

УДК 536.24.08

Владимир Павлович Жуков

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

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

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: admin@tes.ispu.ru

Елена Александровна Шуина

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

Сергей Ильич Шувалов

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

Комбинированная модель тепломассообмена в башенных градирнях

Авторское резюме

Состояние вопроса. К приоритетным направлениям научно-технической политики Российской Федерации относятся исследования в области энерго- и ресурсосберегающих технологий при производстве тепловой и электрической энергии. Одним из возможных путей реализации данного направления на тепловых и атомных электростанциях является повышение эффективности функционирования систем оборотного охлаждения. В связи с этим моделирование и оптимизация систем оборотного охлаждения с башенными градирнями приобретает особую актуальность в современных условиях ограниченного количества слабоминерализованной воды для подпитки систем оборотного охлаждения.

Материалы и методы. Для определения параметров движения воздуха в башенной градирне разработана трехмерная имитационная модель. Для описания тепломассообмена с учетом фазовых переходов в теплоносителях использована матричная модель, построенная на уравнениях баланса массы и энергии.

Результаты. Разработана комбинированная модель системы оборотного охлаждения с башенными градирнями, описывающая движение воздуха в рамках трехмерной имитационной модели и процесс тепломассопереноса с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях в рамках матричной модели. Выполнено сравнение результатов моделирования с нормативными данными, показано адекватное описание комбинированной моделью реального процесса.

Выводы. Разработанная комбинированная модель позволяет ставить и решать задачи по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров оборудования СОО, а также решать задачи диагностики состояния оборудования по показаниям штатных приборов. В перспективе предложенный метод расчета позволит оптимизировать режимы работы комбинированных систем водоснабжения, которые совмещают в себе охлаждение воды по прямоточной схеме с охлаждением воды по оборотной схеме с градирнями.

Ключевые слова: система оборотного охлаждения, башенная градирня, сеточная модель градирни, поле скоростей, тепломассообмен, многопоточный теплообменник

Vladimir Pavlovich Zhukov

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

Maxim Dmitrievich Fomichev

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

Evgeny Vitalievich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Elena Alexandrovna Shuina

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

Sergei Ilyich Shuvalov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Combined model of heat and mass transfer in cooling towers

Abstract

Background. The priority directions of the scientific and technological policy of the Russian Federation include issues on research in the field of energy and resource saving technologies while generating heat and electric energy. One of the possible ways to implement it at thermal and nuclear power plants is to increase the efficiency of the operation of circulating cooling systems (COO). Modeling and optimization of circulating cooling systems with tower cooling towers is of particular relevance under modern conditions of a limited amount of low-mineralized water for charging circulating cooling systems.

Materials and methods. To determine the parameters of air flow in the tower cooling tower, a three-dimensional simulation model is developed. To describe heat and mass transfer, considering the phase transitions in coolants, a matrix model is used. The model is developed based on the mass and energy balance equations.

Results. A combined model of a circulating cooling system with cooling towers has been developed. It describes air flow within the framework of a three-dimensional simulation model and the process of heat and mass transfer, considering a possible phase transition in coolants within the framework of a matrix model. Comparison of modeling results and normative data is carried out. Adequate description of the real-life process using the combined model is presented.

Conclusions. The developed combined model allows setting and solving problems of choosing the optimal design and operating parameters of the COO equipment, as well as solving problems of diagnosing the state of the COO according to the readings of standard instruments. In the future, the proposed calculation method will allow optimizing the operating modes of combined water supply systems, which combine water cooling in a direct-flow scheme and water cooling in a reverse scheme with cooling towers.

Key words: circulation cooling system, cooling tower, network model of cooling tower, velocity field, heat and mass transfer, multiflow heat exchanger

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.090-096

Введение. Системы оборотного охлаждения [1–3] призваны играть важную роль в разработке и совершенствовании технологий, направленных на сбережение природных ресурсов и энергии на тепловых и атомных электростанциях. Особую актуальность приобретает совершенствование данных технологий в условиях ограниченного количества слабоминерализованной воды для подпитки систем оборотного охлаждения (СОО) с башенными градирнями¹ [3]. Типовых проектов градирен существует немало, однако для выбора нужной конструкции и режима ее работы требуется учитывать индивидуальные технологические и метеорологические условия ее эксплуатации. Для эффективного функционирования СОО во всем диапазоне возможных нагрузок требуется описание характеристик рабочего процесса конкретной охлаждающей установки, которое может быть получено в рамках поверочных и проектных расчетов. При выполнении расчетов тепломассообменных процессов при сложном

характере движения теплоносителей встает вопрос о выборе модели, метода расчета и его программного обеспечения. Существующие программные пакеты имитационного моделирования, к которым можно отнести Ansys Fluent, Comsol Multiphysics и др.² [4–6], хорошо справляются с решением стандартных задач, для которых они, по существу, и были разработаны. При расчетном анализе совмещенных процессов движения и тепломассопереноса, осложненных фазовым переходом в теплоносителях, удастся далеко не всегда получить удовлетворительное качество и точность результатов в силу специфических условий протекания этих процессов. Существующие матричные математические модели и методы расчета на их основе [7–10] не всегда с заданной точностью могут решать стандартные многомерные задачи движения многофазных сред или требуют значительных временных ресурсов для разработки и отладки программ для их решения.

¹ Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение, наружные сети и сооружения») / ВНИИВОДГЕО Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 190 с.

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

Очевидно, существуют задачи, для которых целесообразно использовать комбинированные модели и методы расчета, включающие известные матричные модели и программные пакеты имитационного моделирования, которые наилучшим образом совмещают преимущества указанных подходов.

В качестве объекта моделирования рассматривается башенная градирня, предметом исследования является комбинированная модель, сочетающая преимущества программных пакетов имитационного моделирования и матричных моделей тепломассообмена.

Целью исследования является повышение эффективности функционирования СОО на основе использования комбинированной модели, сочетающей описание движения воздуха в градирне в рамках программного пакета Ansys Fluent с описанием тепломассообмена в рамках матричной модели.

Методы и результаты исследования.

Моделирование и расчет были проведены на примере башенной градирни БГ-1600 с площадью орошения 1600 м². Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Показатель	Значение
Расход воды, подаваемой на градирню, 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

Алгоритм расчета башенной градирни в рамках предлагаемой комбинированной модели приведен на рис. 1.

Перед проведением расчета наряду с другими исходными данными, представленными в табл. 1, задается начальное значение удельной тепловой нагрузки градирни. Затем на первом этапе с помощью пакета Ansys Fluent определяются поле скоростей и расход воздуха через градирню, зная которые, на втором этапе в рамках матричной модели рассчитываются температуры теплоносителей на выходе из градирни и уточняется тепловая нагрузка. Сравнивая найденную и заданную тепловые нагрузки, принимается решение о завершении или продолжении расчета. Уточнение значения удельной тепловой нагрузки и тепломассообменных показателей работы градирни проводится до достижения заданной степени точности расчета.

Ключевым элементом расчетной процедуры на первом этапе моделирования является сеточная модель, используемая для градирни в Ansys Fluent.



Рис. 1. Алгоритм расчета башенной градирни в рамках комбинированной модели

Сеточная модель представляет собой дискретную аппроксимацию расчетной области на множество конечных элементов, которые могут быть прямоугольными, треугольными, тетраэдральными или гексаэдральными. Для построения сеточной модели градирни в Ansys Fluent используется алгоритм автоматической генерации сетки³, который позволяет создать сетку с высокой плотностью элементов в областях с большими градиентами скорости и температуры, а также с низкой плотностью элементов в областях с малыми градиентами. Это обеспечивает более точные результаты расчета при сохранении вычислительной эффективности.

Для улучшения качества расчета также используется метод адаптивной рефинировки сетки⁴, который позволяет дополнительно уменьшить размер элементов в областях с большими градиентами, что повышает точность расчета в этих областях. В результате сеточная модель может быть адаптирована к различным физическим условиям и геометрическим особенностям градирни.

Важным аспектом построения сеточной модели является выбор типа элементов, который должен соответствовать особенностям моделируемой физической системы. Для моделирования градирни используются тетраэдральные и гексаэдральные элементы. Модель градирни, использующая сетку с размером ячейки порядка 4 м с общим количеством элементов 10580, позволяет получить детальную информацию о динамике течения и теплообмене в градирне и гарантирует достаточную точность расчета.

Внешний вид градирни БГ-1600 и ее сеточная модель приведены на рис. 2.

³ FLUENT Incorporated, FLUENT Users Guide Release 12, Lebanon, New Hampshire, USA, 2009.

⁴ Там же.

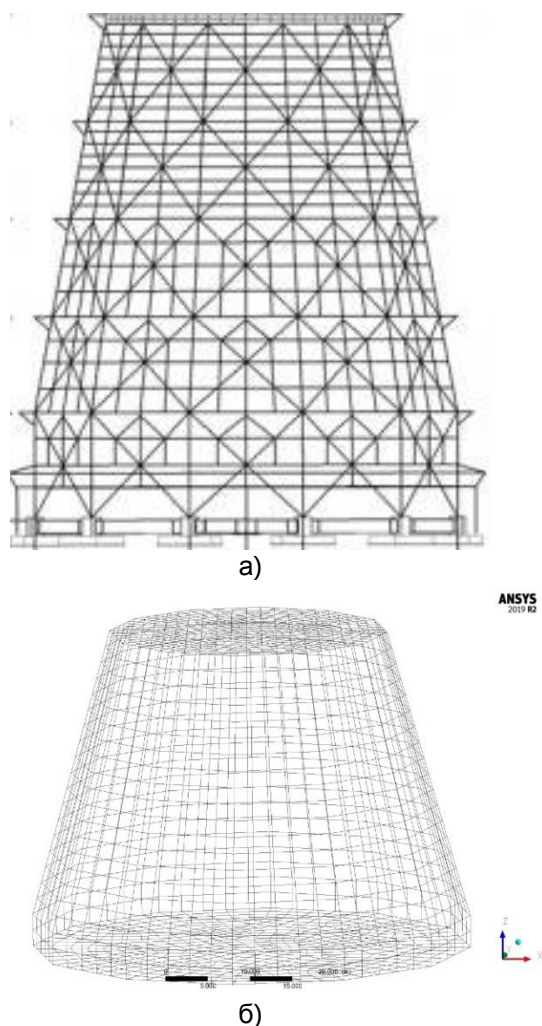


Рис. 2. Внешний вид (а) и сеточная модель (б) градирни БГ-1600

Воздух поступает в градирню через специальные окна, расположенные в нижней части конструкции. В исследовании была рассмотрена ситуация, когда окна были полностью открыты и отсутствует боковой ветер, обдувающий градирню.

В Ansys Fluent при моделировании градирни используются граничные условия, которые задаются на границах расчетной области и определяют входные и выходные условия для потоков воздуха. Одним из распространенных наборов граничных условий для моделирования градирни является *pressure inlet* и *pressure outlet*. Данные граничные условия были выбраны для моделирования движения потоков воздуха в градирне из области более низкой температуры в область с более высокой температурой без учета влияния бокового ветра, обдувающего градирню.

Граничное условие *pressure inlet* определяет давление на входной границе расчетной области. Это граничное условие было использовано для моделирования входного потока воздуха в градирню, который может быть задан как постоянным, так и изменяющимся во времени. В

Ansys Fluent *pressure inlet* также позволяет задавать температуру входящего потока и его химический состав, что обеспечивает моделирование различных условий входного потока в градирне.

Граничное условие *pressure outlet* определяет давление на выходной границе расчетной области. Это граничное условие может быть использовано для моделирования выходного потока из градирни. В Ansys Fluent *pressure outlet* также позволяет задавать давление окружающей среды, что обеспечивает моделирование условия выхода потока воздуха в атмосферу.

Полученные результаты динамического моделирования движения воздуха приведены на рис. 3 в виде линий тока воздуха во внутренней области градирни. Результаты проведенных расчетов позволяют также определить расход воздуха через градирню при разных температурах атмосферного воздуха.

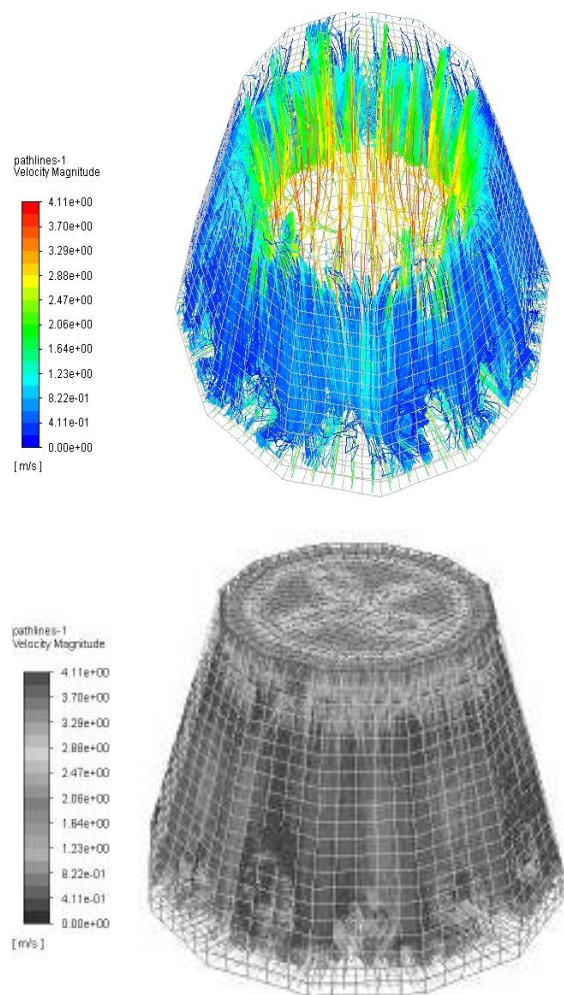


Рис. 3. Результаты моделирования движения воздуха в градирне БГ-1600

В результате имитационного моделирования были получены значения расхода воздуха в зависимости от температуры входящего в градирню атмосферного воздуха. Результаты расчета приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Найденный на первом этапе моделирования расход воздуха позволил перейти ко второму этапу и выполнить расчетный анализ охлаждающей способности градирни, проведенный согласно матричной модели [7]. Порядок подготовки исходной информации, матричные уравнения, метод их решения и получаемые результаты подробно представлены в [7].

Таблица 2. Результаты расчета расхода воздуха через градирню БГ-1600 при разных температурах наружного воздуха

$t_1, ^\circ\text{C}$	$G, \text{кг/с}$
35	2078,498
30	2051,235
25	2054,644
20	2126,289
15	2172,89
10	2195,885
5	2241,216
0	2263,438
-5	2331,692
-10	2374,482
-15	2416,339
-20	2457,649
-25	2517,695

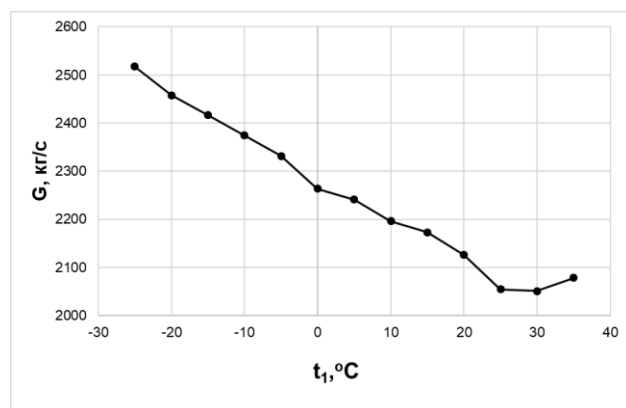


Рис. 4. Зависимость расхода воздуха в градирне от температуры наружного воздуха

При анализе охлаждающей способности градирни в ходе решения матричных уравнений находятся зависимости температуры теплоносителей вдоль определяющей координаты, в качестве которой выбрано размерное число единиц переноса [11], которое определяется как произведение коэффициента теплопередачи k и площади поверхности теплообмена F .

Результаты расчетного анализа представлены на рис. 5. Зависимости температуры охлаждаемой воды вдоль определяющей координаты для разных значений температуры наружного воздуха изображены на рис. 5,а, где точками отображены нормативные значения температуры, определенные согласно номограммам⁵. Сопоставление расчетных и нормативных значений температур показывает адекватное описание комбинированной моделью реального процесса тепломассопереноса в башенной градирне. На рис. 5,б показаны зависимости температуры воздуха вдоль определяющей координаты при разных температурах наружного воздуха. В виду того что нормативные показатели для отрицательных температур для градирни БГ-1600 отсутствуют, результаты расчета приведены для положительных температур поступающего воздуха.

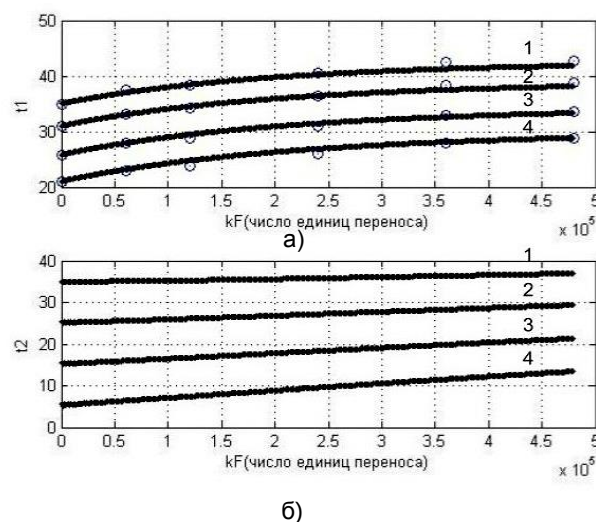


Рис. 5. Зависимость температуры охлаждаемой воды (а) и воздуха (б) от определяющей координаты (kF , Вт/К) при разных температурах поступающего воздуха: 1 – $t_{20} = 35 ^\circ\text{C}$; 2 – $t_{20} = 25 ^\circ\text{C}$; 3 – $t_{20} = 15 ^\circ\text{C}$; 4 – $t_{20} = 5 ^\circ\text{C}$; линии – расчетные значения согласно комбинированной модели; точки – нормативные данные [14]

Результаты расчета охлаждения воды в градирне, полученные согласно комбинированной модели, основанной на матричной модели фазового перехода и модели воздушного потока, разработанной с помощью комплекса Ansys Fluent, приведены в табл. 3, где для сравнения показаны нормативные данные охлаждения воды в градирне. Незначительное расхождение (6–7 %) между расчетными значениями температур и значениями, полученными по номограммам, является допустимым с учетом погрешности экспериментальных исследований.

⁵ РД 34.09.212. Указания по нормированию показателей работы гидроохлаждаителей в энергетике: утверждено зам. начальника Главтехуправления Д.Я. Шамараковым 7.02.1980 г. Главное техническое управление по эксплуатации энергосистем. – М.: Южтехэнерго, 1981. – 37 с.

Таблица 3. Сопоставление расчетных и нормативных данных охлаждения воды в градирне

$t_{\text{возд}}$	G , кг/с	Δt (расч.)	Δt (норм.)
35	2078,498	6,5	6,8
30	2051,235	6,3	7,1
25	2054,644	6,7	7
20	2126,289	8,8	8,8
15	2172,89	8,2	8,1
10	2195,885	7,5	7,2
5	2241,216	9	8,6
0	2263,438	6	5,7

Приведенные результаты расчетов температур охлажденной воды позволяют сделать вывод об адекватном описании нормативных данных данными, полученными в результате расчета в рамках комбинированной модели.

Выводы. Сеточная модель градирни, используемая в Ansys Fluent, является эффективным инструментом для получения детальной информации о динамике течения воздуха в градирне. Благодаря использованию автоматической генерации сетки и методов адаптивной рефинирования получены результаты, которые могут быть использованы для оптимизации и диагностики состояния градирни.

Результаты расчетов температур охлажденной воды и воздуха, полученные с использованием комбинированной модели, адекватно описывают нормативные данные.

В перспективе предложенная модель и метод расчета позволят оптимизировать режимы работы комбинированных систем водоснабжения, которые совмещают в себе охлаждение воды по прямоточной схеме с охлаждением воды по оборотной схеме с градирнями.

Список литературы

1. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Математические модели и методы расчетов тепло-массообменных и сепарационных процессов в двух-фазных средах. – Казань: ТНТ, 2021. – 288 с.
2. Калатузов В.А. Повышение располагаемой мощности тепловых электростанций с градирнями: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2003. – 113 с.
3. Калатузов В.А., Павлов В.А. Расчет ограничений электрической мощности ТЭЦ, связанных с работой систем циркуляционного водоснабжения // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 18–22.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. Моделирование и расчет процесса тепло-массообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / В.П. Жуков, М.Д. Фоми-чев, В.Н. Виноградов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 3. – С. 57–63.

8. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, М.С. Боброва и др. // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 62–69.

9. Разработка математической модели многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях / К.А. Касаткин, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.Г. Орлов // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 61–67.

10. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепло-массообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

11. Мартыненко О.Г. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

References

1. Laptev, A.G., Basharov, M.M., Lapteva, E.A. *Matematicheskie modeli i metody raschetov teplo-massoobmennyykh 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.
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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. Modelirovanie i raschet protsessa teplo-massoobmena v bashennykh gradirnyakh sistem oborotnogo 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.
8. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Bobrova, M.S., Belyakov, A.N., Shuvalov, S.I. Matrichnyy metod resheniya obratnoy zadachi teploperedachi v teploobmennyykh apparatakh [Matrix method to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 62–69.
9. Kasatkin, K.A., Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Orlov, G.G. *Razrabotka matematicheskoy modeli*

mnogopotochnykh teploobmennyykh apparatov s uchetom fazovogo perekhoda v teplonositelyakh [Development of a mathematical model of multi-current heat exchangers taking into account phase transition in heat carriers]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 61–67.

10. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok*

[System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

11. Martynenko, O.G. *Spravochnik po teploobmennikam v 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers in 2 vol., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 5

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 23.10.2023. Выход в свет 31.10.2023. Формат 60x84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,95. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8