы и результаты исследования. Моделирование и анализ эффективности функционирования градирни проведены на примере градирни БГ-1600 с площадью орошения 1600 м². Исходные данные для расчетного анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Показатель	Значение
Расход воды, подаваемой на градирни, м ³ /ч	12480
Температура исходной воды, °С	37
Плотность орошения, м ³ /(ч·м ²)	7,8
Влажность воздуха, %	20
Удельная тепловая нагрузка, Мкал/(ч·м ²)	61

Для решения первой из заявленных задач используется пакет ANSYS Fluent, в рамках которого выполняется численное моделирование полей скоростей при разных скоростях ветра и определяются распределения потоков воздуха по сечению градирни [14–17]. При построении модели градирни используется сетка с элементами размером 4 м и k - ϵ модель турбулентности. Скорость и направление ветра моделируется заданием соответствующих граничных условий в

пакете ANSYS Fluent. В ходе выполнения расчетов сначала определяется поле скоростей потоков воздуха, на основании которого визуализируются области с разными скоростями движения воздуха и определяются распределения воздушного потока и массовые расходы в поперечном сечении градирни при разных скоростях ветра.

На рис. 1 приведены результаты моделирования в виде полей скоростей воздуха, цвет линий и их направление соответствует значениям вектора скорости воздуха в данной точке при разных скоростях ветра: 0(а), 4(б) и 12(в) м/с.

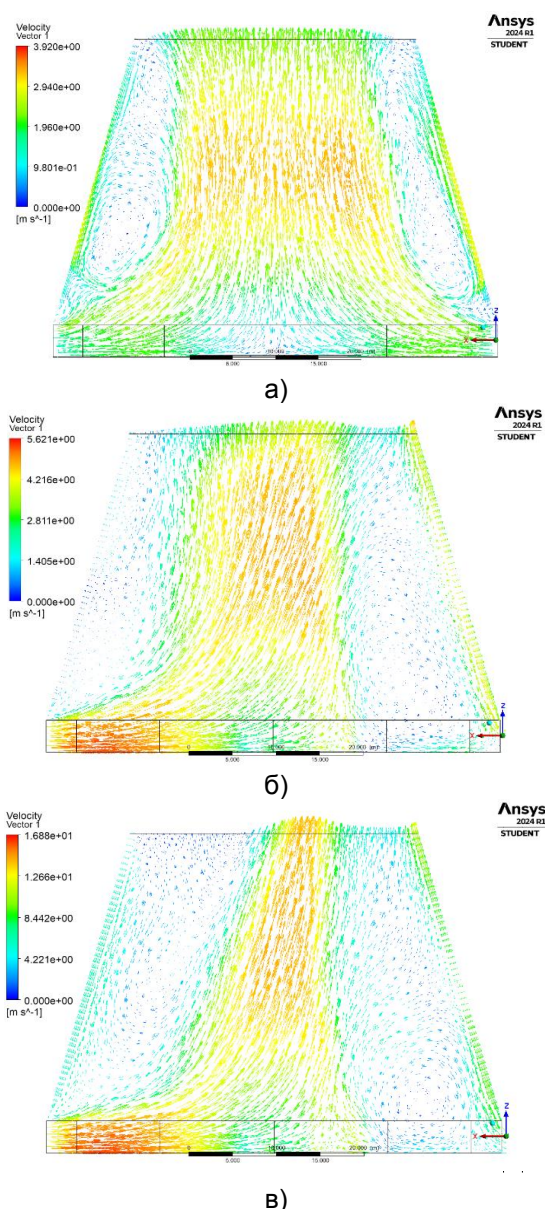


Рис. 1. Визуализация направления и скорости движения воздуха внутри градирни при различных скоростях ветра: а – 0; б – 4; в – 12 м/с

Анализ направлений и скоростей воздуха показывает, что при увеличении скорости

ветра распределение потоков воздуха по градирне становится более неравномерным.

Для количественной оценки неравномерности распределения потоков воздуха сечение градирни условно делится радиусами на четыре сектора с равными площадями. Представленные на рис. 1 результаты позволяют определить расходы воздуха в вертикальном направлении для четырех выделенных секторов. Для этого после выполнения расчетов в программном комплексе ANSYS Fluent производится экспорт значений массового расхода для каждой ячейки расчетной сетки. Затем для каждой из четырех частей поперечного сечения градирни определяется расход воздуха. На рис. 2 показаны расходы воздуха по выделенным секторам как массовые доли общего расхода при разных скоростях ветра.

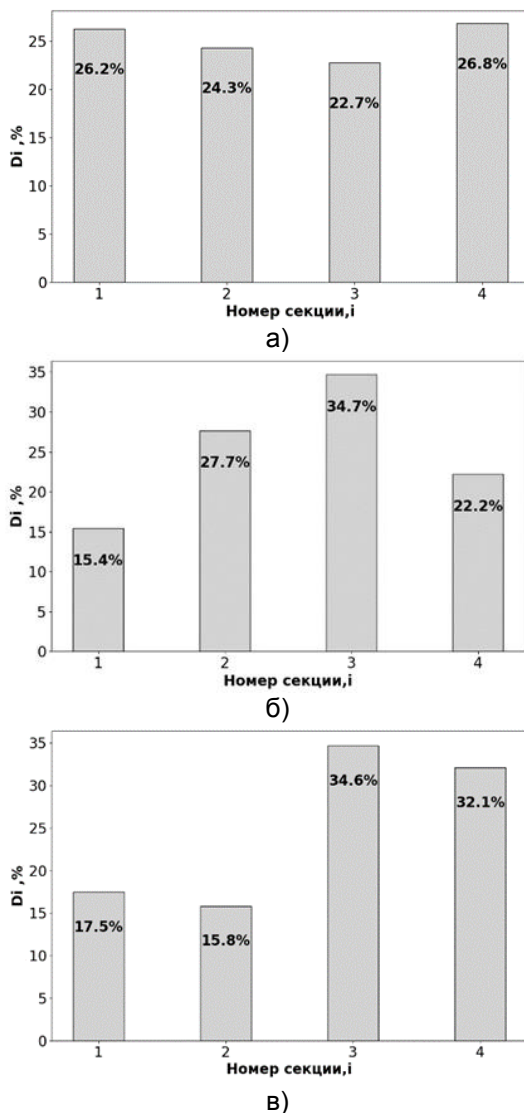


Рис. 2. Распределение потоков воздуха по четырем секторам, выделенным в горизонтальном сечении градирни, при разных скоростях ветра: а – 0; б – 4; в – 12 м/с

Приведенные зависимости показывают, что с увеличением скорости ветра неравномерность потоков воздуха существенно увеличивается.

Для интегральной оценки неравномерности распределения расходов воздуха по сечению предлагается использовать суммарное отклонение расходов от среднего значения согласно следующему алгоритму.

1. Определение среднего расхода воздуха для сектора:

$$G_{\text{ср}} = \frac{G_0}{n},$$

где G_0 – общий расход через поперечное сечение градирни; n – количество секторов.

2. Вычисление модуля отклонения фактического расхода от среднего для каждого сектора:

$$\Delta_i = |G_i - G_{\text{ср}}|,$$

где G_i – фактический расход через i -й сектор $i = 1, n$.

3. Определение относительного отклонения секторального расхода, выраженное в процентах:

$$D_i = \frac{\Delta_i}{G_{\text{ср}}} \cdot 100.$$

4. Суммарное (по всему поперечному сечению) отклонение расхода воздуха по секторам от среднего значения:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i.$$

На рис. 3 приведена зависимость суммарного отклонения расхода по секторам от скорости ветра. Представленная зависимость позволяет количественно оценить увеличение неравномерности потоков с увеличением скорости ветра.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных на градирне БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ [12], установлено, что при средней скорости ветра 3,75 м/с общая неравномерность распределения воздушного потока составила 28,4 %. Указанные экспериментальные результаты с учетом погрешности экспериментальных данных удовлетворительно согласуются с рассчитанными значениями в рамках предложенной модели при скорости ветра 4 м/с, что свидетельствует об адекватном описании моделью реального процесса. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности дальнейшего использования модели для прогнозирования мероприятий

по устранению влияния ветра на эффективность охлаждения циркуляционной воды.

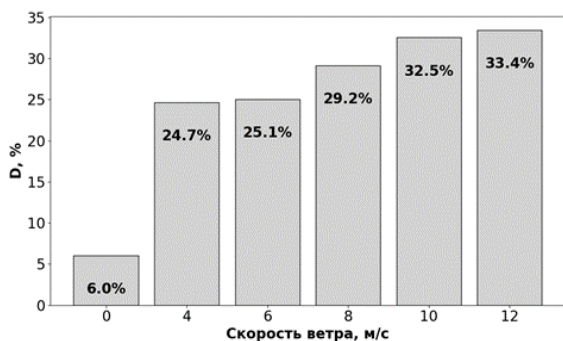


Рис. 3. Зависимость общей неравномерности распределения воздуха по сечению градирни от скорости ветра

Следует отметить, что в проведенных ранее исследованиях [10] показано, что такая неравномерность может приводить к существенному недоохлаждению циркуляционной воды, к ухудшению вакуума и снижению экономичности функционирования всего блока.

Неравномерное распределения потоков воздуха в перечном сечении градирни, которое обусловлено ветровой нагрузкой, предлагается устранять закрытием по предварительно заданному алгоритму противоположных от направления ветра фрамуг. Принципиальная возможность и эффективность предложенных мероприятий демонстрируется на следующем расчетном примере. В качестве тестового мероприятия предлагается закрывать те фрамуги, которые находятся на противоположной направлению ветра стороне, то есть при северном ветре закрывается часть фрамуг с южной стороны. Эффективность этих мероприятий проверялась на тестовых расчетах в рамках описанной модели. На рис. 4 представлены результаты, аналогичные полученным выше (рис. 3), но при закрытых фрамугах. Проведенные исследования показывают существенное уменьшение (примерно в 2 раза) неравномерности потоков при закрытии фрамуг по предложенному алгоритму при разных скоростях ветра. Представленные результаты показывают принципиальную возможность и чувствительность управления неравномерностью потоков воздуха закрытием фрамуг.

Следует отметить, что для каждой градирни и при разных направлениях и скоростях ветра существует свое оптимальное решение по снижению неравномерности потоков воздуха, которое необходимо искать в

непосредственной привязке решения к конкретным условиям. Указанные оптимальные решения необходимо определять для каждого конкретного условия с учетом расположения строений станции и оформлять в виде инструкции для оперативного управления технологическим оборудованием с учетом конкретных погодных условий.

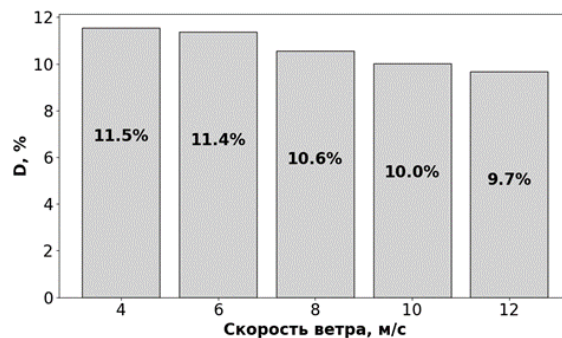


Рис. 4. Общая неравномерность распределения воздуха по сечению градирни в зависимости от скорости ветра при закрытии противоположных ветровому потоку фрамуг

Выводы. Разработанная модель показала хорошее соответствие рассчитанных и экспериментальных результатов по оценке неравномерности распределения потоков воздуха по сечению градирни при известных скоростях ветра.

Представленная модель позволяет анализировать мероприятия по устранению неравномерного распределения потоков воздуха путем закрытия фрамуг, выбранные по определенному алгоритму.

В перспективе представленная модель может использоваться для проведения диагностики состояния систем охлаждения на основе данных, полученных от штатных приборов, что позволит повысить экономичность и надежность эксплуатации оборудования.

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. Калатузов В.А. Повышение располагаемой мощности тепловых электростанций с градирнями: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2003. – 113 с.
3. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Математические модели и методы расчетов теплообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах. – Казань: ТНТ, 2021. – 288 с.
4. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

5. **Ледуховский Г.В., Поспелов А.А.** Энергетические характеристики оборудования ТЭС. – Иваново, 2014. – 232 с.

6. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

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

8. **Справочник по теплообменникам:** в 2 т. Т. 1 / пер. с англ.; под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

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

10. **Фомичев М.Д., Жуков В.П.** Расчетный анализ влияния неравномерности распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлаждаемой воды // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XXII Бенардосовские чтения), Иваново, 2023. – Иваново, 2023. – С. 392–395.

11. **Моделирование** и расчет процесса теплообмена 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.

12. **Бадриев А.И., Власов С.М., Чичирова Н.Д.** Анализ нормальности распределения потоков в башенных испарительных градирнях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13, № 1(49). – С. 236.

13. **Комбинированная** модель теплообмена в башенных градирнях / В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 90–96.

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

15. **Razafindrakoto E., Denis C.** N3S-AERO: a multidimensional model for numerical simulation of flows in cooling towers // The 11th IAHR Cooling Tower Symposium. – Cottbus, Germany, 1998. – P. 1–12.

16. **Majumdar A., Singhal A., Spalding D.** Numerical modelling of wet cooling towers. Part 1: Mathematical and physical models // Journal of Heat Transfer. – 1983. – Vol. 105. – P. 728–735.

17. **Numerical** modelling of wet cooling towers. Part 2: Application to natural and mechanical draft towers / A. Majumdar, A. Singhal, H. Reilly, J. Bartz // Journal of Heat Transfer. – 1983. – Vol. 105. – P. 736–743.

References

1. Kalatuzov, V.A., Pavlov, V.A. Raschet ogranicheniy elektricheskoy moshchnosti TETS, svyazannogo s rabotoy system 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. 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.

3. Laptev, A.G., Basharov, M.M., Lapteva, E.A. *Matematicheskie modeli i metody raschetov teplomassoobmennyykh i separatsionnykh protsessov v dvukhfaznykh sredakh* [Mathematical models and methods for calculating heat and mass transfer and separation processes in two-phase media]. Kazan: TNT, 2021. 288 p.

4. Brodov, Yu.M., Savel'ev, R.Z. *Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin* [Condensing units of steam turbines: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 288 p.

5. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Energeticheskie kharakteristiki oborudovaniya TES* [Energy characteristics of thermal power plant equipment]. Ivanovo, 2014. 232 p.

6. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.

7. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat exchange during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.

8. Martynenko, O.G. *Spravochnik po teploobmennikom: v 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers: in 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 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. Fomichev, M.D., Zhukov, V.P. Raschetnyy analiz vliyaniya neravnomernosti raspredeleniya teplonositel'nykh potokov 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]. *Materiyaly Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XXII Benardosovskie chteniya)*, Ivanovo, 2023 [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “State and prospects for the development of electrical and heat technology” (XXII Benardos Readings), Ivanovo, 2023]. Ivanovo, 2023, pp. 392–395.

11. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. Modelirovaniye i raschet protsessy teplomassoobmena v bashennykh gradirnyakh sistem obratnogo okhlazhdeniya TES i AES [Modeling and calculation of process of heat and mass transfer in cooling towers of circulating cooling systems of TPP and NPP]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 3, pp. 57–63.

12. Badriev, A.I., Vlasov, S.M., Chichirova, N.D. Analiz normal'nosti raspredeleniya potokov v bashennykh isparitel'nykh gradirnyakh [Analysis of the normality of flow distribution in evaporative cooling towers]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2021, vol. 13, no. 1(49), p. 236.

13. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Barochkin, E.V., Shuina, E.A., Shuvalov, C.I. *Kombinirovannaya model' teplomassoobmena v bashennykh gradirnyakh* [Combined model of heat and mass transfer in cooling towers]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 90–96.

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

15. Razafindrakoto, E., Denis, C. N3S-AERO: a multidimensional model for numerical simulation of flows in cooling towers. The 11th IAHR Cooling Tower Symposium. Cottbus, Germany, 1998, pp. 1–12.

16. Majumdar, A., Singhal, A., Spalding, D. Numerical modelling of wet cooling towers. Part 1: Mathematical and physical models. *Journal of Heat Transfer*, 1983, vol. 105, pp. 728–735.

17. Majumdar, A., Singhal, A., Reilly, H., Bartz, J. Numerical modelling of wet cooling towers. Part 2: Application to natural and mechanical draft towers. *Journal of Heat Transfer*, 1983, vol. 105, pp. 736–743.