

УДК 536.24.08

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 тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, 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

Моделирование капельного уноса и загрязнения дистиллята в многоступенчатых испарительных установках

Авторское резюме

Состояние вопроса. На тепловых и атомных электрических станциях широко используются термические способы подготовки воды, которые имеют ряд экологических и экономических преимуществ. Термические способы часто реализуются в испарительных установках, которые позволяют получать дистиллят при использовании низкопотенциального тепла, что делает эти установки перспективным направлением подготовки воды на тепловых и атомных электрических станциях. Следует отметить, что капельный унос жидкости в испарительных установках существенным образом влияет на качество дистиллята. Молекулярный пар практически не содержит примесей, однако при повышении интенсивности подвода энергии и парообразования возможен унос капель жидкости с паром, что приводит к загрязнению готового продукта. Для выбора эффективных режимов работы и конструктивных параметров испарительной установки разработана математическая модель теплообмена с учетом капельного уноса жидкости приобретает особую актуальность.

Материалы и методы. Для решения задач моделирования теплообменных процессов в многоступенчатых испарительных установках использованы матричные модели, построенные на уравнениях баланса массы и энергии.

Результаты. Предложена матричная модель многоступенчатой испарительной установки, учитывающая капельный унос жидкости при испарении и соответствующее загрязнение примесями готового продукта.

Выводы. Разработанная модель процесса теплообмена позволяет решать прямые и обратные задачи по эффективной организации процессов теплообмена в установках различного назначения, что, в свою очередь, служит основой для постановки и решения задач по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров испарительных установок. Предложенный метод моделирования теплообмена обеспечивает возможность одновременного поиска приемлемых значений конструктивных и режимных параметров многоступенчатых испарительных установок различного назначения.

Ключевые слова: теплообмен, испарительная установка, фазовый переход, многоступенчатый теплообменник, тепловая электрическая станция

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 Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, 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

Modeling of droplet carryover and distillate contamination in multi-stage evaporation units

Abstract

Background. Thermal and nuclear power plants widely use thermal methods of water treatment that have a number of environmental and economic advantages. Thermal methods are often implemented in evaporation units, which allow obtaining pure distillate using low-potential heat. Thus, implementation of these units is a promising trend for water treatment at thermal and nuclear power plants. It should be noted that liquid droplet carryover in evaporation units significantly affects the quality of the distillate. Molecular steam contains virtually no impurities, but with an increase of the intensity of energy supply and active vaporization, liquid droplets can be entrained into the vapor phase. It leads to contamination of the finished product. To select effective operating modes and design parameters of the evaporation unit, the development of a mathematical model of heat and mass transfer considering liquid droplet entrainment is of particular relevance.

Materials and methods. To solve problems of modeling heat and mass transfer processes in multi-stage evaporation units, the authors have used the models that are based on mass and energy balance equations, presented in matrix form.

Results. A matrix model of a multi-stage evaporation unit is proposed, considering the droplet entrainment of liquid during evaporation and the corresponding contamination of the finished product with impurities.

Conclusions. The developed model of the heat and mass transfer process allows us to solve direct and inverse problems on the efficient organization of heat and mass transfer processes in units for various purposes. In turn, it serves as a basis to set and solve problems on the selection of optimal design and operating parameters of evaporation units. The proposed method to solve the problem of heat and mass transfer modeling provides the possibility of simultaneously searching for acceptable values of the design and operating parameters of multi-stage evaporation units for various purposes.

Key words: heat and mass transfer process, evaporation units, phase transition, multi-flow heat exchanger, thermal power plant

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.092-098

Введение. Испарительные установки позволяют получать дистиллят при использовании низкопотенциального тепла, что делает их использование перспективным направлением подготовки воды на ТЭС и АЭС [1–4]. Следует отметить, что требования к очищенной воде существенно образом различаются в зависимости от ее предполагаемого использования. Данные отличия необходимо учитывать при выборе технологии подготовки воды. При использовании для подготовки воды испарительных установок на качество дистиллята существенно образом влияет капельный унос жидкости при ее испарении. Молекулярный пар практически не содержит примесей, которые присутствуют в исходной неочищенной воде. Однако при повышении интенсивности подвода энергии и активном парообразовании возможен унос капель жидкости в паровую фазу. Чем больше размер уносимых капель, тем больше вероятность уноса примесей в чистый продукт. Негативные последствия капельного уноса необходимо учитывать при моделировании и проектировании многосту-

пенчатых испарительных установок (МИУ). Для обеспечения заданного качества дистиллята часто возникает необходимость выбора соответствующей конструкции или режима работы испарительной установки. Для возможности рационального выбора режима и конструктивных параметров МИУ, обеспечивающих требуемое качество добавочной воды, разработка математической модели и метода расчета испарительной установки с учетом капельного уноса жидкости является безусловно актуальной задачей.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используется подход к моделированию многоступенчатой испарительной установки с учетом капельного уноса исходной воды в чистый отсек, построенный на уравнениях баланса массы и энергии, представленных в матричной форме [5–7].

Результаты исследования. Ранее нами была предложена матричная модель многоступенчатой испарительной установки без учета капельного уноса жидкости при испарении [7]. При такой постановке задачи готовый продукт

не содержит примесей и считается чистым дистиллятом. Данная модель позволяет оценить производительность испарительной установки по готовому продукту, но не дает представления о его качестве, что часто лимитирует возможность его дальнейшего использования. Для оценки качества получаемого конденсата предлагается развитие ранее предложенного подхода на случай учета капельного уноса и соответствующего загрязнения примесями готового продукта.

Целью настоящего исследования является повышение эффективности работы испарительной установки за счет разработки и использования математической модели для предотвращения возможного капельного уноса влаги и недопустимого загрязнения примесями готового продукта.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи.

1. Расчет массопотоков перегретой очищаемой воды, пара и дистиллята в многоступенчатой испарительной установке без учета капельного уноса.

2. Определение возможного уноса капель из испаряемой жидкости и распределения капель по размерам при интенсивном подводе тепловой энергии.

3. Расчет процесса сепарации капель по размеру в каплеуловителе, расположенном между чистым и грязным отсеками установки. Определение распределения капель по крупности в потоке, поступающем в чистый отсек.

4. Определение содержания примесей в дистилляте (готовом продукте) по известному распределению капель по размерам и содержанию в них примесей.

5. Постановка и решение задачи повышения эффективности процесса тепломассообмена в испарительных установках в рамках предложенной модели.

Следует заметить, что концентрация примесей в исходном продукте, как правило, составляет около процента¹. Невысокие концентрации примесей позволяют последовательно решать задачи формирования массопотоков, капельного уноса жидкости при испарении, выделения крупных капель в каплеуловителе, определения содержания примесей в готовом продукте.

В ходе решения **первой задачи** исследования определяются расходы воды и пара в чистом и грязном отсеках без учета капельного уноса жидкости. Данная задача с использованием матричного подхода подробно рассмотрена и решена нами ранее [7]. Ниже приводятся основные итоговые формулы с комментариями, необходимыми для понимания построения модели с учетом капельного уноса жидкости.

Принцип работы ступени испарительной установки представлен на рис. 1, где показана схема потоков теплоносителей (а) и расчетная схема (б), которая используется при описании загрязнения дистиллята при капельном уносе жидкости.

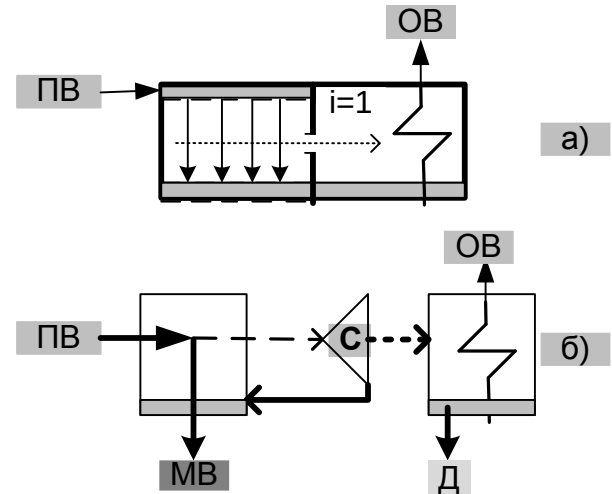


Рис. 1. Схема потоков теплоносителей в ступени испарительной установки (а) и расчетная схема каплеуловителя, размещенного между грязным и чистым отсеками (б): ПВ – перегретая вода; ОВ – охлаждающая вода; МВ – минерализованная вода; Д – дистиллят; С – сепаратор капель или каплеуловитель

Каждая ступень испарительной установки состоит из двух отсеков: грязного и чистого. Перегретая вода (ПВ) сначала поступает в грязный отсек, где она частично испаряется. Образовавшийся при этом пар направляется через сепаратор капель (С) в чистый отсек ступени для конденсации, которая реализуется за счет теплообмена с охлаждающей водой (ОВ). Неиспарившаяся минерализованная вода (МВ) из грязного отсека направляется в следующую ступень с пониженным давлением, где процесс повторяется. Образовавшийся в чистом отсеке дистиллят (Д) стекает вниз и попадает в следующую по ходу его движения ступень.

Общая модель процесса тепломассообмена в двух отсеках ступени при условии конденсации пара в чистом отсеке записывается [7] в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} 0 & a_3 & -a_3 & 0 & a_5 \\ 0 & 1-a_4 & a_4 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -r/c \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_{1n} \\ t_{20} \\ t_2 \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

или

$$\mathbf{B}\mathbf{X} = \tilde{\mathbf{X}},$$

¹ РД 34.40.506-85. Методические указания по эксплуатации испарительных установок поверхностного типа тепловых электростанций: разраб. Урал ВТИ.

где

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & a_3 & -a_3 & 0 & a_5 \\ 0 & 1-a_4 & a_4 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -r/c \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \mathbf{X} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_{1n} \\ t_{20} \\ t_2 \\ x \end{pmatrix}; \tilde{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix};$$

$$a_1 = k/r/G_{1p}; a_2 = k/c/G_2; a_3 = (\exp(-a_2 F) - 1)/a_2;$$

$a_4 = \exp(-a_2 F); a_5 = r * G_1/k; t_1$ – температура перегретой воды; t_{1n} – температура насыщения при давлении в ступени; c – удельная теплоемкость; r – удельная теплота парообразования; G_{1p} – расход пара, образовавшегося в грязном отсеке; G_1 – расход перегретой воды на входе в грязный отсек; x – степень сухости пара; F – площадь поверхности теплообмена; k – коэффициент теплопередачи; G – расход теплоносителя; индекс 1 относится к перегретой воде и пару, 2 – к охлаждающей воде. Буквенное обозначение с волной соответствует известному численному значению соответствующего параметра.

Система линейных уравнений (1) относительно пяти неизвестных дополняется двумя замыкающими соотношениями, с помощью которых можно задать численные значения двух любых параметров.

На практике для повышения эффективности использования тепловой энергии и повышения производительности применяются многоступенчатые испарительные установки. В многоступенчатой установке перегретая вода подается в верхнюю ступень и частично испаряется. Образовавшийся пар направляется в чистый отсек для конденсации, а обогащенная примесями вода (МВ) направляется в нижний отсек с более низким давлением. В следующей ступени аналогично происходит мгновенное вскипание воды с образованием пара, который направляется для конденсации в свой чистый отсек. Дистиллят стекает в нижнюю ступень, а из самой нижней ступени удаляется из установки.

Для описания n -ступенчатой установки записывается система из $5n$ уравнений, из которых $3n$ уравнений заданы в явном виде аналогично (1). Еще $2(n-1)$ уравнения для внутренних потоков теплоносителей формируются согласно условию равенства значения параметра на выходе ступени значению параметра на входе в следующую по ходу движения теплоносителя ступень. Еще два уравнения задают значения для двух известных параметров внешних потоков. Таким образом, число неизвестных ($5*n$) равно числу уравнений в системе ($3*n + 2*(n-1) + 2 = 5*n$) и описание многоступенчатой установки становится замкнутым. В блочном матричном виде данная система записывается следующим образом [7]:

$$\begin{pmatrix} B_1 & R & O & O & O & O & \dots & O \\ D & B_2 & R & O & O & O & \dots & O \\ O & D & B_3 & R & O & O & \dots & O \\ O & O & D & B_4 & R & O & \dots & O \\ O & O & O & D & B_5 & R & \dots & O \\ O & O & O & O & D & B_6 & \dots & O \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ O & O & O & O & O & O & D & B_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \\ \mathbf{X}_4 \\ \mathbf{X}_5 \\ \mathbf{X}_6 \\ \dots \\ \mathbf{X}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_1 \\ \tilde{\mathbf{X}}_2 \\ \tilde{\mathbf{X}}_3 \\ \tilde{\mathbf{X}}_4 \\ \tilde{\mathbf{X}}_5 \\ \tilde{\mathbf{X}}_6 \\ \dots \\ \tilde{\mathbf{X}}_n \end{pmatrix}$$

или

$$\mathbf{KX} = \tilde{\mathbf{X}}, \quad (2)$$

где $\mathbf{B}_i$ – матрица тепломассообмена в i -й ступени; $\mathbf{R}$ – матрица коммутации между ступенями по охлаждающей воде; $\mathbf{D}$ – матрица коммутации между ступенями по перегретой воде; $\mathbf{O}$ – нулевая матрица; $\mathbf{K}$ – матрица процесса тепломассообмена в многоступенчатой установке размера $n \times n$ блоков или $5n \times 5n$ элементов; $\mathbf{X}$ – вектор искомых параметров процесса тепломассообмена в установке размера $n \times 1$ блоков или $5n \times 1$ элементов; $\tilde{\mathbf{X}}$ – вектор известных параметров внешних потоков в установку размера $n \times 1$ блоков или $5n \times 1$ элементов.

Уравнение модели (2) представляет собой систему из $5n$ линейных уравнений, решение которой позволяет определить соответственно $5n$ искомых величин.

В ходе решения **второй задачи** определяется распределение капель по размерам при их уносе из испаряемой жидкости. Распределение капель по размеру описывается через распределение числа молекул в капле при данном подводе энергии к анализируемой порции жидкости [8]. При реализации реального процесса подвод энергии возможен к порции жидкости от минимального размера, при котором вся вода переходит в идеальный молекулярный пар, до размера всей выделенной порции материала равномерно. В соответствии с интенсивностью энергоподвода к жидкости могут быть реализованы различные распределения капель по размерам [8].

В ходе решения второй задачи исследования определяется плотность распределения капель по размерам в выделенной порции пароводяной смеси грязного отсека $f(i)$, где i – размер капли. Интенсивность энергоподвода характеризуется при этом параметром K , а максимальный размер капли в анализируемой порции N . Выбор этих параметров осуществляется на основании следующих соображений. С одной стороны, максимальный размер капель в анализируемой порции N должен содержать необходимое для статистической достоверности количество фрагментов, с другой стороны, для возможности проведения расчетного анализа этот параметр не должен быть очень большим. Энергоподвод к порции

определяется параметром K , который показывает число разорванных межмолекулярных связей. Этот параметр должен быть существенно меньше N , в противном случае при их равенстве $N = K$ вся вода превращается в пар.

Для нахождения распределения капель по размерам предполагается, что капля состоит из неразрушимых элементов, в качестве которых могут рассматриваться молекулы (или их агрегаты). Энергия связи между всеми элементами считается одинаковой. Также предполагается, что каждый элемент имеет не более двух связей. Естественно, что следующий шаг идеализации – размещение всех элементов в линию. Таким образом, мы получаем одномерную структуру как условную модель реальной капли: число элементов (целое число) соответствует условному размеру капель. Также логично представить подводимую энергию как количество связей, которые могут быть разрушены, – тоже целое число. Таким образом, условная капля подготовлена к применению основных соотношений комбинаторики. Молекулы в единичной порции жидкой фазы связаны друг с другом, и для их полного разделения необходимо затратить энергию, которая называется удельной теплотой парообразования [7]. Принимая, что на каждый элемент приходится одинаковая энергия связи, определим ее через отношение удельной энергии парообразования к числу таких элементов в единичной порции. Другими словами, удельная энергия связи, приходящаяся на одну молекулу, находится как удельная теплота парообразования, деленная на число связей, которые необходимо разорвать для превращения всей воды в пар:

$$e = \frac{r * \mu}{N_a * 1000},$$

где $N_a = 6,022e23$ – число Авогадро, 1/моль; μ – молекулярная масса воды, г/моль; e – энергия, необходимая на испарение одной молекулы воды, Дж; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Если агрегат молекул или капля содержат одну и более неразорванных межмолекулярных связей, то величина энергии, необходимая для образования этого агрегата, уменьшается на число неразорванных связей.

Для вывода основных уравнений модели используется комбинаторная формула, которая позволяет рассчитать искомое распределение капель по размерам [8]:

$$f_i = \frac{(N-i-1)!(N-K-1)!}{(N-i-K)!N!} i^K (K+1), \quad (3)$$

где N – число элементов; K – число единиц разорванных связей (число единиц подведенной энергии); i – размер образовавшегося агрегата (капли); f_1 – массовая доля агрегатов (капель), состоящих из i элементов.

Следует отметить, что вычисление факториалов для больших чисел согласно (3) является ресурсоемкой процедурой, поэтому для выполнения практических расчетов разработан специальный алгоритм. Сначала формула (3) переписывается для капель единичного размера ($i = 1$) в виде

$$f_1 = \frac{K * (K+1)}{N * (N-1)}. \quad (4)$$

Затем, зная долю капель единичного размера при $i = 1$, находим долю капель размера $(i + 1)$ и аналогично все остальные значения распределения (f_{i+1}) по рекуррентной формуле

$$f_{i+1} = \frac{f_i * i * (N-K-i+1)}{(i-1) * (N-i)}. \quad (5)$$

На образование фрагментов, у которых разорваны не все связи между молекулами, требуется меньше энергии по сравнению с испарением до состояния сухого насыщенного пара, при котором разорваны все связи. При этом для образования фрагментов размера i с учетом неразорванных связей требуется подвести энергии меньше, т. е. e/i . Энергия, затраченная на образование ансамбля капель с известным распределением капель по размерам, рассчитывается по формуле

$$E_r = \sum_i \frac{f_i * e}{i}. \quad (6)$$

При идеальном испарении получается пар, состоящий из отдельных молекул, и область жидкой фазы. В реальном процессе при наличии между молекулами в капле неразорванных связей в паровой фазе могут находиться агрегаты из двух и более молекул. Согласно теории образования фаз [9], возникновение жидкой фазы в гомогенной (однородной) атмосфере пара осуществляется путем образования и распада временных агрегатов из двух или более молекул.

После нахождения распределения капель по размерам $f(i)$ согласно (5) решается **третья задача**: описание процесса классификации или сепарации капель по крупности в каплеуловителе, расположение которого в МИУ показано на рис. 1,б. При сепарации крупные капли возвращаются в грязный, а мелкие переходят в чистый отсек. Соответственно, примеси, содержащиеся в мелких каплях, тоже попадают в чистый отсек и загрязняют дистиллят.

Отделение от пара капель разного размера в каплеуловителе может быть выполнено конструктивно различным образом [4]. Следует отметить, что чем мельче отделяемые капли, тем, как правило, больше гидравлическое сопротивление этих устройств и тем меньше производительность испарителей по дистилляту. С другой стороны, уменьшение размера пропускаемых капель позволяет получить более чистый дистиллят. Следовательно, для каждой конкретной задачи и для каждого конкретного режима

работы существует оптимальная крупность пропускаемых капель с точки зрения максимальной производительности при соблюдении требований к готовому продукту.

Для моделирования каплеуловителя предлагается использовать кривую разделения каплеуловителя $\varphi(i)$, каждое значение которой показывает вероятность попадания в чистый отсек капель размера i . Для аппроксимации кривой разделения используется известная из литературы [10–12] S-образная кривая вида

$$\varphi_i = \frac{1}{1 + (i/i_{гр})^{k_s}}, \quad (7)$$

где $i_{гр}$ – граничный размер капель, для которого вероятность попадания в чистый отсек равна 0,5; k_s – параметр эффективности разделения.

Распределение по размерам капель, поступающих после каплеуловителя в чистый отсек f_{3i} , определяется, согласно [10], выражением

$$f_{3i} = f_{1i} \varphi_i / \bar{\varphi}, \quad (8)$$

где

$$\bar{\varphi} = \sum f_{1i} \varphi_i; \quad (9)$$

f_{1i} – распределение капель по размерам в грязном отсеке (5); $\bar{\varphi}$ – полный вынос или массовая доля капель, перешедших в чистый отсек.

Зная распределение капель по размерам в грязном отсеке (5), можно определить по (8)–(9) распределение капель по размерам в чистом отсеке.

Анализ загрязнения дистиллята примесями за счет капельного уноса выполняется в рамках решения **четвертой задачи** исследования. Исходными данными для решения этой задачи является вид распределения примесей по каплям разного размера, который зависит от конкретной очищаемой жидкости и структуры примесей. Для его определения используются справочные данные или результаты специальных экспериментальных исследований. Очевидно, что отдельные молекулы пара или чистый пар не содержат примесей. В первом приближении при построении модели будем считать, что распределение примесей по каплям разного размера линейное: при нулевом размере капель концентрация примесей равна нулю, а при критическом размере капель ($i_{кр}$) концентрация примесей в капле равна концентрации примесей в грязном отсеке ступени c_g :

$$c(i) = \begin{cases} c_g * i / i_{кр}, & i \leq i_{кр}, \\ c_g, & i > i_{кр}. \end{cases}$$

Зная содержание примесей в капле и granulометрический состав капель, можно определить содержание примесей после ступени в дистилляте по следующей формуле:

$$c_{dj} = \sum_i c(i) f_3(i), \quad (10)$$

где j – номер ступени.

Содержание примесей на выходе из многоступенчатой испарительной установки c_d находится согласно выражению

$$c_d = \frac{\sum c_{dj} G_{3j}}{\sum G_{3j}}, \quad (11)$$

где G_{3j} – производительность по дистилляту j -й ступени.

Представленная модель очистки воды в многоступенчатой испарительной установке (1)–(11) позволяет решать как прямые, так и обратные задачи проектирования и оптимизации испарительных установок.

В качестве демонстрации возможностей разработанной модели рассматривается **пятая задача** определения солесодержания готового продукта при различных температурах охлаждающей воды на входе в МИУ. Исходные данные для решения задачи следующие: расход и температура перегретой воды $G_1 = 502$ т/ч и $t_1 = 101$ °C; расход охлаждающей воды $G_2 = 502$ т/ч. Результаты расчетного анализа приведены на рис. 2 в виде зависимости содержания примесей в дистилляте от температуры охлаждающей воды. Указанная зависимость без установки каплеуловителя показана пунктирной линией, аналогичная зависимость при наличии каплеуловителя между грязным и чистым отсеками – сплошной линией.

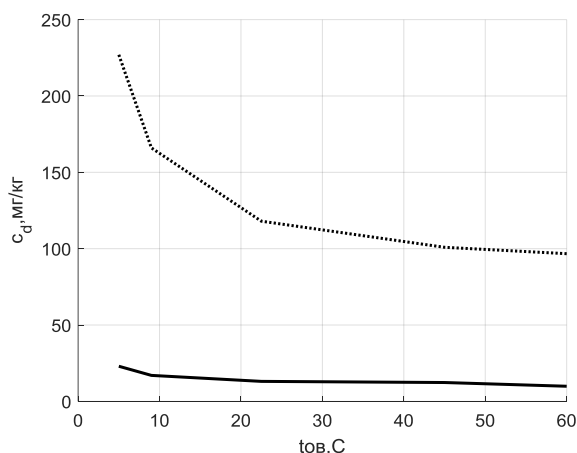


Рис. 2. Зависимость содержания примесей в дистилляте от температуры охлаждающей воды на входе в МИУ ($t_{ов}$) без установки (пунктирная линия) и с установкой (сплошная линия) каплеуловителей в ступени

Расчетный анализ показал, что повышение температуры с 5 до 60 °C существенно уменьшает солесодержание дистиллята на выходе без установки каплеуловителя с 227 до 97 мг/кг, а с установкой каплеуловителя – с 23 до 9,9 мг/кг, что совпадает с опубликованными данными [3, 8] и подтверждает достоверность предложенной модели.

Анализ представленных результатов показывает, что наличие каплеуловителя существенным образом уменьшает содержание в готовом продукте. Данные результаты хорошо согласуются с известными опубликованными данными, что позволяет использовать представленный подход для практического применения.

Выводы. Разработанная модель процесса тепломассообмена применительно к многоступенчатым испарительным установкам мгновенного вскипания позволяет формулировать и решать задачи по эффективной организации процессов тепломассообмена в МИУ различного назначения, что служит, в свою очередь, основой для постановки и решения задач по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров водоподготовительных установок с МИУ.

Список литературы

1. Назмиев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
2. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1: пер. с англ. / под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
3. Мошкарин А.В., Мошкарин А.А. Анализ схем испарительных установок тепловых электростанций. – Иваново, 2007. – 271 с.
4. Термообессолевающая установка Exerger [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://storage.yandexcloud.net/startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf> [дата доступа 08.11.2022].
5. 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.
6. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
7. Жуков В.П., Кокулин И.А., Виноградов В.Н. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в многоступенчатых многопоточных испарителях мгновенного вскипания // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 1. – С. 71–78.
8. Simulation of Droplet Entrainment in Multi-stage 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.
9. Физика облаков / под ред. А.Х. Хргиана. – Л.: ГИМИЗ, 1961. – 459 с.
10. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г., Барочкин Е.В. Аэродинамическая классификация порошков. – Иваново, 2014. – 260 с.
11. Процессы и аппараты химической технологии. В 5 т. Т. 2 / под ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2000. – 480 с.
12. Касаткин А.Г. Основные процессы химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 750 с.

References

1. Nazmiev, Yu.G., Lavygin, V.M. *Teploobmennyye apparaty TES* [Heat exchangers of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 288 p.
2. 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.
3. Moshkarin, A.V., Moshkarin, A.A. *Analiz skhem isparitel'nykh ustanovok teplovykh elektrostantsiy* [Analysis of schemes of evaporation plants of thermal power plants]. Ivanovo, 2007. 271 p.
4. *Termoobessoleyayushchaya ustanovka Exerger*. Available at: <https://storage.yandexcloud.net/startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf> [data dostupa 08.11.2022].
5. 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 evaporative installation of instantaneous boiling]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XI Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of international scientific and technical conference "Current state and trends of the development of electrotechnics (XI Benardos Readings)]. Ivanovo, 2003, p. 182.
6. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
7. Zhukov, V.P., Kokulin, I.A., Vinogradov, V.N. *Modelirovaniye i raschet protsessa teplomassoobmena v mnogostupenchatykh mnogopotoknykh isparitelyakh mgnovennogo vskipaniya* [Modeling and calculation of the heat and mass transfer process in multi-stage multi-flow flash boiling evaporators]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 1, pp. 71–78.
8. 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.
9. Khrgian, A.Kh. (red.) *Fizika oblakov* [Physics of clouds]. Leningrad: GIMIZ, 1961. 459 p.
10. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G., Barochkin, E.V. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic classification of powders]. Ivanovo, 2014. 260 p.
11. Kutepov, A.M. (red.) *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. V 5 t., t. 2* [Processes and apparatuses of chemical technology. In 5 vols., vol. 2]. Moscow: Logos, 2000. 480 p.
12. Kasatkin, A.G. *Osnovnyye protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 1973. 750 p.