

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ КАПЕЛЬНОГО УНОСА В МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ МГНОВЕННОГО ВСКИПАНИЯ

© 2023 г. В. П. Жуков<sup>а</sup>, \*, И. А. Кокулин<sup>а</sup>, В. Н. Виноградов<sup>а</sup>, А. Е. Барочкин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Ивановский государственный энергетический университет, Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003 Россия

\*e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.05.2023 г.

После доработки 29.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Испарительные установки широко используются в промышленных технологиях для получения термически очищенного дистиллята в процессе парообразования с концентрированием примесей в объеме воды. Многоступенчатые испарительные установки мгновенного вскипания (МИУ МВ) по тепловой эффективности относятся к одному из наиболее перспективных видов испарительного оборудования, в котором затраты тепловой энергии на испарение воды в каждой ступени компенсируются использованием этой энергии для нагрева очищаемой воды при конденсации полученного пара. Совершенствование методов проектирования и эксплуатации этих установок на базе математических моделей теплообменных процессов является актуальной задачей, стоящей перед разработчиками и проектировщиками испарительного оборудования. В рамках проведенных исследований предложена комбинаторная модель распределения капель перегретой воды по размерам при испарении в зоне пониженного давления грязного отсека МИУ МВ. Разработана математическая модель сепаратора капель, предназначенного для предотвращения капельного уноса влаги и попадания примесей в дистиллят. Рассчитаны потоки дистиллята и очищаемой воды и содержание примесей в этих потоках для каждой ступени испарительной установки с учетом капельного уноса влаги из грязного отсека. Выполнена оценка влияния капельного уноса в многоступенчатых испарительных установках на качество дистиллята. Предложен подход к проектированию многоступенчатых испарительных установок, позволяющий обеспечить заданные технологические показатели при различных режимах работы многоступенчатого испарителя. Данный подход может быть использован также при построении режимных карт оборудования, проведении мероприятий по повышению эффективности его работы и разработке систем диагностики состояния поверхностей нагрева испарительных установок.

*Ключевые слова:* испарительные установки, капельный унос, теплообмен, комбинаторная модель, матричная модель, сепарация влаги, концентрация примесей, минерализованная вода

**DOI:** 10.56304/S0040363623110140

Многоступенчатая испарительная установка мгновенного вскипания отличается от испарительных установок других типов более высокими показателями эффективности процесса теплообмена [1–3]. Затраты тепловой энергии на испарение воды в одной ступени многоступенчатой испарительной установки частично компенсируются использованием этой энергии для нагрева очищаемой воды при конденсации полученного пара. Суммарные затраты энергии, безвозвратно теряемые при такой организации процесса, по оценкам специалистов существенно меньше, чем в испарительных установках других типов. Дополнительную экономию тепловой энергии можно получить при эффективном включении испарителей в тепловые схемы электрических станций [2, 3]. Следует отметить, что в

существующих моделях и методах расчета испарительных установок [4–8] не учитывается влияние капельного уноса влаги на качество дистиллята, что существенным образом снижает прогностическую ценность моделей. Актуальность исследований, направленных на совершенствование проектирования и эксплуатации таких установок, обусловлена широким применением многоступенчатых испарительных систем в энергетике и смежных отраслях промышленности.

Целью исследования является разработка моделей и подходов к совершенствованию технологии очистки воды в многоступенчатых испарительных установках мгновенного вскипания. Это исследование выполнено с использованием математической модели, учитывающей капельный унос влаги при испарении.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для постановки и решения задач проектирования испарительных установок используются комбинаторные [9] и матричные [10] подходы к моделированию теплообменных процессов, основанные на уравнениях тепловых и материальных балансов.

На рис. 1 представлена схема потоков теплоносителей в первой ступени испарительной установки мгновенного вскипания. В каждой ступени установки имеются чистый и грязный отсеки. Попадание перегретой воды в грязный отсек ступени с пониженным давлением приводит к ее мгновенному вскипанию, которое сопровождается интенсивным парообразованием. Вместе с паром в чистый отсек ступени могут уноситься капли влаги. При капельном уносе влаги происходит переход в пар примесей, содержащихся в этих каплях, из грязного отсека в чистый, что приводит к загрязнению и снижению качества дистиллята. Следует отметить, что чем больше перегрев воды относительно температуры насыщения, тем выше вероятность капельного уноса.

Предложенная ранее модель ступени испарительной установки [11] не учитывает капельный унос влаги с паром, а сепаратор капель, установленный между грязным и чистым отсеками, считается идеальным, т.е. в нем улавливаются все капли любого размера. Очевидно, что учет капельного уноса в разрабатываемой модели существенным образом повышает ее прогностическую ценность. В предлагаемой статье представлена

модель установки, учитывающая возможный капельный унос влаги и переход примесей из грязного отсека в чистый.

*Построение модели*

При построении модели принято, что в грязный отсек ступени поступает предназначенная для очистки перегретая вода с температурой выше температуры насыщения в ступени. Попадая в область пониженного давления, она вскипает и частично переходит в пар. Согласно тепловому балансу, для грязного отсека произведение перегрева, теплоемкости и расхода воды равно произведению расхода образовавшегося пара и теплоты парообразования:

$$(t_1 - t_{1s}) c G_1 = r G_{1p}, \tag{1}$$

где  $t_1$  – температура перегретой воды, °С;  $t_{1s}$  – температура насыщения при давлении в ступени, °С;  $c$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг · К);  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $G_{1p}$  – расход пара, образовавшегося в грязном отсеке, кг/с;  $G_1$  – расход перегретой воды на входе в грязный отсек, кг/с.

Из теплового баланса (1) определяется доля образовавшегося пара от расхода перегретой воды:

$$\alpha = G_{1p} / G_1 = (t_1 - t_{1s}) c / r. \tag{2}$$

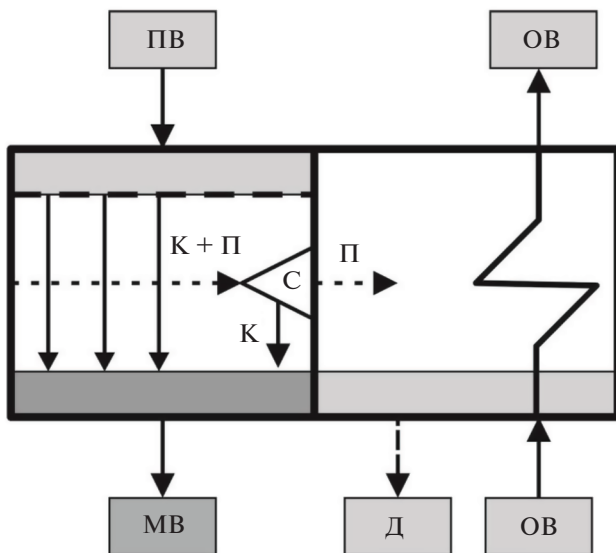
Разработка модели МИУ МВ с учетом уноса капель при испарении выполняется в несколько этапов:

на первом этапе с использованием комбинаторного подхода определяется распределение капель по размерам в зоне испарения грязного отсека;

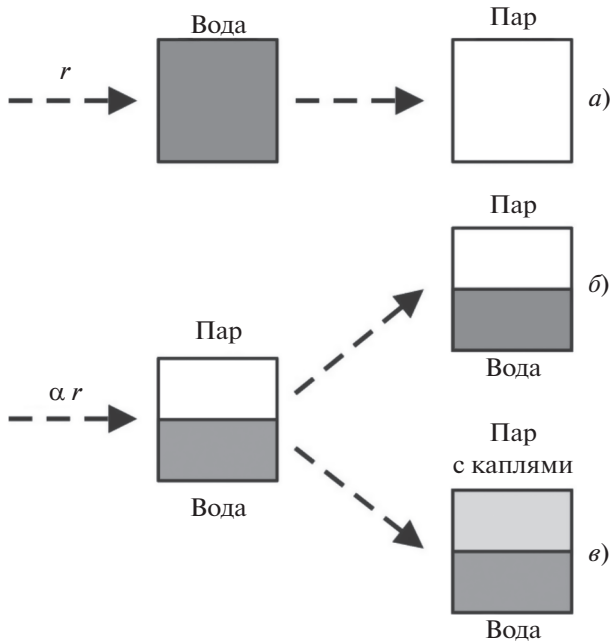
на втором этапе в рамках известного подхода к расчету сепараторов [12] с вероятностью выноса капель в чистый отсек предлагается модель сепаратора, которая позволяет установить долю улавливаемых в нем капель. Считая концентрацию примесей в жидкой фазе, находящейся в ступени испарительной установки, постоянной, зная эффективность улавливания капель и количество содержащихся в них примесей, можно вычислить общее содержание примесей в чистом отсеке;

на третьем этапе, решая уравнения теплопереноса, можно рассчитать потоки дистиллята и перегретой воды для каждой ступени многоступенчатой испарительной установки [11], затем вычислить содержание примесей в этих потоках.

Алгоритм построения модели распределения капель представлен на рис. 2. На этом рисунке показаны три возможных варианта испарения единичной порции жидкости. При подведении к одной ступени энергии, равной удельной теплоте парообразования  $r$ , достаточной для полного испарения единичной порции, вся жидкость переходит в пар, состоящий из отдельных молекул.



**Рис. 1.** Схема потоков теплоносителей в ступени испарительной установки.  
 ПВ – перегретая вода; ОВ – охлаждающая вода; МВ – минерализованная вода; Д – дистиллят; П – пар; К – капли влаги; С – сепаратор капель



**Рис. 2.** Расчетная схема определения распределения капель влаги по размерам.  
 а – идеальное испарение всей воды; б – идеальное испарение части воды; в – реальное испарение части воды

Этот случай показан на рис. 2, а и соответствует полному испарению всей влаги. При подводе меньшего количества энергии испаряется только часть воды, которая определяется по выражению (2). При этом считается, что пар также состоит из отдельных молекул и по своим параметрам близок к сухому насыщенному пару (см. рис. 2, б). При быстром вскипании перегретой воды, которое происходит в испарителях мгновенного вскипания, в паровое пространство могут выноситься капли воды (или агрегаты молекул) разного размера (см. рис. 2, в). Знание размеров этих агрегатов имеет принципиальное значение для правильного проектирования и эксплуатации сепараторов капель, которые устанавливают между чистым и грязным отсеками ступени.

Чтобы определить распределение капель по размерам, полагают, что капля состоит из неразрушаемых элементов – молекул. Принимают, что энергия связи между всеми элементами одинакова и каждая молекула имеет не более чем две связи. Естественно, что следующий шаг идеализации – размещение всех элементов в линию. Таким образом получается одномерная структура – условная модель реальной капли. Переход на более сложные плоские или объемные структуры на данном этапе исследований не рассматривается, так как модель, примененная для таких структур, становится непригодной для получения результатов из-за сложности вычислений и большого объема требу-

емых машинных ресурсов. Число элементов (целое число) соответствует условному размеру капли. Подводимая энергия представляется как количество связей, которые могут быть разрушены, – тоже целое число. Итак, условная капля подготовлена к применению основных соотношений комбинаторики. Молекулы в единичной порции жидкой фазы связаны одна с другой, и для их полного разделения необходимо затратить энергию, которая называется удельной теплотой парообразования [4]. Принимая, что на каждый из элементов приходится одинаковая энергия связи, ее можно определить через отношение удельной энергии парообразования к числу таких элементов в единичной порции. Другими словами, удельная энергия связи  $e$ , Дж, приходящаяся на одну молекулу, находится как удельная теплота парообразования, деленная на число связей, которые необходимо разорвать для превращения всей воды в пар:

$$e = \frac{r\mu}{N_A \times 10^3},$$

где  $N_A = 6.022 \times 10^{23}$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;  $\mu$  – молекулярная масса воды, г/моль.

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

Для вывода основных уравнений модели используется комбинаторная формула, полученная авторами ранее в [9] для описания аналогичной задачи целочисленного разрушения частиц при измельчении. Если предположить, что система состоит из  $N$  элементов и содержит  $N - 1$  межэлементных связей, то после подвода  $K$  единиц энергии анализируемая система будет разделена на  $K + 1$  элементов. В силу указанной аналогии между процессами разрушения частиц и испарения (дефрагментации) капель полученное ранее в [9] комбинаторное выражение позволяет рассчитать искомое распределение капель по размерам:

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

где  $f_i$  – массовая доля агрегатов (капель), состоящих из  $i$  неразрушаемых элементов, при подведении к исходному агрегату  $K$  единиц энергии;  $i$  – число неразрушаемых элементов (молекул), которое определяет размер капель.

Следует отметить, что вычисление факториалов для больших чисел согласно (3) является ресурсоемкой процедурой, поэтому для выполнения практических расчетов разработан следующий алгоритм.

Сначала формулу (3) записывают в виде, позволяющем определить долю капель единичного размера ( $i = 1$ ):

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

Затем, зная долю капель единичного размера, находят долю капель размера отличного от единицы ( $i + 1$ ) и аналогично все остальные значения распределения  $f_{i+1}$  по рекуррентной формуле, используя ранее найденное значение  $f_i$ :

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

Численный пример расчета распределения капель по размерам выполнен для следующих исходных данных:

Число элементов в порции $N$ .....	10000
Число разорванных связей $K$ .....	300, 600, 900
Удельная теплота парообразования $r$ , кДж/кг.....	2260

Указанные числа разорванных связей соответствуют доле образовавшегося пара  $\alpha = 0.03, 0.06, 0.09$ , состоящего из отдельных молекул согласно схеме, изображенной на рис. 2, б. При образовании агрегатов из нескольких молекул воды, согласно расчетной схеме, приведенной на рис. 2, в, и формулам (4), (5), определяется распределение капель по размерам, после чего находится энергия, подведенная к испаряемой жидкости с учетом содержания в паровом объеме капель разного размера. 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 элементов размером  $i$  с учетом неразорванных связей требуется подвести энергии меньше числа неразорванных связей, т.е.  $e/i$ . Энергия, затраченная на образование ансамбля капель с известным распределением капель по размерам, вычисляется по формуле

$$E_r = \sum_i \frac{f_i e}{i}.$$

При идеальном испарении согласно схеме, показанной на рис. 2, б, после испарения получаются пар, состоящий из отдельных молекул, и область жидкой фазы, в которой все молекулы образуют один элемент или каплю. При реальном процессе испарения при наличии между молекулами в капле неразорванных связей в паровой фазе могут находиться агрегаты из двух и более молекул. Согласно теории образования фаз (развитой, в частности, Фольмером [13]), возникновение жидкой фазы в го-

могенной (однородной) атмосфере пара осуществляется путем флуктуаций, при которых возникают временные агрегаты из двух или более молекул. Однако при сцеплении молекул высвобождается тепло, выделившееся при конденсации, и вследствие перегрева капель большинство агрегатов вновь разрушаются. Устойчивыми могут оказаться лишь достаточно крупные агрегаты, состоящие из большого числа молекул, которые при данных условиях находятся в равновесии со средой. Можно считать, что эта метастабильность связана с необходимостью затрачивать энергию на образование зародыша новой фазы. Следует отметить, что полученные в соответствии с (3) распределения агрегатов описывают систему, которая находится в метастабильном состоянии, при котором общее число разорванных связей в рассматриваемой порции остается постоянным согласно закону сохранения энергии, который автоматически выполняется в представленной модели.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов расчета распределения капель воды по размерам при разных энергиях перегрева (рис. 3) свидетельствует о том, что с ростом подведенной энергии на испарение в рассмотренном диапазоне значений параметров средний размер капель уменьшается.

Результаты расчета распределения капель по размерам при варьировании подведенной энергии на испарение в более широком диапазоне: от нулевого значения (испарения не происходит) до энергии полного испарения порции (до-

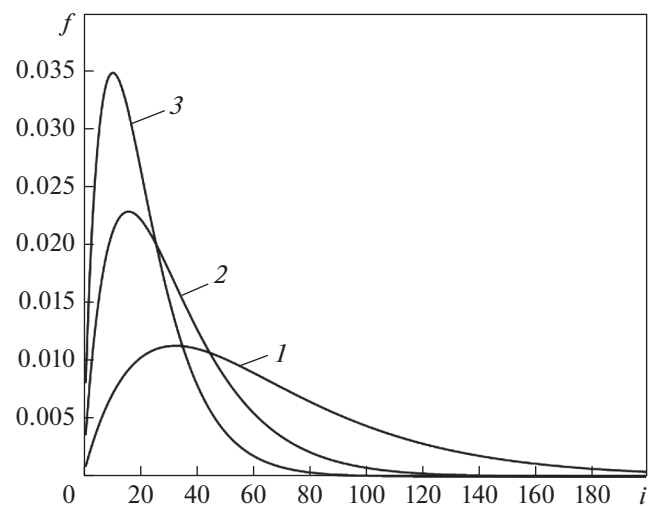
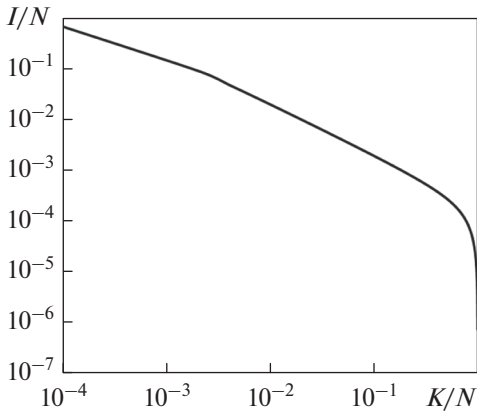


Рис. 3. Распределение капель по размерам при разном подводе энергии на парообразование. Число единиц подведенной энергии  $K$ : 1 – 300; 2 – 600; 3 – 900



**Рис. 4.** Зависимость относительного среднего размера капель ( $I/N$ ) от доли энергии, подведенной для испарения ( $K/N$ )

ля энергии равна 1) – приведены на рис. 4. На этом рисунке показана зависимость относительного среднего размера капель от доли энергии, затраченной на испарение. При этом средний размер капель соответственно уменьшается от единицы (размер капли равен размеру порции) практически до нуля (размер молекулы). Долю подведенной энергии на испарение можно представить как отношение числа разорванных связей к числу таких связей ( $K/N$ ), а относительный размер капель – как отношение среднего размера капель к максимальному ( $I/N$ ). При этом средний размер капель будет определяться как начальный момент первого порядка или математическое ожидание распределения [14]:

$$I = \sum_i i f_i.$$

Для любого промежуточного значения подведенной энергии предложенная модель, согласно (3), обеспечивает характер кривой распределения капель по размерам. Знание же распределения капель по размерам, в свою очередь, позволяет моделировать процесс их сепарации в уловителе или сепараторе влаги [12], который устанавливается между грязным и чистым отсеками для предотвращения капельного уноса. Модель распределения капель по размерам (3) и вероятность выхода капель разной величины в чистый отсек  $\varphi_i$  дают возможность определить суммарный капельный унос, т.е. выполнить расчет процесса сепарации капель, который предлагается проводить по известной методике, позволяющей установить распределение капель по размерам на входе потока пара в чистый отсек [12]. Для описания процесса сепарации используется кривая разделения капель  $\varphi_i$ , которая показывает вероятность попадания капель размера  $i$  в чистый отсек. Тогда пол-

ный вынос или долю капель, перешедших в чистый отсек, можно найти по выражению

$$\bar{\varphi} = \sum f_i \varphi_i,$$

где  $\bar{\varphi}$  – полный вынос или доля капель, перешедших в чистый отсек.

Для аппроксимации кривой разделения капель можно воспользоваться известной из литературы S-образной кривой вида [12], описываемой следующей формулой:

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

где  $i_{\text{гр}}$  – граничный размер капель, для которого вероятность попадания в чистый отсек равна 0.5, т.е.  $\varphi_{i_{\text{гр}}} = 0.5$ ;  $k_s$  – параметр совершенства процесса сепарации.

В качестве недостатка использования представленной зависимости следует отметить то, что параметры  $k_s$  и  $i_{\text{гр}}$  должны определяться экспериментальным путем или в ходе идентификации модели по экспериментальным данным. Важно также, что оба эти параметра зависят как от конструкции сепаратора, так и от режима его работы [12]. Доля капельного уноса будет существенным образом зависеть от перегрева воды, производительности установки по пару и скорости пара в сепараторе капель, конструкции самих уловителей капель и их геометрических характеристик [8]. Согласно опубликованным данным [15], в качестве первого приближения при выполнении расчетов долю уловленных капель для выбранного типа уловителя капель можно принять

$$\bar{\varphi}_k = G_{1к}/G_1,$$

где  $G_{1к}$  – массовый расход капель влаги, выносимых потоком пара из грязного отсека в чистый, кг/с.

На следующем этапе исследования рассчитывается тепломассообмен в  $n$ -ступенчатой испарительной установке с учетом капельного уноса влаги (рис. 5). Массовые производительности по охлажденной и перегретой воде на два-три порядка больше производительностей потоков по капельному уносу и примесей, что позволяет рассматривать эти процессы последовательно, с учетом незначительного влияния потоков примесей и капельного уноса на потоки дистиллята и очищаемой воды.

Согласно ранее проведенным исследованиям [11], модель одной ступени может быть представлена в матричном виде:

$$\mathbf{B}\mathbf{X} = \tilde{\mathbf{X}}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{B}$  – матрица процесса тепломассообмена в многоступенчатой установке с учетом коммутации ступеней между собой размером  $n \times n$  блоков

или  $5n \times 5n$  элементов;  $\mathbf{X}$  – вектор искомых параметров процесса тепломассообмена в установке размером  $n \times 1$  блоков или  $5n \times 1$  элементов;  $\tilde{\mathbf{X}}$  – вектор известных параметров внешних потоков в установку размером  $n \times 1$  блоков или  $5n \times 1$  элементов.

Структура и порядок формирования матриц  $(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}})$  подробно представлены в работе [11], поэтому в данной статье они не комментируются.

Матричная модель (6) представляет собой систему из  $5n$  линейных уравнений, решение которой позволяет определить  $5n$  искомых величин. Решая систему методом обращения матриц [9], можно найти вектор искомых величин в виде

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}^{-1} \tilde{\mathbf{X}},$$

где возведение матрицы в степень  $(-1)$  соответствует ее обращению.

При расчете концентраций примесей учитывается, что в грязных отсеках при ступенчатом упаривании в жидкой фазе повышается концентрация минеральных примесей, а в чистый отсек могут попадать примеси в результате капельного уноса минерализованной воды.

Повышение концентрации примесей в минерализованной воде грязного отсека зависит от испарения чистой воды при сохранении практически постоянного массового потока примесей. Расходы перегретой воды и дистиллята по отсекам, а также концентрации примесей в данных потоках определяются по уравнениям массового баланса для примесей [7]:

$$G_1^i = G_1^0 \prod_{j=1}^i (1 - x_j), \quad i = \overline{1, n};$$

$$c_{\text{м.в.}}^i = \frac{c_{\text{м.в.}}^0}{\prod_{j=1}^i (1 - x_j)}, \quad i = \overline{1, n};$$

$$G_{\text{д}}^i = G_1^0 \left( x_1 + \sum_{j=1}^i \left[ \prod_{k=1}^j (1 - x_k) \right] x_{j+1} \right);$$

$$c_{\text{д}}^i = \frac{\sum_{j=1}^i c_{\text{м.в.}}^j G_1^j \overline{j}}{G_{\text{д}}^j}, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $x_j$  – доля пара в  $i$ -й ступени; верхний индекс показывает номер ступени; нижний индекс: “д” – дистиллят, “м. в” – минерализованная вода.

Исходные данные для численного примера расчетов многоступенчатой испарительной установки представлены в [11].

Результаты расчета, полученные для указанных исходных данных приведены на рис. 6, 7. На рис. 6 показана зависимость относительной кон-

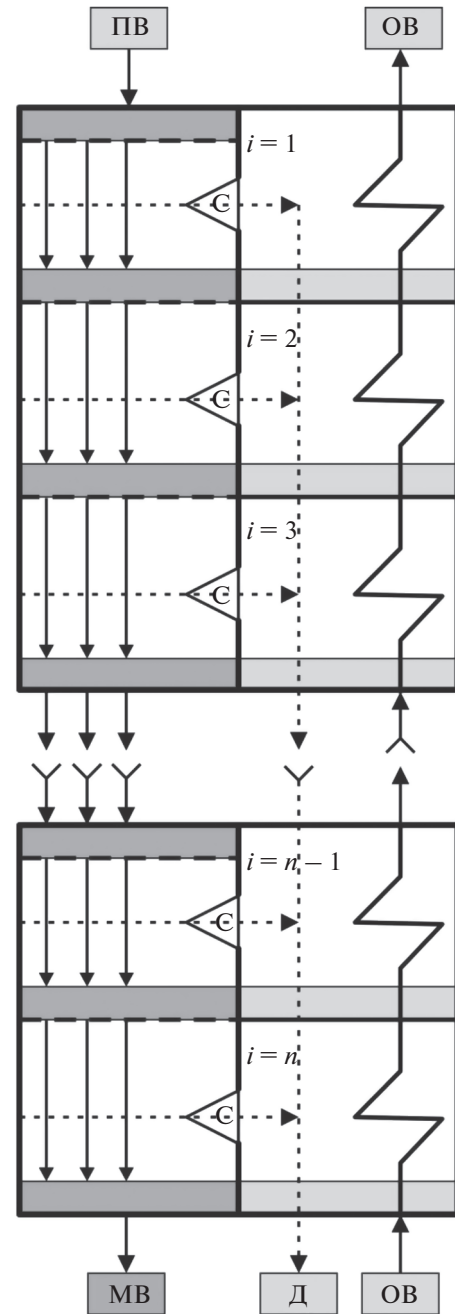
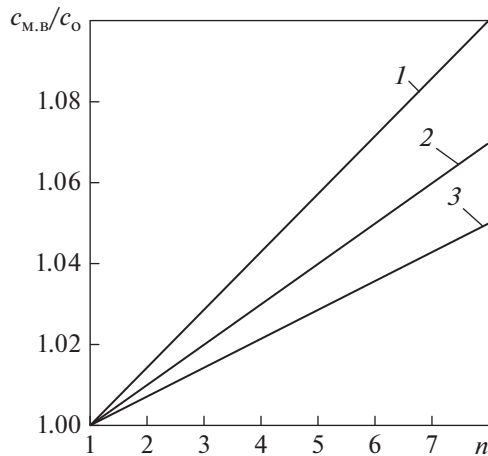


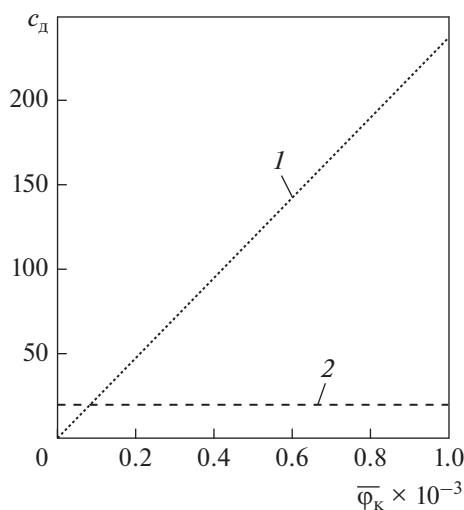
Рис. 5. Схема потоков теплоносителей в многоступенчатой испарительной установке мгновенного вскипания

центрации примесей в минерализованной воде по ступеням при идеальной сепарации для разных температур охлаждающей воды. Проведенный анализ данных показал, что понижение температуры охлаждающей воды приводит к заметному повышению концентрации примесей, что обусловлено увеличением парообразования из-за роста перегрева воды в ступенях.

На рис. 7 приведена зависимость солесодержания в дистилляте от капельного уноса влаги в



**Рис. 6.** Изменение относительной концентрации примесей в минерализованной воде ( $c_{м.в}/c_0$ ) по ступеням  $n$  испарительной установки при идеальной сепарации и разной температуре охлаждающей воды  $t$ , °C: 1 – 22.5; 2 – 45; 3 – 60



**Рис. 7.** Зависимость солевого содержания в дистилляте  $c_d$  от капельного уноса влаги  $\overline{\varphi}_k$  в чистый отсек (1) и предельно допустимое содержание в дистилляте (2) при неидеальной сепарации капель

чистый отсек. Для сравнения горизонтальной линией показано нормируемое значение солевого содержания в дистилляте.

По представленным на рис. 6 и 7 зависимостям можно определить, при какой эффективности сепаратора данная установка обеспечит требуемое значение солевого содержания в дистилляте. Приведенный подход позволяет также получать требуемую концентрацию примесей при выборе нужного режима работы испарительной установки. Та-

ким образом, этот способ расчета можно использовать для построения режимных карт оборудования или выполнения проектных расчетов.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенная комбинаторная модель описывает распределение капель влаги по размеру при испарении перегретой воды в зоне пониженного давления грязного отсека многоступенчатой испарительной установки мгновенного вскипания.

2. Представленная модель сепаратора позволяет определить долю капельного уноса влаги и содержание примесей в дистилляте, обусловленное капельным уносом.

3. Рассчитанная модель многоступенчатой испарительной установки с учетом капельного уноса дает возможность оценить потоки дистиллята и очищаемой воды и содержание примесей в этих потоках для каждой ступени МИУ МВ.

4. Разработанная модель МИУ МВ позволяет проектировать и выбирать режимы работы многоступенчатых испарительных установок, обеспечивающие заданные технологические показатели при различных условиях эксплуатации испарительных установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Модели** и эффективность процессов межфазного переноса: Ч. 2 / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, Е.А. Лаптева, Т.М. Фарахов. Казань: ООО “Центр инновационных технологий”, 2020.
2. **Мошкарин А.В., Бускунов Р.Ш.** Испарительные установки тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. **Коваленко В.Ф., Лукин Г.Я.** Судовые водоопреснительные установки. Л.: Судостроение, 1970.
4. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергия, 1996.
5. **Кутателадзе С.С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. **Мартыненко О.Г., Михалевич А.А., Шиков В.К.** Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 2. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов. М.: Альянс, 2009.
8. **РД 34.40.506-85.** Методические указания по эксплуатации испарительных установок поверхностного типа тепловых электростанций / Р.Ш. Бускунов, Р.К. Гронский, С.И. Грачева, Л.В. Громова / Челябинск: УралВТИ, 1985.
9. **Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S.** Simulation of grinding: new approaches. Ivanovo: ISPU Press, 1997.
10. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических теплообменников установок. Иваново: ИГЭУ, 2009.

11. 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.
12. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г., Барочкин Е.В. Аэродинамическая классификация порошков. Иваново: ПресСто, ИГЭУ, 2014.
13. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: ЮРАЙТ, 2009.
14. Физика облаков / А.М. Боровиков, И.И. Гайворонский, Е.Г. Зак, В.В. Костарев, И.П. Мазин. Л.: Гидрометеоиздат, 1961.
15. Теплотехника: курс общей теплотехники / А.А. Шукин, И.Н. Сушкин, Р.Г. Зах, Б.И. Бахмачевский, Г.П. Лызо. М.: Металлургия, 1973.

## Simulation of Droplet Entrainment in Multistage Flash Evaporating Units

V. P. Zhukov<sup>a, \*</sup>, I. A. Kokulin<sup>a</sup>, V. N. Vinogradov<sup>a</sup>, and A. E. Barochkin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003 Russia

\*e-mail: zhukov-home@yandex.ru

**Abstract**—Evaporators are widely used in industrial processes to produce thermally treated distillate by evaporation with concentration of impurities in the bulk of water. As to their thermal efficiency, multistage flash evaporators (MFEs) belong to one of the most promising types of evaporating equipment, in which the consumption of thermal energy for evaporating water in each stage is compensated for by the recovery of this energy in heating the treated water during the condensation of the produced steam. Improvement of the methods for design and operation of these units on the basis of mathematical models of heat- and mass-transfer processes is an urgent problem facing developers and designers of evaporative equipment. Within the scope of the performed study, a combinatorial model is proposed for calculation of the size distribution of superheated water droplets during evaporation in the low-pressure zone of the dirty compartment of an MFE. A mathematical model was developed of a droplet separator designed to prevent water droplet entrainment and ingress of impurities into the distillate. The flowrates of distillate and treated water and the content of impurities in these flows were calculated for each stage of the evaporation unit, taking into consideration the water droplet entrainment from the dirty compartment. The effect of droplet entrainment in multistage evaporators on the quality of distillate was assessed. An approach has been proposed to the design of multistage evaporators providing the specified process indicator under different operating conditions. This approach can also be used in the construction of regime maps of equipment, implementation of measures to improve the efficiency of equipment, and development of systems for diagnostics of heating surface in the evaporators for proper condition.

**Keywords:** evaporators, droplet entrainment, heat and mass transfer, combinatorial model, matrix model, water separation, impurity concentration, mineralized water