

УДК 676.052.1:66.049.1/.2

В.А. Суслов

Суслов Вячеслав Александрович родился в 1947 г., окончил в 1970 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики, ректор С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет около 85 научных трудов.



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ ВАРОЧНЫХ РАСТВОРОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В результате проведенных промышленных, стендовых и теоретических исследований режимов работы выпарных станций предложены пути совершенствования энергоиспользования. Экспериментально показана возможность и приведены параметры безнакипного выпаривания пенных отработанных растворов ЦБП в длиннотрубных аппаратах с гравитационным течением выпариваемого раствора.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажный комбинат, выпарная станция, выпарной аппарат, сульфатный щелок, теплообмен и гидродинамика при кипении, коэффициент теплоотдачи, термическое сопротивление накипи, скорость парорастворной смеси, тепловая нагрузка, концентрация раствора.

Одно из важнейших направлений мирового технического прогресса – всесторонняя интенсификация производственных процессов при сохранении экологических требований. При этом следует отметить, что в отдельных корпусах выпарных станций (ВС) целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК) термическое сопротивление накипи в кипятильных трубах составляет более 50 % от полного термического сопротивления теплопередачи и является существенным тормозом увеличения производительности ВС. Несмотря на очевидную технологическую и экономическую актуальность проблемы интенсификации выпаривания за счет снижения интенсивности накипеобразования, в настоящее время на ЦБК практически полностью отсутствуют научно обоснованные методы борьбы с накипью. Это обусловлено сложностью исследования данного вопроса, неразрывно связанного с изучением механизмов теплообмена и гидродинамики при кипении сульфатного щелока и других отработанных растворов ЦБК, конденсацией парогазовой смеси. Практически отсутствуют данные, характеризующие процесс кипения щелочных растворов в трубах выпарных аппаратов (ВА) ВС ЦБК, а имеющиеся отдельные разработки по выпариванию некоторых растворов носят частный характер и отличаются большой противоречивостью.

Первые исследования по теплообмену при кипении водных растворов в вертикальных трубах испарителей и выпарных аппаратов были начаты В.И. Толубинским в 1945 г. Параллельно с этими исследованиями работы по изучению теплообмена проводили Н.Ю. Тобилевич [12] и др. [2–4, 13–17].

Анализ работ по кипению черных щелоков показал, что к настоящему времени, несмотря на определенные успехи, отсутствуют достаточно надежные рекомендации для расчета и регулирования режимов работы выпарной аппаратуры ЦБК. Такое положение вынуждает использовать в инженерной практике расчетные уравнения, полученные для других жидкостей (преимущественно воды) и для других условий. В работе [10] нами были произведены расчеты коэффициента теплоотдачи при кипении сульфатного щелока в диапазоне изменения режимных параметров, типичном для работы ВА, по уравнениям, предложенным в наиболее известной научной литературе. Расхождение значений коэффициентов теплоотдачи при принятых для расчета режимных и физических параметрах объясняется неравномерностью распространения зависимостей, полученных для конкретных сред и условий, на теплообмен при кипении сульфатных щелоков.

Для изучения процесса теплообмена при выпаривании отработанных растворов ЦБК, получения данных для проектирования и создания экспериментальных установок, определения диапазона изменения режимных параметров были проведены теплотехнические исследования режимов работы в промышленных условиях 14 выпарных станций ряда ЦБК [9]. Параметры, характеризующие работу ВС, были получены с помощью контрольно-измерительных приборов щита управления, лабораторных манометров, мановакууметров и термометров, установленных на аппаратах, и термопар, установленных в трубопроводах ВС. Плотность растворов измеряли ареометрами. Измерения проводили в течение нескольких дней с интервалом в 30 мин в установившемся режиме работы батарей. В результате исследований обнаружено, что зависимость интенсивности передачи теплоты от концентрации выпариваемых щелоков обратно пропорциональна. Значения коэффициентов теплопередачи в ВА увеличиваются с возрастанием плотности теплового потока. ВС с небольшой поверхностью теплообмена, работающие по противоточным схемам питания, имели наилучший показатель тепловой эффективности.

Для проведения экспериментальных исследований по теплообмену и гидродинамике при выпаривании отработанных растворов ЦБК были спроектированы и изготовлены следующие стендовые установки, полностью воспроизводящие процессы выпаривания.

1. Стенд с паровым обогревом для изучения теплопередачи при подъемном движении потока, представленный на рис. 1. Основная рабочая часть стенда – кипяtilьная труба диаметром $d = 0,051/0,048$ м и длиной $L = 8,5$ м, $L/d = 165$ [7]. Кипяtilьная труба разделена конденсатосборными стаканами на 19 измерительных участков. Гидродинамические и тепловые параметры работы стенда позволили охватить весь диапазон работы промышленных установок.

2. Установка для исследования гидродинамики гравитационно стекающей пленки жидкости внутри кварцевой трубы длиной 2 м, $L/d = 95$ [6].

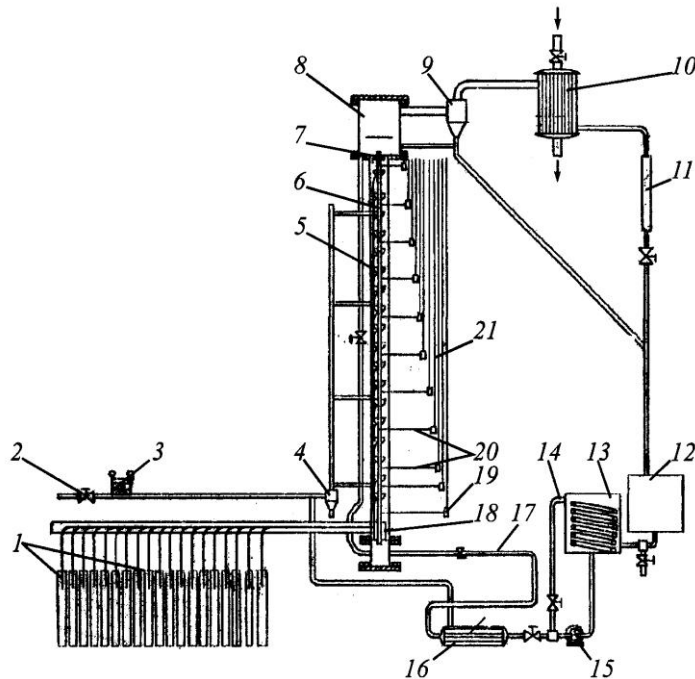


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования теплообмена при выпаривании отработанных растворов ЦБП: 1 – мерники конденсата; 2 – игольчатый паровой вентиль; 3 – электроподогреватель; 4 – сепаратор; 5 – конденсаторообогреватель; 6 – конденсаторооборные стаканы; 7, 18 – верхняя и нижняя трубные доски; 8 – сепаратор; 9 – каплеотделитель; 10 – конденсатор вторичного пара; 11 – мерник конденсата; 12 – приемный бак; 13 – расходный бак; 14 – возвратный контур; 15 – насос; 16 – догреватель раствора; 17 – измерительный участок расхода раствора; 19, 21 – пьезометры; 20 – отборы статического давления

3. Установка для исследования теплоотдачи к стекающей пленке внутри стальной трубы с электрообогревом длиной 2 м, $L/d = 95$ (рис. 2) [6].

4. Установка для исследования накипи и борьбы с ней, состоящая из однетрубного вертикального однопроходного ВА с принудительной циркуляцией раствора и паровым обогревом трубы длиной 8,5 м, $L/d = 163$, аппарата магнитной обработки раствора, подогревателя, конденсатора, мерников конденсата, баков, щелочной ловушки [11].

5. Пилотный ВА, работающий на «падающей пленке».

Все установки были укомплектованы контрольно-измерительными приборами и устройствами, обеспечивающими измерение температуры стенки трубы и раствора, плотности теплового потока по длине трубы,

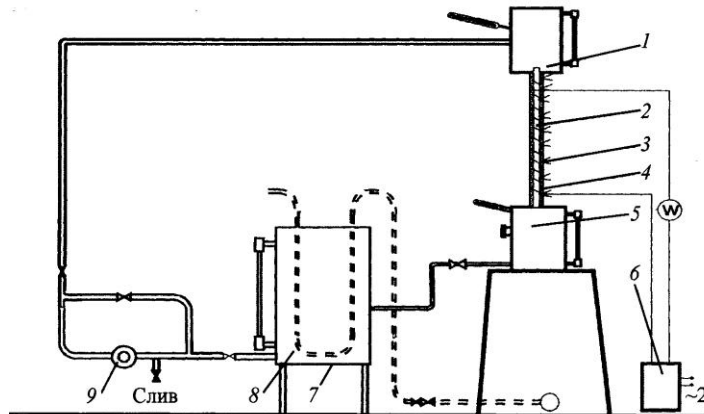


Рис. 2. Схема установки для исследования теплообмена гравитационно стекающей пленки: 1 – растворная камера; 2 – экспериментальный участок; 3 – электрообогреватель; 4 – изоляция; 5 – сепаратор; 6 – регулятор напряжения; 7 – паровой обогрев; 8 – бак; 9 – циркуляционный насос

параметров обогревающего кипяtilьную трубу пара (греющего) и пара, образовавшегося в результате кипения раствора (вторичного), интенсивности теплоотдачи, перепадов давлений на участках канала и ряда других параметров. Исследования проводили на установках в следующем диапазоне режимных параметров:

при подъемном течении – концентрация черного сульфатного щелока на входе в трубу $c = 0 \dots 50$ % абс. сухих веществ (а.с.в.); водного предгидролизата – $0 \dots 30$ % а.с.в.; давление греющего пара $P = 0,175 \dots 0,335$ мПа; давление вторичного пара в сепараторе установки $P_{вт} = 0,081 \dots 0,130$ мПа; скорость циркуляции раствора $w_0 = 0,013 \dots 0,400$ м/с; температура раствора на входе в трубу $t = 96$ °С; плотность теплового потока $q = 2 \dots 100$ кВт/м²;

в условиях гравитационного течения – $q = 5 \dots 35$ кВт/м²; объемная плотность орошения $\Gamma_v = 0,0001 \dots 0,0020$ м³/(м·с).

При этом выдерживали равенство критериев кипения для стендовых установок и промышленных ВА ЦБК, диапазон изменения которых составлял

$$K_w = \frac{q}{\rho'' \Delta i w_0} = 0,14 \dots 2,10; \quad K_i = \frac{q}{\rho' w_0 \Delta i_n} = 0,004 \dots 3,600,$$

где ρ'' и ρ' – плотность соответственно образующегося пара и кипящего раствора, кг/м³;

Δi – энтальпия фазового перехода, кДж/кг;

Δi_n – энтальпия недогрева раствора на входе в трубу, кДж/кг.

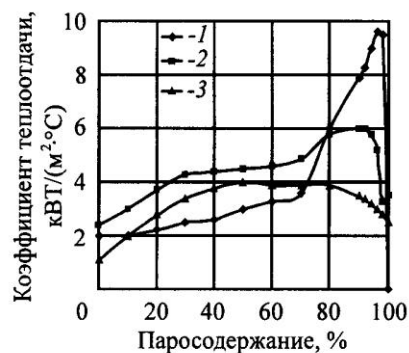
Установлено изменение коэффициента теплоотдачи α по длине трубы при всех гидродинамических режимах; отношение $\alpha_{max}/\alpha_{min}$ достигало 50. Постоянные значения локальных α отмечены только в случае течения

некипящей жидкости. Во всех опытах, кроме режимов с нивелирным уровнем кипящей трубы $L_{\text{вп}} = 100\%$ при скорости $w_0 > 0,4$ м/с, теплоотдача в верхней части трубы падала. При низких скоростях ($w < 0,02$ м/с) и плотности теплового потока $q > 40$ кВт/м² снижение α отмечено сразу же после входа раствора в трубу. Соотношение скорости циркуляции и плотности теплового потока оказывало решающее влияние на среднюю теплоотдачу и распределение участков по длине трубы с различными режимами течения потока жидкости.

Для выявления типовых режимов течения по нашим опытным данным были построены диаграммы режимов течения двухфазного потока в координатах $w_0 - L/d$ и $rw - x$ (где rw – массовая скорость, x – массовое паросодержание). Из диаграмм следует, что выпаривание черных сульфатных щелоков при типичных для промышленных ВС режимах связано с наличием зоны ухудшенной теплоотдачи и, вследствие этого, с интенсивным накипеобразованием. Экспериментальные данные, представленные в координатах $rw - x$, показали, что пузырьковый режим кипения воды может возникать при более низких отрицательных значениях паросодержания по сравнению с аналогичным режимом кипения раствора. Режимы с ухудшенной теплоотдачей могут возникать при кипении как воды, так и растворов с аналогичным паросодержанием. Диапазон критических паросодержаний x для растворов был ограничен и, в отличие от воды, лежал в пределах нуля.

По полученным данным рассмотрены изменения истинного объемного $\phi = f_n/f$ (f_n, f – соответственно площади поперечного сечения парового потока и трубы), расходных объемного β и массового x паросодержаний по длине трубы L . Как показали эксперименты, паросодержание влияет на теплоотдачу за счет изменения скорости и структуры двухфазного потока. Поскольку механизмы передачи теплоты, связанные с q и w_0 , наилучшим способом учитываются критерием K_w , влияние паросодержания может быть представлено функцией $\alpha = f(\phi)$ при $K_w = \text{const}$ (рис. 3). По этим кривым выделены четыре основных режима с характерными соотношениями между q, w_0, ϕ , определяющими доминирующее влияние того или иного механизма переноса теплоты на теплоотдачу.

Рис. 3. Изменение интенсивности теплоотдачи в зависимости от паросодержания парожидкостной смеси при $K_w = 0,7$:
1 – $c = 20\%$ а.с.в.; 2 – 30;
3 – 40 % а.с.в.



Область изменения паросодержания с $\varphi < 40\%$ и $x < 0,005$ определена как зона пузырькового кипения. При течении парорастворной смеси с низкой скоростью в режиме пузырькового кипения снижение α при увеличении w_0 или недогрева раствора до состояния насыщения Δt_n обусловлено уменьшением интенсивности процесса парообразования.

Значительное повышение интенсивности теплоотдачи на участке пузырькового кипения связано с увеличением тепловой нагрузки. Отрицательное влияние на теплоотдачу увеличивающейся концентрации раствора в значительной мере компенсировалось пенообразованием, а независимость интенсивности теплоотдачи от паросодержания или скорости парожидкостной смеси объясняется определяющим влиянием механизма переноса теплоты, обусловленной процессом парообразования. Зависимость коэффициента теплоотдачи от режимных параметров процесса в области пузырькового кипения, представленная на рис. 4, а, обобщается следующим уравнением [5]:

$$\alpha_{\text{пуз}} = 111 \frac{q^{0,75}}{\Delta t_n^{0,19} w_0^{0,36}}, \quad (1)$$

где $q = 7,0 \dots 86,5$ кВт/м²; $\Delta t_n = 0,1 \dots 27,0$ °С; $w_0 = 0,01 \dots 1,00$ м/с.



Рис. 4. Зависимость интенсивности теплоотдачи от скорости циркуляции

$K_o = \frac{\alpha \Delta t_n^{0,19}}{q^{0,75}} (a)$, тепло-

вой нагрузки $K_o = \alpha w^{-0,687} c^{0,0629} (б)$

и скорости парожидкостной смеси $K_o = \alpha q^{-0,02} c^{0,35} (в)$: 1 – черный сульфатный щелок;

2 – вода;

3 – водный предгидролизат



Эмульсионный (пенный) режим течения определяли в следующих диапазонах параметров:

$$\varphi = 40 \dots 70 \% ; x = 0,005 \dots 0,015 ; We_3 = \frac{(w_{\text{отн}}'')^2 \rho''}{\sqrt{\sigma g \rho'}} < 11,$$

где $w_{\text{отн}}''$ – относительная скорость пара;

ρ'' и ρ' – соответственно плотности пара и раствора.

На этом участке независимость коэффициента теплоотдачи от тепловой нагрузки объясняется низкой теплопроводностью пены. Увеличение скорости двухфазного потока, положительно сказывающееся на испарении междупеночной жидкости, способствовало разрушению пены и, следовательно, повышению интенсивности теплоотдачи. При возрастании скорости парорастворной смеси происходит наложение механизма турбулентного обмена в однофазной среде на механизм переноса, обусловленный процессом парообразования; в связи с этим α увеличивается. Приведенная на рис. 4, б зависимость интенсивности теплоотдачи от режимных параметров процесса в зоне пенного режима кипения описывается уравнением [5]:

$$\alpha_{\text{пен}} = 4970 w_{\text{см}}^{0,7} q^{-0,19}, \quad (2)$$

где $w_{\text{см}}$ – скорость парорастворной смеси, $w_{\text{см}} = 0,045 \dots 15,000$ м/с;

$$q = 10 \dots 110 \text{ кВт/м}^2.$$

Область значений коэффициентов теплоотдачи при $\varphi = 80 \dots 95 \%$, $x > 0,015$, $We_3 > 11$, предшествующая резкому падению α , определялась как дисперсно-кольцевая. При $q = 40 \dots 80$ кВт/м² тепловая нагрузка практически не влияла на теплообмен. С повышением концентрации раствора снижалась скорость движения его пристенной пленки, поэтому происходило уменьшение турбулентного обмена и, следовательно, интенсивности теплообмена. Приведенная на рис. 4, в зависимость интенсивности теплоотдачи от режимных параметров процесса кипения в области дисперсно-кольцевого течения раствора описывается следующим эмпирическим уравнением [5]:

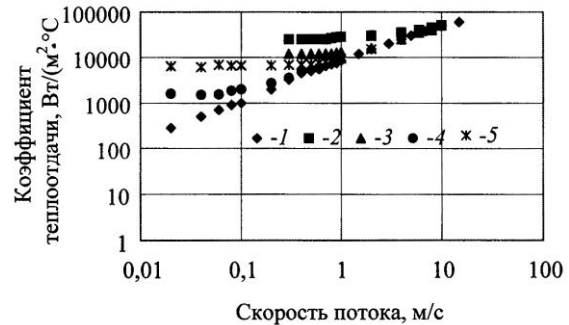
$$\alpha_{\text{д.к}} = 1500 \frac{w_{\text{см}}^{0,7}}{0,1 + c^{0,35}}, \quad (3)$$

где $w_{\text{см}} = 5 \dots 30$ м/с;

$$c = 0 \dots 50 \% \text{ а.с.в.}$$

Анализ опытных данных показал, что теплообмен при кипении пенных отработанных растворов в трубах выпарных аппаратов ЦБК определяется совместным воздействием режимных параметров (q , w , $\Delta t_{\text{н}}$, c), которое проявляется через механизм формирования и перераспределения по высоте трубы участков с типовыми режимами кипения. Преимущественное развитие одного из участков может значительно изменить тенденцию теплообмена и быть причиной качественного различия данных, полученных при разных условиях. Длины участков с пузырьковым, эмульсионным и дисперсно-кольцевым режимами течения парощелочного потока увеличивались с по-

Рис. 5. Теплоотдача при кипении воды и растворов в условиях вынужденного движения: 1 – расчетные данные для однофазной жидкости; 2, 3 – для воды, $q = 810$ и 230 кВт/м² соответственно; 4, 5 – данные для кипящих растворов, $q = 20$ и 80 кВт/м² соответственно



вышением w_0 при $q = \text{const}$. При $w_0 > 0,07$ м/с и $q > 40$ кВт/м² участки могли занимать всю трубу. При повышении q до 100 кВт/м² с одновременным уменьшением w_0 до $0,01$ м/с на большей части трубы устанавливался капельный режим, и α резко падал. Наоборот, при увеличении w_0 до $0,1$ м/с и снижении q до 5 кВт/м² на большей части трубы преобладала экономайзерная зона. При повышении концентрации раствора режим ухудшенной теплоотдачи наступал при меньших q , а α снижалось более плавно.

Основным фактором, определяющим распределение указанных зон при кипении пенных растворов ЦБК, является соотношение между тепловым потоком и скоростью циркуляции раствора, поэтому критерий K_w принят в качестве меры, определяющей оптимальность процесса при выпаривании растворов ЦБК. Данные, представленные на рис. 5, дают возможность в зависимости от вклада q и w в кипение выделить три характерных участка: развитое кипение при $\alpha = f(q)$; конвективный теплообмен при $\alpha = w_{\text{см}}$; совместное влияние на теплоотдачу механизмов передачи теплоты за счет парообразования и конвективного обмена.

Концентрация и величина недогрева усиливают действие механизмов передачи теплоты за счет зависимости от температуры вязкостных сил и сил межмолекулярного сцепления в растворе.

В области совместного влияния на теплоотдачу кипения раствора и его вынужденного движения для расчета коэффициента теплоотдачи может быть использована следующая зависимость [1]:

$$\frac{\alpha}{\alpha_{\text{тр}}} = \sqrt{1 + 7 \cdot 10^{-9} \left(\frac{w_{\text{см}} \Delta i \rho'}{q} \right)^{3/2} \left(\frac{\alpha_{\text{пуз}}}{\alpha_{\text{конв}}} \right)^2}, \quad (4)$$

$$\text{где } \alpha_{\text{тр}} = \alpha_{\text{конв}} \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_{\text{пуз}}}{\alpha_{\text{конв}}} \right)^2};$$

$\alpha_{\text{пуз}}$ – коэффициент теплоотдачи при пузырьковом режиме кипения раствора, рассчитанный по зависимости (1);

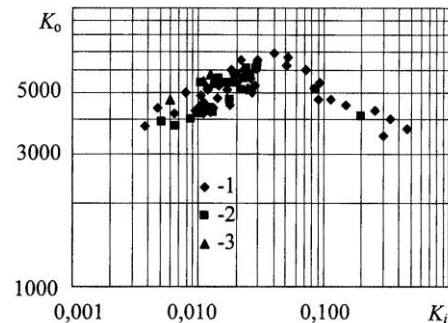
$w_{\text{см}}$ – скорость парожидкостной смеси.

Из результатов обобщения, представленного на рис. 6, видно, что устанавливаются две области влияния безразмерных переменных в зависимо-

Рис. 6. Обобщение опытных данных по интенсивности теплоотдачи при кипении пенных растворов ЦБК,

$$K_o = \frac{\bar{\alpha}}{\alpha_{lo} k_w^{0,453} Pr_f^{0,6} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,93}}$$

(обозначения см. на рис. 4)



сти от критерия $K_i = \frac{q}{\rho' w_0 \Delta i_n}$. Для первой области, определяемой $k_i < 0,05$,

при относительно низких тепловых нагрузках и высоких значениях недогрева характерно увеличение интенсивности теплоотдачи с уменьшением величины недогрева. Во второй области, характеризующейся высокими тепловыми нагрузками, малыми значениями недогрева и определяемой $k_i > 0,05$, интенсивность теплообмена возрастает с увеличением величины недогрева. Полученная зависимость определяется уравнением [7]:

$$\frac{\bar{\alpha}}{\alpha_{lo}} = A K_w^{0,453} K_i^n Pr_f^{0,6} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,93}, \quad (8)$$

где $A = 12,5 \cdot 10^3$ и $n = 0,214$ при $K_i < 0,05$; $A = 2910$ и $n = -0,277$ при $K_i > 0,05$;

$$K_w = 0,1 \dots 2,0;$$

$$K_i = 0,005 \dots 3,500;$$

$$Pr_f = 1,5 \dots 25,0.$$

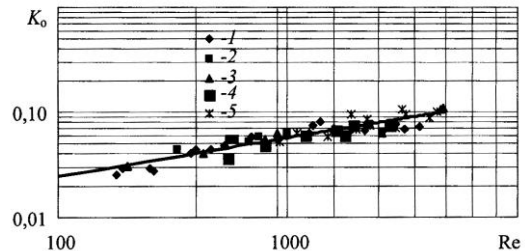
Изучение теплообмена при испарении стекающей пленки проводили при $c = 0 \dots 60$ % а.с.в. и температуре растворов, близкой к температуре насыщения. Визуальные наблюдения показали, что процессы теплообмена находились в области нагрева и испарения с поверхности. В результате анализа данных эксперимента получены зависимости для средней и максимальной скоростей пленки. По ним в исследуемом диапазоне значений чисел Рейнольдса идентифицированы ее характерные режимы течения.

Среднее значение критических чисел Рейнольдса: $Re < 1000$ – ламинарно-волновое течение; $Re > 3000$ – турбулентное течение. На основе данных по средней скорости пленки рассчитаны значения ее средней толщины. В результате анализа профилей температур гравитационно стекающей водяной пленки и локальных значений коэффициентов теплоотдачи при различных Re следует, что в диапазоне $Re = (4 \dots 14) \cdot 10^3$ можно выделить два участка. Первый, на котором происходил существенный рост теплоотдачи до максимального значения α_{max} на некотором расстоянии от входа в трубу, второй – за точкой максимума, на котором наблюдалось незначительное снижение теплоотдачи вследствие продолжающегося роста тол-

щины турбулентного пограничного слоя. Далее фиксировалась относительная стабили-

Рис. 7. Зависимость интенсивности теплоотдачи от числа Re ,

$K_o = \frac{Nu_m}{Pr^{0.75}}$: 1 – $b = 60$ % а.с.в.;
2 – 50; 3 – 45; 4 – 30; 5 – 20 % а.с.в.



зация. При более низких значениях Re проявился еще один участок – начальный, на котором теплоотдача уменьшалась сразу, начиная от входа раствора в трубу. Длина начального участка увеличивалась при уменьшении числа Re и с увеличением числа Re . Данные по теплоотдаче к стабилизированным испаряющимся пленкам щелоков сульфатного производства с концентрацией до 60 % приведены на рис. 7 в координатах $K_o = f(Re)$, где

$$K_o = \frac{Nu_m}{Pr^{0.75}}.$$

Представленная на рис. 7 зависимость описывается уравнением [6]:

$$Nu_m = 0,0044Re^{0,37}Pr^{0,75}K_q^n, \quad (9)$$

где $Re = (0,2 \dots 10,0) \cdot 10^3$; $Pr = 1,5 \dots 25,0$; $K_q = \frac{q\ell}{r\rho v}$.

Для определения влияния накипеобразования на тепловой режим работы станции, изменение нагрузок поверхности испарения и концентраций щелоков по ВА проведены исследования режимов работы трех ВС Котласского ЦБК в течение года. Для характеристики процесса накипеобразования определяли термический коэффициент накипеобразования

$$\psi = \frac{R_n}{ut}, \quad (10)$$

где $R_n = \left(\frac{\delta}{\lambda} \right)_n$ – условное термическое сопротивление накипи, $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Вт}$;

δ_n – толщина слоя накипи, м;

λ_n – коэффициент теплопроводности накипи, Вт/(м·°C);

$u = W/F$ – массовое напряжение поверхности теплообмена, кг/(м²·с);

$W = S(1 - c/C)$ – количество выпаренной в ВА влаги, кг/с;

S – количество раствора, подаваемого в ВА на выпаривание, кг/с;

c, C – концентрации раствора на входе и выходе из ВА, % а.с.в.;

F – поверхность теплообмена ВА, м²;

t – время работы ВА после промывки, сут.

Принято, что разность между термическим сопротивлением теплопередачи, определенным в результате промышленных исследований батарей, и их расчетным значением является условным термическим сопротивлением накипи:

$$R_n = \frac{1}{K_n} - \frac{1}{K_p}, \quad (11)$$

где K_n и K_p – коэффициент теплопередачи, полученный в результате исследования режимов работы ВС, и теоретический (расчетный) коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С).

Результаты исследований показали, что для большинства аппаратов K_n убывал со временем. Регулярные промывки выпарных аппаратов, проводившиеся через 10 сут их работы, оказались малоэффективными. Необходимо отметить, что по мере их загрязнения приходится постепенно увеличивать параметры греющего пара, поступающего в 1-й корпус ВС, для сохранения ее производительности. При этом изменение температурного режима характеризовалось тем, что после промывки станция имела определенный запас производительности исходя из разности расчетного и реального температурных напоров:

$$\sum \Delta T_{\text{зап}} = \sum \Delta T_p - \sum \Delta T_d, \quad (12)$$

где $\sum \Delta T_p$ – расчетный температурный напор;

$\sum \Delta T_d$ – реальный (действительный) температурный напор.

При достижении $\sum \Delta T_{\text{зап}} = 0$ обеспечение производительности ВС становится невозможным, т.е. либо необходимо очистить ее поверхность от накипи, либо ВС будет работать с постепенно уменьшающейся производительностью.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что условные термические сопротивления накипи составляют для большинства ВА примерно 20 % (для отдельных 45 %) от полного термического сопротивления теплопередаче. На основании представленных данных появляются дополнительные возможности для проведения наиболее рациональных мероприятий по экономии энергоресурсов, увеличению производительности ВС ЦБК, достигаемых за счет уменьшения накипи. Ежесуточный прирост термического сопротивления накипи определяли для каждого корпуса по следующей зависимости:

$$\Delta R_n = \frac{R_{\text{нач}} - R_{\text{кон}}}{\tau}, \quad (13)$$

где $R_{\text{нач}}$, $R_{\text{кон}}$ – условные термические сопротивления накипи в ВА в начале и в конце эксперимента;

τ – продолжительность работы аппарата.

Постепенное увеличение R_n связано с повышением содержания накипееобразователей в сульфатном щелоке и зависит главным образом от увеличения их концентрации в растворе.

9*

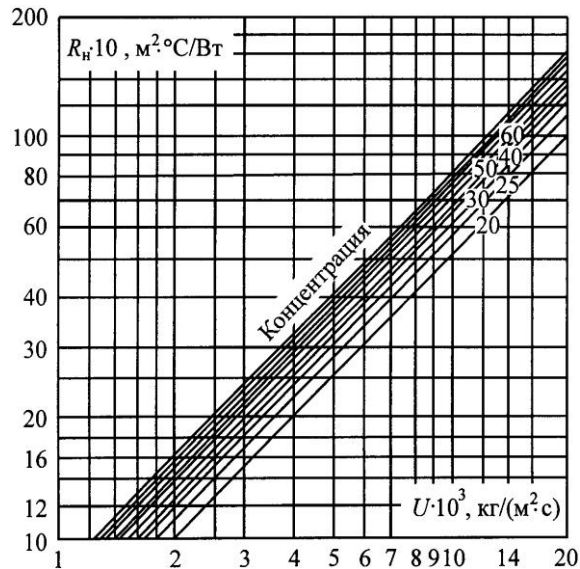


Рис. 8. Среднесуточный прирост термического сопротивления накипи

Среднесуточный прирост накипи (рис. 8) определяли [8] как

$$R_n = 1,658 \cdot 10^{-3} \cdot c^{0,37} \quad (14)$$

Составленные номограммы для расчета оптимального периода работы между промывками ВС ЦБК и расчетные зависимости являются основой для квалифицированного управления работой ВС, обеспечивают максимальную продолжительность эксплуатации между стадиями промывки при заданной производительности и, соответственно, повышение производительности предприятия в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреевский, А.А. Анализ зависимостей для расчета коэффициентов теплообмена при течении в парогенерирующих каналах жидкости, нагретой до температуры насыщения [Текст] / А.А. Андреевский, В.М. Боришанский, В.Н. Фромзель, Б.С. Фокин // ИФЖ. – 1974. – Т. 26, № 1. – С. 142–164.
2. Бакластов, А.М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника [Текст]: справ. / А.М. Бакластов [и др.]; под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 552 с.
3. Прядко, Н.А. Совершенствование теплообменных аппаратов и установок пищевой промышленности [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Прядко Н.А.. – К., 1986. – 26 с.
4. Сорокин, А.Ф. Тепло- и массообмен при кипении растворов в выпарных установках [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / А.Ф. Сорокин. – М., 1956. – 26 с.
5. Сулов, В.А. Зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи при кипении от параметров и структур двухфазных пенообразующих водных растворов [Текст] / В.А. Сулов // Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С. 74–77.

6. *Суслов, В.А.* Исследование гидродинамики и теплоотдачи при гравитационном стекании пленки сульфатного шелока в вертикальной трубе выпарного аппарата [Текст] / В.А. Суслов, Г.В. Рижинашвили // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2005. – № 5. – С. 68–71.

7. *Суслов, В.А.* Исследование теплообмена при кипении отработанных щелочных растворов в трубах выпарных аппаратов [Текст] / В.А. Суслов // Теплоэнергетика. – 2005. – № 8. – С. 68–71.

8. *Суслов, В.А.* Определение коэффициентов накипеобразования на выпарных батареях целлюлозно-бумажных комбинатов [Текст] / В.А. Суслов // Лесн. журн. – 2005. – № 1-2. – С. 86–99. – (Изв. высш. учеб. заведений).

9. *Суслов, В.А.* Результаты промышленных исследований режимов работы выпарных станций ЦБП и их сопоставление по эффективности выпаривания [Текст] / В.А. Суслов // Лесн. журн. – 2005. – № 1-2. – С. 168–172. – (Изв. высш. учеб. заведений).

10. *Суслов, В.А.* Сопоставление тепловой эффективности выпарных станций сульфатного производства, поставляемых на предприятия ЦБП зарубежными фирмами [Текст] / В.А. Суслов, С.В. Антуфьев, В.Л. Мовсесян // Машины и оборудование ЦБП: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТА, 1977. – Вып. 5. – С. 131–133.

11. *Суслов, В.А.* Стенд для исследования процесса накипеобразования в кипящих трубах выпарных аппаратов ЦБП [Текст] / В.А. Суслов, В.В. Семенов // Машины и аппараты ЦБП: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТИ ЦБП, 1989. – С. 91–92.

12. *Тобилевич, Н.Ю.* Исследование рабочих процессов при выпаривании сахарных растворов [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / Тобилевич Н.Ю. – К., 1969. – 26 с.

13. *Cathro, K.J.* Heat transfer to liquids boiling inside tubes [Text] / K.J. Cathro, W.F. Tait // Australian journal of Applied science. – 1957. – Vol. 8, N 4. – P. 279–304.

14. *Gudmundson, G.* Heat transfer in industrial black liquor evaporation plants [Text] / G. Gudmundson // University of Technology. – Geteborg, 1973. – P. 161.

15. *Moles, F.D.* Boiling heat transfer to subcooled liquids under condition of forced convection [Text] / F.D. Moles, J.H.G. Show // Trans. Institute Chemical Engineers. – 1972. – Vol. 50. – P. 76–84.

16. *Myers, J.G.* Time and space resolve wall temperature and heat flux measurements during nucleate boiling with constant heat flux boundary conditions [Text] / J.G. Myers [and et.] // Int. of Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48. – P. 2429–2442.

17. *Takeda, H.* Vapor hold up boiling heat transfer coefficient of natural circulation vertical tube evaporator [Text] / H. Takeda, T. Hayakawa, S. Fujita // Kagaku kagaku. – 1972. – Vol. 36, N 7. – P. 760–768.

Поступила 13.04.06

С.-Петербургский государственный
технологический университет
растительных полимеров

V.A. Suslov

Efficiency Enhancement of Worked-out Cooking Liquor Recovery of Pulp Enterprises

The perfection ways of energy use are offered resulting from the realized industrial, bench-testing and theoretical investigation of evaporator stations operating conditions. The possibility is shown experimentally and parameters are provided for deposit-free eva-

porating of foam solutions at pulp-and-paper productions in the long-pipe devices with a gravity flow of the evaporated solution.