МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.311.22

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

Илья Андреевич Кокулин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ilyakokulin@gmail.com

Владимир Николаевич Виноградов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-08, e-mail: office@ivenser.com

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

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

Постановка и решение обратной задачи диагностики состояния многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания

Авторское резюме

Состояние вопроса. Многоступенчатые испарительные установки мгновенного вскипания широко применяются в энергетике, химической промышленности и ЖКХ. Такое использование многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания во многом связано с их эффективной и экономичной работой. Однако следует отметить, что нарушение режима одной из ступеней может приводить к снижению производительности или ухудшению качества готового дистиллята. Своевременная диагностика и устранение неисправностей является актуальной задачей научных исследований.
Материалы и методы. Решение прямых и обратных задач диагностики многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания выполнено в рамках матричных математических моделей оборудования, построенных на основе балансовых уравнений энергии и массы**.**
Результаты. На основе матричного подхода выполнено моделирование, постановка и решение обратных задач диагностики многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания с учетом капельного уноса перегретой воды и возможного загрязнения поверхностей нагрева ступени. На базе полученных решений разработаны

© Жуков В.П., Кокулин И.А., Виноградов В.Н., Горшенин С.Д., Барочкин Е.В., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 89–94.

рекомендации по устранению обнаруженных дефектов. Предложены алгоритмы диагностики, которые предполагается реализовать в информационном комплексе мониторинга состояния оборудования многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания.
Выводы. Для совершенствования и доведения информационной системы до практического использования необходима организация обмена актуальными данными со штатными измерительными приборами реального энергетического оборудования.

Ключевые слова: многоступенчатые испарительные установки, перегретая вода, мгновенное вскипание, капельный унос, прямая задача, обратная задача

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

Ilya Andreevich Kokulin
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ilyakokulin@gmail.com

Vladimir Nikolaevich Vinogradov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Energy Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-08, e-mail: office@ivenser.com

Sergei Dmitrievich 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

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

Formulation and solution of the inverse problem of diagnostics of the state of multi-stage flash evaporative units

Abstract

Background. Multi-stage flash evaporation units (MSF EUs) are widely used in the power generation, chemical, and housing and utilities sectors. This MSF EUs are widely used due to their efficient and cost-effective operation. However, it should be noted that a malfunction in one of the stages can lead to reduced productivity or deterioration in the quality of the finished distillate. Timely diagnostics and troubleshooting are a pressing research objective.
Materials and methods. The solution of direct and inverse problems of diagnostics of MSF EUs is carried out within the framework of matrix mathematical models of equipment, based on the balance equations of energy and mass.
Results. Based on the matrix approach, modeling, formulation and solution of inverse diagnostic problems of MSF EUs have been carried out, taking into account the droplet entrainment of superheated water and possible contamination of the heating surfaces of the stage. Based on the solutions obtained, recommendations have been developed to eliminate the detected defects. Diagnostic algorithms are proposed, which are supposed to be implemented in the information complex for monitoring the condition of MSF EUs equipment.
Conclusions. To improve and bring the information system to practical use, it is necessary to organize the exchange of current data with standard measuring instruments of real power equipment.

Key words: multi-stage evaporation plants, superheated water, instantaneous boiling, drip entrainment, direct problem, inverse problem

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.089-094

Введение. Широкое использование испарительных установок мгновенного вскипания выявило ряд узких мест, неисправностей и дефектов, которые приводят к нарушению нормального функционирования оборудования [1–5]. Оперативное выявление этих дефектов и неисправностей позволяет своевременно на них реагировать, минимизируя технологические и финансовые потери [6–10]. К указанным дефектам можно отнести загрязнение поверхностей теплообмена в чистом отсеке установки и нарушение температурного режима. Своевременное обнаружение и исправление таких дефектов позволит обеспечить заданное качество дистиллята в заданном количестве, что обусловливает актуальность ранней диагностики состояния оборудования.

Методы исследования. Решение прямых и обратных задач диагностики многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания (МИУМВ) выполняется в рамках матрич-

ных математических моделей оборудования, построенных на основе балансовых уравнений энергии и массы**.** Под прямыми задачами для испарительных установок [11, 12] понимается определение температуры и расхода теплоносителей на выходе МИУМВ по заданным входным параметрам теплоносителей, а под обратными задачами – диагностика возможных неисправностей МИУМВ по известным значениям параметров теплоносителей на входе и выходе системы. Следует отметить, что, в зависимости от набора известных параметров, возможны различные постановки обратных задач МИУМВ.

Результаты исследования. Объектом исследования является многоступенчатая испарительная установка, схема потоков теплоносителей в которой приведена на рис. 1.

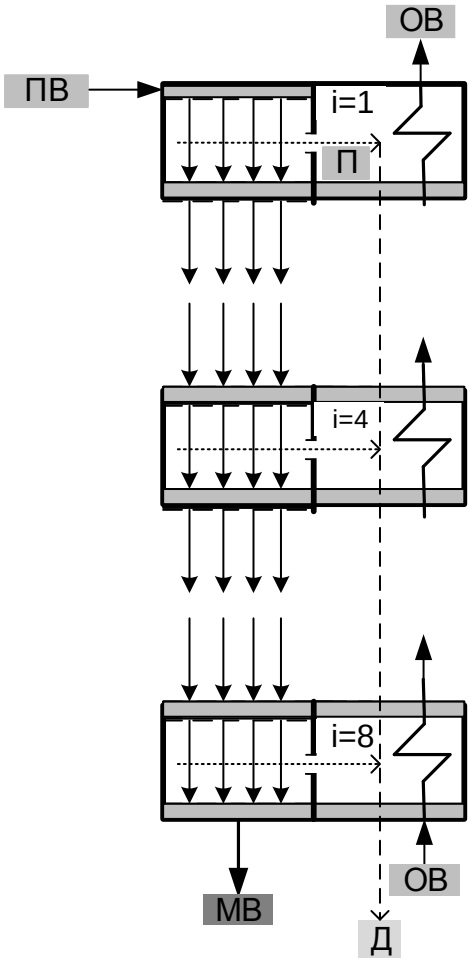


Рис. 1. Схема потоков теплоносителей в многоступенчатой испарительной установке мгновенного вскипания: ПВ – перегретая вода; ОВ – охлаждающая вода; МВ – минерализованная вода; Д – дистиллят; П – пар

Перегретая вода (ПВ) подается в первую ступень, где частично испаряется. Образовавшийся пар (П) переходит в чистый отсек, где за счет теплообмена с охлаждающей водой (ОВ) происходит его конденсация. Полученный при конденсации дистиллят (Д) стекает в нижнюю ступень. Охлаждающая вода, нагреваясь в чистом отсеке за счет теплоты конденсации пара, поступает в следующую верхнюю ступень. В грязном отсеке скапливается минерализованная вода (МВ), обогащенная солями. Между грязным и чистым отсеками часто устанавливается каплеуловитель, предотвращающий капельный унос влаги из грязного отсека.

Целью исследования является постановка и решение обратной задачи диагностики состояния многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания.

Для достижения поставленной цели предлагается решение следующих задач:

1. Постановка обратной задачи диагностики многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания и разработка алгоритма ее решения.

2. Решение обратной задачи диагностики испарительной установки для трех вариантов распознаваемых дефектов на примере конкретной схемы многоступенчатой испарительной установки.

Следует отметить, что дефекты могут быть разные и их симптоматика может существенно различаться, а может быть и очень схожа. Часть диагнозов может быть поставлена при ограниченном числе данных, для других, более сложных дефектов или при их сочетании могут потребоваться дополнительные исследования или дополнительные замеры технологических параметров.

Для решения обратных задач диагностики предлагается следующий алгоритм (рис. 2). Сначала в рамках решения прямой задачи задается и рассчитывается режим работы с выбранным тестовым дефектом, определяются выходные параметры согласно разработанной в [3] математической модели. Задавая входные и выходные технологические параметры на вход модуля решения обратной задачи, определяют искомые тестовые дефекты по минимальному значению целевой функции, вид которой может различаться для каждой решаемой задачи.

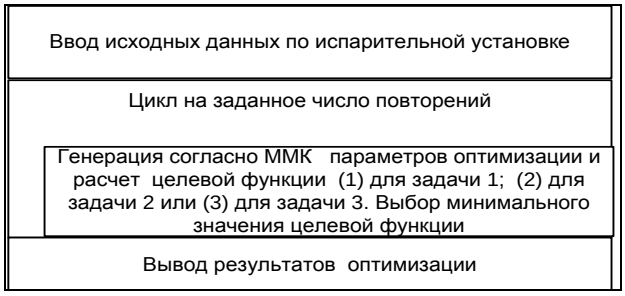


Рис. 2. Алгоритм решения оптимизационной задачи методом Монте–Карло (ММК)

Ниже рассматривается несколько вариантов постановки и решения задач диагностики, начиная с простых и переходя к более сложным дефектам и неисправностям.

Задача 1. Схема анализируемой многоступенчатой испарительной установки представлена на рис. 1. Вертикально расположенные восемь ступеней установки последовательно соединены по дистилляту и охлаждающей воде. Для расчета ее работы в базовом номинальном режиме была разработана математическая модель [3]. В выбранную ступень под номером 4 вносится тестовый дефект – увеличение отложений на поверхности теплообмена в ступени, что приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи в заданное число раз. Принимается, что в качестве измерительных приборов на МИУМВ установлены термометры для определения температуры перегретой и охлаждающей воды на входе в каждую ступень. В ходе решения обратной задачи диагностики нужно установить для выбранной тестовой ступени степень ее загрязнения, которое оценивается уменьшением значения коэффициента теплопередачи k_0. Решение обратной задачи в данном случае сводится к решению одномерной оптимизационной задачи. На первом этапе решения оптимизационной задачи формируется целевая функция оптимизации, которая определяется суммой квадратов отклонений замеренных и рассчитанных значений температуры горячего теплоносителя по всем ступеням установки:

$$F_{C1} = \sum_{i=1}^{8} \left(t_i - \tilde{t}_i \right)^2 \Rightarrow \min_{k_4}, \qquad (1)$$

где $\tilde{t}_i$ соответствует замеренной температуре горячего теплоносителя.

Решение сформулированной оптимизационной задачи выполняется методом Монте–Карло [13]. В ходе решения оптимизационной задачи генерируется случайным образом вектор значений искомых параметров и выполняется расчет целевой функции. Найденное значение целевой функции сравнивается с минимальным. Если найденное значение меньше минимального, то минимальное значение обновляется. Указанная процедура повторяется заданное число раз или до достижения требуемой точности решения. Описанный алгоритм решения оптимизационной задачи методом Монте–Карло представлен на рис. 2.

Полученное решение для рассматриваемого примера приводится на рис. 3 в виде зависимости целевой функции от коэффициента теплопередачи в диагностируемой ступени. Тестовое значение коэффициента теплопередачи, которое нужно было определить, и найденное в ходе решения оптимизационной задачи минимальное значение целевой функции приведены в таблице.

Результаты решения задач 1,2,3

№ задачи	Точное значение	Численное решение	Целевая функция
1	$K = 375$	$K_0 = 374{,}4$	$F_{c1} = 0{,}0001$
2	$K = 375$ $n = 4$	$K_0 = 376{,}1$ $n_0 = 4$	$F_{c2} = 0{,}01$
3	$a = 1661$ $b = -160{,}7$	$a_0 = 1650{,}8$ $b_0 = -163{,}8$	$F_{c3} = 0{,}1$

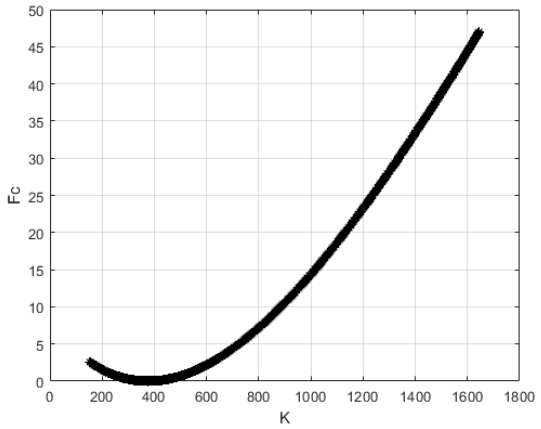


Рис. 3. Решение задачи 1 в виде зависимости целевой функции (1) от параметра оптимизации: определение оптимального значения коэффициента теплопередачи по минимальному значению целевой функции

Задача 2. Более сложный и практически значимый пример соответствует случаю, когда неизвестен номер ступени и степень ее загрязнения. При решении задачи нужно определить два параметра: номер загрязненной ступени n_0 и степень загрязнения k_0. В данном случае вид целевой функции сохраняется, но число параметров оптимизации увеличивается до двух: нужно определить место загрязнения и степень этого загрязнения. Целевая функция при этом записывается в виде

$$F_{C2} = \sum_{i=1}^{8} \left(t_i(k_i) - \tilde{t}_i \right)^2 \Rightarrow \min_{k_i, n}. \qquad (2)$$

Следует отметить, что метод Монте–Карло усложняется при изменении числа параметров оптимизации незначительно. Число генераций вариантов увеличивается, но не становится критическим, как при реализации координатных методов, которые катастрофически усложняются при росте числа параметров оптимизации. К недостаткам метода Монте–Карло можно отнести нахождение для сгенерированных вариантов экстремального значения целевой функции, которое может существенно отличаться от глобального экстремума.

В данной постановке (2) задача имеет два параметра оптимизации, а ее решение наглядно представлено на рис. 4 в виде зависимостей целевой функции от коэффициента теплопередачи для разных ступеней установки. Полученное решение соответствует минимуму целевой функции (рис. 4, кривая 8). Результаты численного решение оптимизационной задачи 2, представленные в таблице, практически совпадают с точным решением.

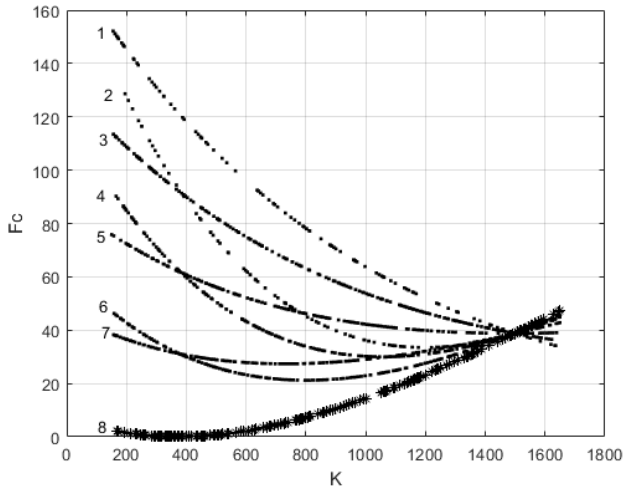


Рис. 4. Зависимость целевой функции от двух параметров оптимизации для решения задачи 2. Определение по минимальному значению целевой функции номера ступени и коэффициента теплопередачи: 1–7 – дефекты в ступнях 1–3 и 5–8; 8 – дефект в ступени 4, которому соответствует минимальное значение целевой функции (2) и найденное решение оптимизационной задачи

Задача 3. Наиболее интересная и практически значимая задача рассматривается в следующей постановке: в общем случае все ступени МИУМВ могут быть загрязнены в разной степени, в этом случае распределение отложений может быть описано функцией, вид которой нужно определить. Данная задача относится к вариационным [14], в ходе решения которых определяется вид функции. В рассматриваемом примере задача решается на классе линейных функций загрязнения ступеней. Решение этой задачи сводится к решению двухпараметрической оптимизационной задачи. В данном случае принимается линейная функция распределения отложений по ступеням вида

$$k_i = a + b * i,$$

где a, b – искомые параметры распределения.

Целевая функция оптимизации для третьей задачи записывается следующим образом:

$$F_{c3} = \sum_{i=1}^{8} \left(t_i(a,b) - \tilde{t}_i \right)^2 \Rightarrow \min_{a,b}. \qquad (3)$$

Решение оптимизационной задачи (3) получено методом Монте–Карло. Заданная и найденная зависимости $k(i)$ приведены на рис. 5. Сравнение этих зависимостей позволяет оценить качество решения вариационной задачи по определению степени загрязнения поверхностей МИУМВ.

В данном случае алгоритм решения обратной задачи следующий: по известным расходам охлаждающей воды и дистиллята и известному распределению температур теплоносителей по ступням определяются квадратичные отклонения точного от диагностируемого распределения температур по ступеням. Практическое совпадение зависимостей для обоих распределений свидетельствует о корректном решении оптимизационной задачи. Численные результаты решения задачи (3) приведены также в таблице.

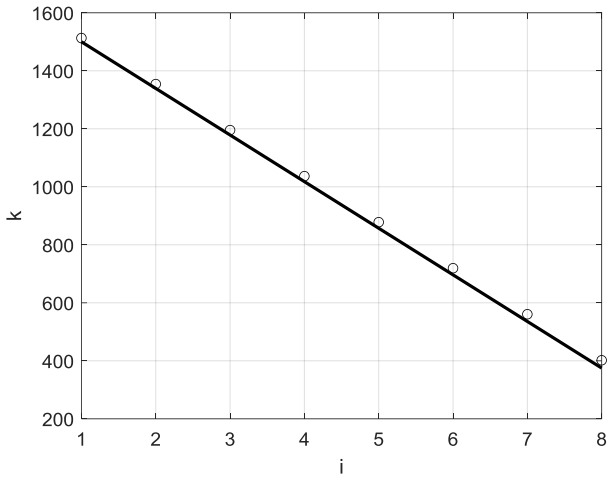


Рис. 5. Точная (линия) и диагностированная (точки) зависимости коэффициента теплопередачи от номера ступени МИУМВ

В ходе дальнейших исследований планируется увеличение числа вариантов задачи диагностики на случай сочетания дефектов загрязнения и возможного капельного уноса перегретой воды.

Выводы. Разработанный алгоритм решения обратной задачи диагностики МИУМВ для трех вариантов распознаваемых дефектов на примере конкретной схемы многоступенчатой испарительной установки позволяет определить место и характер диагностируемых неисправностей.

Более сложные варианты постановки обратной задачи, включающие одновременную диагностику нескольких дефектов, планируются к постановке и решению в ходе дальнейших исследований.

Список литературы

1. **Мошкарин А.В., Мошкарин А.А**. Анализ схем испарительных установок тепловых электростанций. – Иваново, 2007. – 271 с.

2. **Матричная** формализация расчета многоступенчатой испарительной установки мгновенного вскипания / В.П. Жуков, А.В. Мошкарин, Е.В. Барочкин и др. // Состояние и перспективы развития электротехнологии: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (XI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2003. – С. 182.

3. **Simulation** of Droplet Entrainment in Multistage Flash Evaporating Units / V.P. Zhukov, I.A. Kokulin, V.N. Vinogradov, A.E. Barochkin // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70, No. 11. – P. 957–963.

4. **Термообессоливающая** установка Exerger [Электронный ресурс]. – Режим доступа. https://storage.yandexcloud.net/startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf (дата доступа 08.11.2022).

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

6. **Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П.** Тепловые электрические станции. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 466 с.

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

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

9. **Процессы** и аппараты химической технологии: в 5 т. Т. 2 / под ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2000. – 480 с.

10. **Касаткин А.Г.** Основные процессы химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 750 с.

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

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

13. **Гмурман В.Е**. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 1997. – 480 с.

14. **Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д.** Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1967. – 648 с.

References

1. Moshkarin, A.V., Moshkarin, A.A. *Analiz skhem isparitel'nykh ustanovok teplovykh elektrostantsiy* [Analysis of schemes of evaporative installations of thermal power plants]. Ivanovo, 2007. 271 p.

2. Zhukov, V.P., Moshkarin, A.V., Barochkin, E.V., Moshkarin, A.A., Andronov, A.A. Matrichnaya formalizatsiya rascheta mnogostupenchatoy isparitel′noy ustanovki mgnovennogo vskipaniya [Matrix formalization of the calculation of a multi-stage instantaneous boiling evaporation plant]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (XI Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “State and Prospects of Electrotechnology Development” (XI Benardos Readings)]. Ivanovo, 2003, p. 182.

3. Zhukov, V.P., Kokulin, I.A., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E. Simulation of Droplet Entrainment in Multistage Flash Evaporating Units. *Thermal Engineering*, 2023, vol. 70, no. 11, pp. 957–963.

4. *Termoobessolevayushchaya ustanovka Exerger* [Exerger thermal desalination Plant [Electronic Resource]. Available at: https://storage.yandexcloud.net /startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf [accessed 11/08/2022].

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

6. Burov, V.D., Dorokhov, E.V., Elizarov, D.P. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. 466 p.

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

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

9. Kutepov, A.M. (ed.). *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii v 5 t., t. 2* [Processes and devices of chemical technology in 5 vols., vol. 2]. Moscow: Logos, 2000. 480 p.

10. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 1973. 750 p.

11. Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. *Chislennye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow: Izdatel′stvo LKI, 2009. 480 p.

12. Fomichev, M.D., Zhukov, V.P. Raschetnyy analiz vliyaniya neravnomernosti raspredeleniya teplonositeley po secheniyu gradirni na temperaturu okhlazhdennoy vody [Calculation analysis of the influence of uneven distribution of coolants over the cross-section of a cooling tower on the temperature of chilled water]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XXII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “State and Prospects of Electrotechnology Development” (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 392–395.

13. Gmurman, V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1997. 480 p.

14. Zel′dovich, Ya.B., Myshkis, A.D. Elementy prikladnoy matematiki [Elements of Applied Mathematics]. Moscow: Nauka, 1967. 648 p.