

УДК 676.164.3.082.3

Условия образования накипи на поверхности теплообмена выпарных аппаратов при выпаривании сульфатных щелоков

В. А. Сулов,
Санкт-Петербургский
технологический университет
растительных полимеров

Накипеобразование на поверхности теплообмена выпарных аппаратов (ВА), согласно опыту эксплуатации выпарных станций (ВС) целлюлозно-бумажного производства (ЦБП), является причиной значительного снижения их производительности. В наиболее тяжелых условиях находятся первые по пару или головные ВА, выпаривающие щелока высокой концентрации и обогреваемые паром с максимальной по батарее температурой. При этом производительность батарей определяется эффективностью работы первых аппаратов.

Следует отметить, что накипеобразование с разной степенью интенсивности присуще всем парогенерирующим поверхностям теплообмена. У поверхности теплообмена в пределах концентрационного пограничного слоя в местах центров парообразования наблюдаются значительные повышения концентрации раствора вследствие

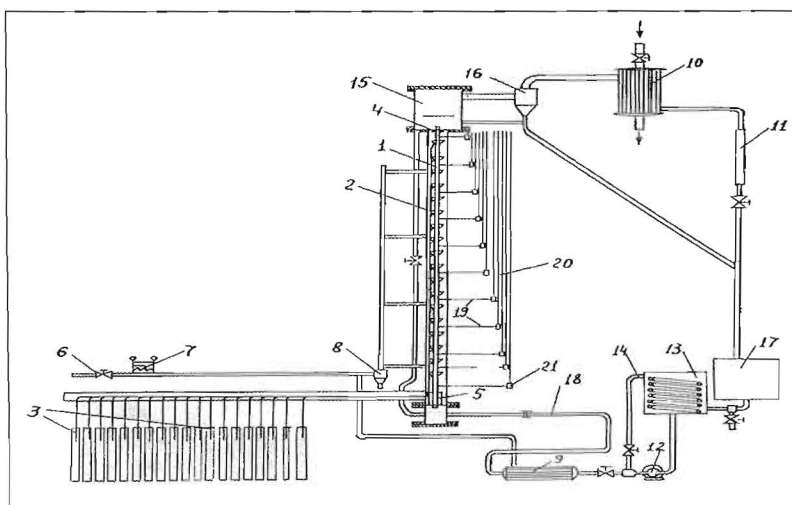


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования теплообмена при выпаривании отработанных растворов ЦБП

испарения жидкости в образующиеся пузырьки, приводящие к образованию накипи. Поэтому одной из характеристик интенсивности образования накипи может быть значение массового напряжения поверхности теплообмена — $u = W/F$, где: W — количество выпаренной в ВА влаги; F — поверхность теплообмена ВА.

Однако наиболее интенсивно накипь образуется на поверхности тепло-

обмена в местах прекращения (минимального) орошения ее жидкостью, т. е. в области образования кризиса кипения и в закризисных зонах. Кризисы в парогенерирующей трубе могут иметь неоднородное происхождение и подчиняются разным закономерностям.

В настоящее время наиболее полно изучены процессы теплообмена при кипении воды и рекомендованы расчетные уравнения, устанавливающие

зависимости между критической плотностью теплового потока и режимными параметрами работы энергетического оборудования тепловой и атомной энергетики, работающих при высоких давлениях и температурах [1, 2]. ВС ЦБП выпаривают щелочные, пенообразующие растворы при низких скоростях циркуляции ($w \approx 0,01$ м/с) под практически атмосферным давлением (0,15–0,09 МПа) [3]. Следовательно, подобные рекомендации не могут быть распространены на область работы режимных параметров ВС ЦБП.

Работы по изучению тепломассообмена при выпаривании водных растворов и отработанных щелоков ЦБП на кафедре промышленной теплоэнергетики **СПГУрП** проводятся с 1970 года. Для этой цели в 1977 г. был спроектирован и смонтирован экспериментальный стенд (рис. 1), представляющий однотрубный ВА с паровым обогревом. Основной рабочей частью стенда была кипяtilльная труба с натуральными по отношению к промышленным ВА размерами. Гидродинамические и теплообменные параметры работы стенда позволяли охватить весь диапазон работы промышленных установок. В качестве рабочих растворов использовались вода, черный сульфатный щелок, полученный от варки хвойных пород древесины и водный предгидролизат [4].

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости по изменению локальных коэффициентов теплоотдачи α в зависимости от значений массовых расходных паросодержаний парорастворной смеси по длине трубы при постоянной тепловой нагрузке, скорости циркуляции и концентрации раствора. Согласно рис. 2, с увеличением значений паросодержаний происходит возрастание коэффициентов теплоотдачи при кипении пенных растворов. При достижении определенных значений $x_{кр}$, зависящих от режимных параметров работы установки и физико-химических свойств растворов, наблюдалось падение α , плавное

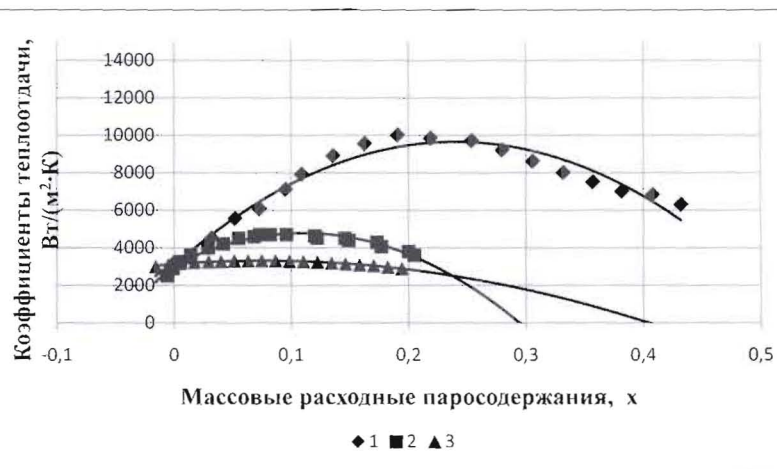


Рис. 2. Изменение интенсивности теплоотдачи в зависимости от паросодержания парощелоковой смеси при $q = 50$ кВт/м² и $W_0 = 0,05$ м/с: 1 — $b = 20\%$; 2 — $b = 30\%$; 3 — $b = 40\%$ а.с.в.

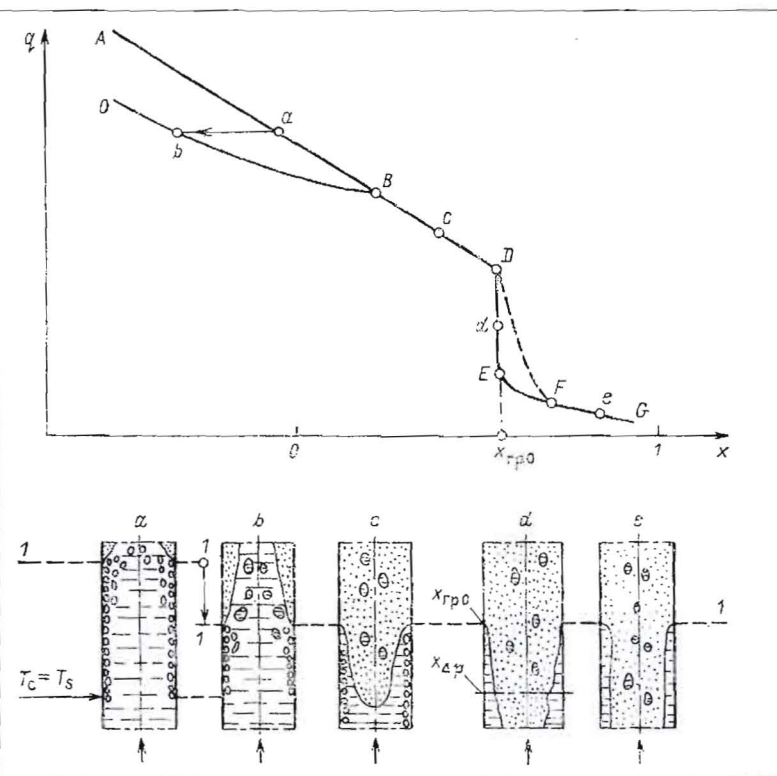


Рис. 3. Влияние паросодержания на $q_{кр1}$ и на характер смены режимов течения при кризисе ($\bar{p}w = \text{const}$): AB — кризис первого рода; CB — равновесная плотность теплового потока $q_{ровн}$; BDE — срыв жидкости со стенки и испарение пленки жидкости; EG — кризис орошения; a, b, c, d, e — схематичное изображение смены режимов кипения; 1–1 — сечение кризиса [5, 6].

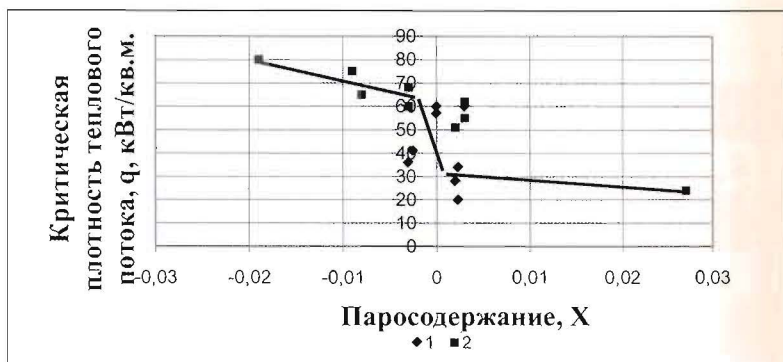


Рис. 4. Зависимость $q_{кр} = f(x)$ при кипении водного предгидролизата: $\rho_w = 25 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}$; 1 — $B < 30 \%$; 2 — $B > 30 \%$ а.с.в.

для растворов высокой концентрации и резкое — для растворов с низкой концентрацией. Показанное ухудшение теплоотдачи, обусловленное вытеснением пристенной пленки раствора паровой прослойкой, называется кризисом теплообмена и связано с интенсивным накипеобразованием.

Типовая зависимость критической плотности теплового потока от массового расходного паросодержания при кипении воды представлена на рис. 3. Нами на основании опытных данных, полученных на стендовой установке, построена зависимость $q = f(x)$ для кризисных ус-

ловий при кипении пенообразующих растворов ЦБП. Кризис фиксировался в точке начала увеличения температуры стенки трубы и падения коэффициента теплоотдачи. Для обобщения взяты опыты, проводившиеся с $w_0 = 0,015-0,025 \text{ м/с}$, $\rho_w = 25 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}$, концентрацией раствора $B = 20 \%$ и 30% . Результаты обобщения представлены на рис. 4.

Согласно рис. 4 кризис кипения в пенообразующих растворах ЦБП образуется подобно механизмам образования кризисов при кипении воды [7, 8].

В соответствии с рис. 3, 4, в области малых паросодержаний x пенный раствор занимает большую часть поперечного сечения канала. Кризис теплоотдачи в этом случае происходит из-за нарушения встречными потоками гидродинамической устойчивости пристенной пенной пленки: пузырьки пара, движущиеся от стенки, препятствуют проникновению раствора к

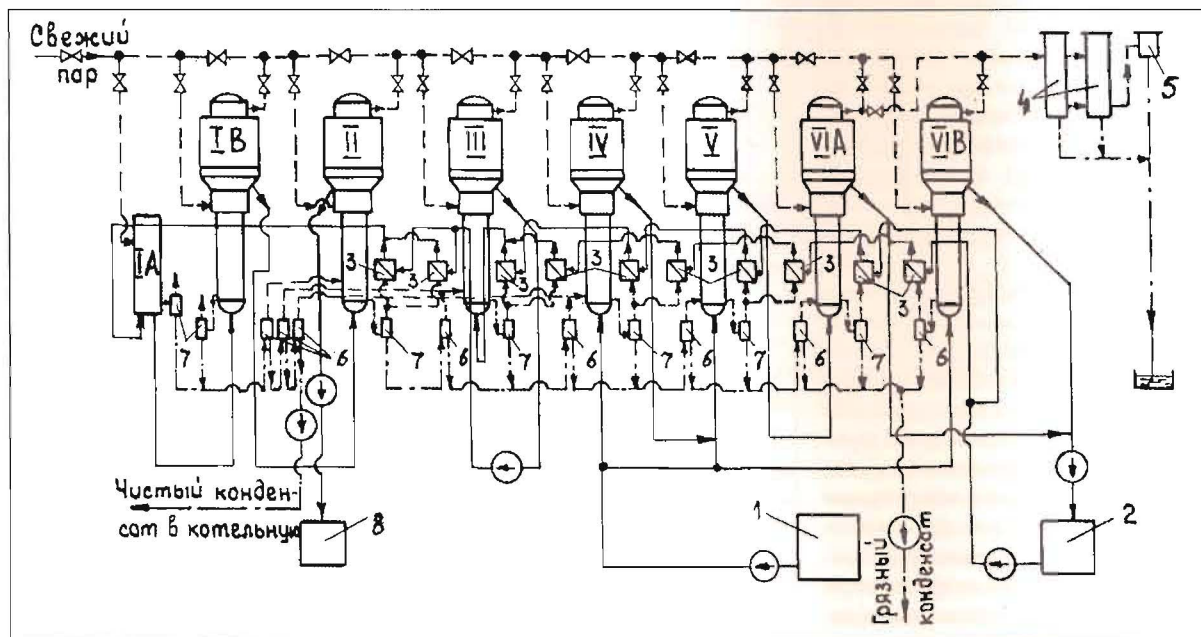


Рис. 5. Схема выпарной станции фирмы «Розенблад» [7]:

— — — — пар, - - - - — щелок, — — — — конденсат; 1А, 1А, II, III, IV, V, VIA, VIB — порядковые номера корпусов; 1 — бак слабого щелока; 2 — бак полуупаренного щелока; 3 — подогреватели щелока; 4 — поверхностный конденсатор; 5 — барометрический конденсатор; 6 — расширители конденсата; 7 — конденсатоотводчики; 8 — бак крепкого щелока.

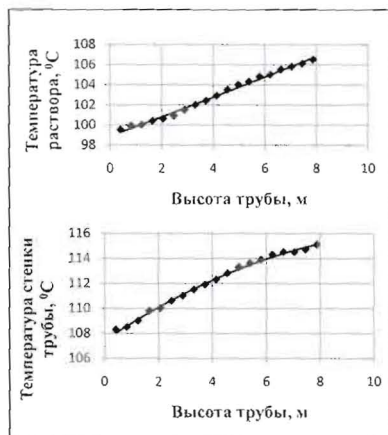


Рис. 6. Изменение температуры раствора и стенки кипяtilьной трубы в процессе кризиса кипения сульфатного щелока: $V = 30\%$ а.с.в.; $\rho_w = 55,6 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$; $q_{кр1} = 44 \text{ кВт/м}^2$; $x = 0,01$

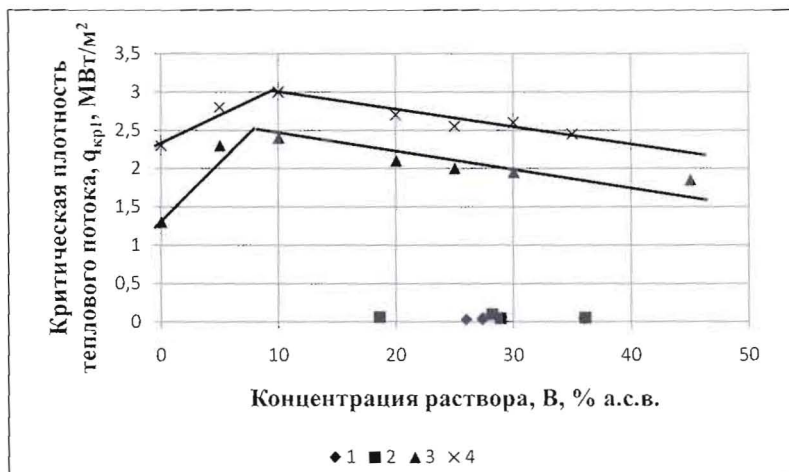


Рис. 7. Зависимость $q_{кр1}$ от w_0 , $\Delta t_{нед}$ и V при кипении смесей и растворов в трубах: 1 – черный сульфатный щелок, труба с $d = 49 \text{ мм}$, $p = 0,1 \text{ МПа}$, $w_0 = 0,05 \text{ м/с}$; $\Delta t_{нед} = 5^\circ\text{C}$, $b < 30\%$; 2 – то же, но $b > 30\%$ а.с.в.; 3 – смесь бензол-МИПД, труба с $d = 10 \text{ мм}$; $p = 0,2 \text{ МПа}$, $w_0 = 4 \text{ м/с}$; $\Delta t_{нед} = 25^\circ\text{C}$; 3 – то же, но $\Delta t_{нед} = 50^\circ\text{C}$

стенке. В результате стенка кипяtilьной трубы покрывается оттесняющим раствор паром, имеющим низкую теплопроводность. Интенсивность теплообмена при этом резко снижается.

На рис. 3 гидродинамическую модель кризиса характеризует линия АВ. В процессе выпаривания пенных растворов подобная модель развития кризиса наблюдается на прямооточных участках смешанных схем ВС ЦБП, где перегретый относительно температуры насыщения раствор подается в В/А, работающий под более низким давлением (рис. 5, В/А V; VIA; VIB). При этом возникает адиабатное вскипание раствора, приводящее к вышерассмотренной модели.

С повышением паросодержания в пенном растворе растет количество пара. Пар препятствует проникновению потока раствора из основного объема к стенке. Образовавшаяся пена также способствует вытеснению жидкости из пристенной области. При достижении критической плотности теплового потока устойчивость жидких пленок,

пронизывающих двухфазный пограничный слой нарушается, и стенка покрывается сплошным слоем пара.

Исследования показывают, что условия для развития кризиса и возникновения пленочного кипения раствора быстрее достигаются на выходе из трубы, где паросодержание потока смеси максимально. Этим условиям на рис. 3 соответствует точка а.

Поскольку в условиях кризиса стенка на участке пленочного кипения перегревается, граница кризиса будет перемещаться навстречу потоку раствора с более низкими паросодержаниями и повышенными значениями $q_{кр}$. На некотором расстоянии от выходного сечения трубы распространение пленочного кипения прекратится, и положение границы режимов кипения стабилизируется. В этих условиях устанавливается устойчивый равновесный режим, при котором будут одновременно сосуществовать пузырьковое кипение в трубе и пленочное кипение на выходе из нее (рис. 2). Соответствующее изменение режимов

на рис. 3 показано как переход из точки а в точку б. Зависимость критической плотности для равновесного теплового потока от паросодержания $q_{равн} = f(x)$ на рис. 3 обозначена линией ВО.

В области высоких паросодержаний потока кризис теплоотдачи происходит в результате высыхания пленки жидкости, где в сечении кризиса дисперсно-кольцевое течение сменяется дисперсным. Начиная с сечения кипяtilьной трубы, где пленка раствора испарилась полностью, происходит резкий рост температуры стенки (рис. 6). На рис. 3 это линия ВДЕ. Подобный вид кризиса на ВС ЦБП фиксируется крайне редко. Он может проявляться при кипении воды под низким давлением ($P < 16 \text{ МПа}$). В этом случае на кривой $q_{кр1} = f(x)$ (линия DF, рис. 3) наблюдается резко ниспадающий участок, где в узком диапазоне паросодержаний происходит значительное снижение критической плотности теплового потока. Паросодержание точки D на кривой $q_{кр1} = f(x)$ называют граничным $x_{гpo}$. Оно вводится как безопасное значение

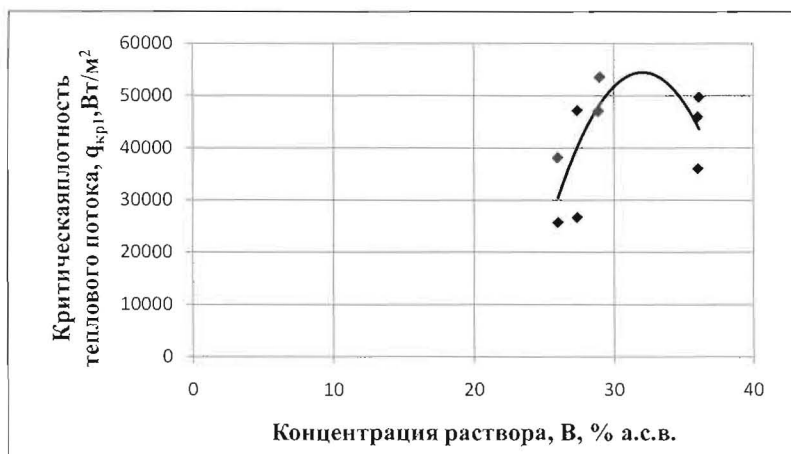


Рис. 8. Зависимость критической плотности теплового потока от концентрации сульфатного щелока: $P = 0,1 \text{ МПа}$; $\rho_w = 50 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $\delta t_n = 5^\circ \text{C}$

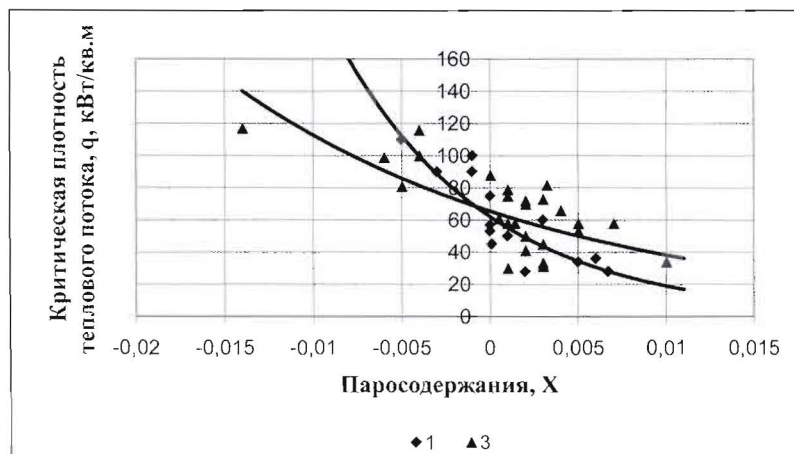


Рис. 9. Зависимость критической плотности теплового потока от паросодержания: $B < 30 \text{ \% а.с.в.}$; 1 – $\rho_w = 90 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 3 – $\rho_w = 20 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

паросодержания [5]. Четко разграничить причины кризиса крайне трудно и поэтому ухудшение теплоотдачи обычно просто называют кризисом теплоотдачи, а соответствующую ему критическую плотность теплового потока обозначают q_{kp1} .

Критическая плотность теплового потока определяется физико-химическими свойствами выпариваемого раствора; его расходом и

пульсациями; давлением, под которым кипит раствор; размерами кипяtilных труб и состоянием их поверхности.

Как следует из рис. 7, критическая плотность теплового потока при кипении исследованных нами растворов значительно ниже опытных данных, приведенных авторами работы [9] и почти в 100 раз ниже табличных данных по критической плот-

ности теплового потока для воды, приведенных в [5].

Данные, приведенные на рис. 7, показывают неоднозначную зависимость критической тепловой нагрузки от концентрации раствора. При увеличении до 10 % а.с.в. концентрации раствора бензол-МИПД критическая плотность теплового потока увеличивается. Однако при дальнейшем увеличении концентрации – критическая плотность уменьшается.

На рис. 7 при данном масштабе осей значения точек критической плотности теплового потока для кипящего сульфатного щелока находятся в пределах нулевой отметки. Эти же данные представлены на рис. 8 в более крупном масштабе. Как видно на рис. 7, характер зависимости критической плотности при изменении концентрации растворов не меняется. Однако, для сульфатных черных щелоков он более резкий. Экстремум находится в пределах 33 % концентрации. q_{kp1} увеличивается до 35 % а.с.в., при больших концентрациях – q_{kp1} уменьшается, что объясняется изменением при кипении теплофизических свойств щелока, в первую очередь – значений коэффициента поверхностного натяжения.

Массовая скорость при различных паросодержаниях кипящего раствора также неоднозначно влияет на критическую плотность теплового потока. Как видно на рис. 9, при заданной концентрации раствора зависимости $q_{kp1} = f(x)$, полученные для ряда значений ρ_w , представляют собой пересекающиеся линии. С ростом ρ_w критическая плотность возрастает при малых x и уменьшается при больших x . Точку пересечения линий $q_{kp1}(x)$, в которой происходит смена характера зависимости $q_{kp1} = f(\rho_w)$, называют точкой инверсии. Неоднозначность влияния ρ_w на критическую плотность при кипении связана с изменением механизма кризиса кипения [4]. При кипении раствора до точки инверсии (при от-

рицательных и малых положительных x) увеличение массовой скорости при пузырьковом кипении способствует удалению пара со стенки. Поэтому с возрастанием rw возрастает и $q_{кр1}$. При кипении раствора после точки инверсии при больших x кризис связан с высыханием пленки жидкости. Увеличение массовой скорости приводит к срыву пленки жидкости со стенки и к уменьшению в ней расхода, если пленка сохранилась. Для испарения оставшейся пленки потребуется меньше теплоты, что и отражается на $q_{кр1}$.

Гидравлическая система, состоящая из сотен параллельных кипящих каналов, соединенных на входе раствора в ВА приемной камерой, может оказаться неустойчивой. В ней возможно появление на входе и выходе из каналов пульсаций расхода. При этом увеличение расхода на входе в одном или нескольких каналах совпадет по времени со снижением расхода на входе в остальных. При постоянном подводе теплоты к потоку раствора временное уменьшение его расхода в канале приведет к росту паросодержания двухфазной смеси. Пульсации расхода и паросодержания сопровождаются пульсациями давления. При одних и тех же средних по времени значениях массовой скорости и расходного паросодержания критическая плотность теплового потока для режима с пульсациями расхода оказывается много меньше (до 5 раз [5]), чем для беспульсационного. Для предотвращения возникновений опасных пульсаций расхода кипящие трубы шайбируют.

Относительно безнакипная работа кипящего пучка ВА возможна в при поддержании плотности теплового потока на стенке $W \cdot r/F$ для любого кипящего пучка во всех расчетных режимах ниже критического значения, рассчитываемого по уравнению [10]

$$q_{кр} = 15,3b^{0,13}(pw)^{0,06}\Delta t_n^{0,47}, \text{ кВт/м}^2,$$

где $W = S(1-b/B)$ – количество выпаренной в ВА влаги, кг/с; r – теплота парообразования, взятая из теплофизических таблиц по температуре вторичного пара, Дж/кг; F – кипящая поверхность ВА, м²; b и B – входная и выходная концентрации раствора, % а.с.в.; $pw = 4 \cdot S/(n \cdot \pi \cdot d^2)$ – массовая скорость раствора, кг/(м²·с); Δt_n – недогрев раствора до температуры насыщения, °С; S – расход раствора в ВА, кг/с; n – количество кипящих в ВА каналов; d – внутренний эквивалентный диаметр кипящего канала.

По этому уравнению можно рассчитать значение критической плотности теплового потока с погрешностью до 15 % при выпаривании сульфатных черных щелоков в диапазоне концентраций $b = 10 - 60$ % а.с.в.; массовой скорости $pw = 20 - 160$ кг/(м²·с); величины недогрева щелока до температуры насыщения на входе в кипящую трубу $\Delta t_n = 0 - 30$ °С.

В процессе предлагаемой работы найдены критические плотности тепловых потоков при выпаривании сульфатных щелоков в ВА ЦБП и соответствующие критические паросодержания парощелоковой смеси. Зная области существования кризисов при кипении, зависимости и механизмы их происхождения можно менять режимные параметры работы ВА согласно приведенному расчетному уравнению значительно уменьшить негативное влияние кризисов на работу выпарного оборудования: улучшить теплоотдачу (увеличить производительность), уменьшить накипеобразование в трубах выпарных аппаратов ЦБП (улучшить теплоотдачу и увеличить производительность).

Список литературы

1. Дорожук В. Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопро-

тивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990.

3. Суслов В. А. Результаты промышленных исследований режимов работы выпарных станций ЦБП. – «Машины и аппараты ЦБП». Межвуз. сб. научн. тр. Вып.10. ЛТИ ЦБП, 1982.

4. Суслов В. А., Кушнир В. И. Стенд для исследования механизма теплообмена и гидродинамики при пленочном кипении сульфатного щелока. – «Машины, конструирование, расчеты и оборудование ЦБП». Межвуз. сб. научн. тр. Вып.УІ, ЛТА, 1978.

5. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учеб. пособие для вузов / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 472 с.: ил.

6. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Теплообмен: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр., и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с., ил.

7. Суслов В. А. Основные процессы при выпаривании щелоков целлюлозного производства: учеб. пособие для вузов – СПб.: СПбГТУ РП, 1998. – 92 с.

8. Тобилович Н. Ю. Кризис теплообмена при испарении в стекающей пленке жидкости при спутном движении жидкости и вторичного пара // Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации. Т. 1. Пузырьковое, переходное и пленочное кипение. Кризисы кипения: тез. докл. Всесоюз. конф. – Рига, 1982. – С. 189-190.

9. Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: Учеб. пособие для ВТУЗов. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 1986. – 448 с.: ил.

10. Суслов В. А. Повышение эффективности выпаривания отработанных варочных растворов целлюлозного производства. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2006.