

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2022

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING

С Новым
годом!



DOI: 10.34831/EP.2022.17.97.004

Некоторые условия для эффективного выпаривания пенообразующих растворов в целлюлозно-бумажном производстве

Суслов В. А., доктор техн. наук

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

Представлены рекомендации для наилучшей организации процесса выпаривания в выпарных аппаратах (ВА) при кипении пенообразующих растворов в трубах и каналах. Для анализа использовались отработанные варочные щелоки сульфатного производства целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП), мыльных стоков и сахарных растворов.

Ключевые слова: выпаривание, кипение растворов в трубах и каналах ВА; коэффициент теплоотдачи, кризисы кипения; интенсификация теплоотдачи.

Для получения целлюлозы растительные целлюлозосодержащие ткани, предварительно подвергнутые механической и химико-механической обработке, выдерживают при определенной температуре и давлении в щелочном растворе едкого натра и сульфида натрия в соотношении примерно 70 % и 30 %. При этом все компоненты древесной ткани за исключением целлюлозы растворяются в растворе. Такой водный щелочной раствор после варки называют черным сульфатным щелоком, состоящим на 1/3 из неорганических и на 2/3 из органических веществ. Для получения одной тонны целлюлозы сульфатным способом затрачивается порядка 10 т чистой воды, превращаемой в процессе производства в агрессивные растворы. Поэтому для сохранения экологии региона черный сульфатный щелок подвергается комплексной обработке в процессе сжигания органики и регенерации химикатов в содорегенерационных котлоагрегатах (СРК), попутно генерирующих пар для производства электроэнергии и технологических нужд.

Для доведения сухости щелока, пригодной к устойчивому сжиганию, раствор концентрируют на выпарных станциях (ВС) до концентрации абсолютно сухих веществ (а.с.в.) 65 – 75 %.

Таким образом, ВС одновременно являются участниками технологического цикла и процесса производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, обеспечивая снижение себестоимости продукции и экологическую безопасность региона.

Увеличение выпуска целлюлозы обуславливает возрастание производительности ВС, что достигается за счет увеличения поверхности теплообмена ВА и совершенствования

тепловых схем ВС. Однако увеличение поверхности теплообмена ВА создаёт проблемы обеспечения равномерности омывания поверхности раствором и обогрева паром, усиления процесса накипеобразования, появления тепловой и гидродинамической разверок, различных режимных неравномерностей по сечению кипящего пучка. Всё это приводит к ухудшению работы ВС и более частым остановкам ВА на промывку. Уменьшение поверхности теплообмена ВС за счёт повышения эффективности работы достигается оптимизацией их тепловых схем, совершенствованием традиционных и разработкой новых ВА, интенсификацией процесса кипения и изысканием эффективных методов борьбы с накипеобразованием,

Эффективный режим работы и производительность ВС в значительной мере зависят от правильного выбора количества ступеней выпаривания и схемы питания ВА. При непрерывном методе выпаривания многоступенчатые ВС ЦБП комплектуются ВА поверхностного типа с использованием образующегося над раствором вторичного пара данной ступени в последующих ступенях с более низким давлением. Температуру греющего теплоносителя и кипящего раствора в каждом отдельном случае выбирают с учетом свойств выпариваемого раствора, минимальной стоимости выпарной установки и наименьших эксплуатационных затрат.

По теплотехническим признакам ВС подразделяют на несколько групп: по принципу действия — рекуперативные, контактные и адиабатные; по числу ступеней выпаривания — одноступенчатые и многоступенчатые; по давлению вторичного пара в последней ступени — противодавленческие и вакуум-выпарные; по подводу первичной теплоты — с од-

ним источником первичной теплоты, с несколькими источниками, с тепловыми насосами; по технологии обработки раствора — одностадийные и многостадийные; по относительному движению теплоносителя и выпариваемого раствора — прямоточные, противоточные, со смешанным питанием корпусов, с параллельным питанием корпусов раствором.

Для использования теплоты щёлоча, подаваемого на ВС после подготовки и имеющего температуру 80–90 °С, в ЦБП применяются ВС со смешанной или противоточной схемой питания корпусов.

С увеличением количества ступеней выпаривания удельный расход свежего пара, поступающего на ВС, уменьшается. Данные работы [1] показывают, что при неограниченном увеличением количества ВА наступает снижение экономии, получаемой от уменьшения расхода свежего пара. Это указывает на необходимость ограничения количества корпусов. Поэтому ВС ЦБП работают по пяти- или шестиступенчатой смешанной схеме выпаривания с ВА поверхностного типа при поднимающемся или гравитационном течении раствора [1, 2].

Тепловая эффективность работы ВА во многом зависит от формирования по высоте кипячительных каналов зон с различными режимами течения и кипения раствора, определяющих совокупностью значений режимных параметров: тепловой нагрузки, скорости циркуляции, концентрации раствора, его перегрева или недогрева до состояния насыщения. Наиболее доступным показателем режима работы ВА, характеризующего формирование указанных зон, является кажущийся уровень заполнения кипячительных каналов L_k , измеряемый с помощью водомерного стекла ВА.

Объёмы экономайзерного участка и зоны ухудшенной теплоотдачи в кипячительном канале в зависимости от соотношения поступающих в ВА количеств теплоты и раствора могут принимать минимальные значения, обеспечивая высокие усредненные по всей поверхности теплообмена ВА коэффициенты теплоотдачи, в том числе и в ВА, выпаривающих раствор высокой концентрации [3, 4].

Из данных, представленных на рис. 1, следует, что при достижении значений L_k более 35 % и дальнейшем их увеличении при кипении растворов наблюдалось снижение интенсивности теплообмена. При выпаривании щелочков с концентрацией $b < 35$ % оптимальными значениями являлись $L_k = 20 \div 40$ % от высоты кипячительного канала, а для щелочков более высокой концентрации — $L_k =$

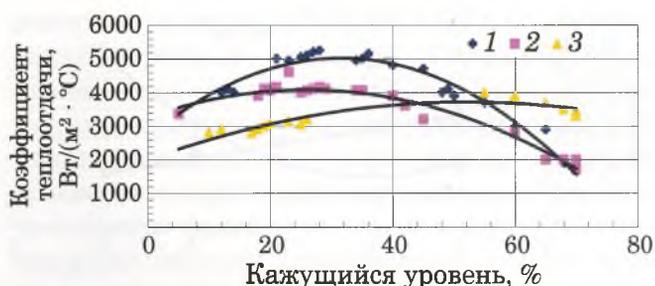


Рис. 1. Зависимость интенсивности теплообмена при выпаривании от кажущегося уровня [5]:

1 — $q = 10$ кВт/м², $b = 20$ % а.с.в; 2 — $q = 30$ кВт/м², $b = 30$ % а.с.в; 3 — $q = 60$ кВт/м², $b = 40$ % а.с.в

$= 50 \div 70$ %. Влияние q при увеличении концентрации раствора уменьшалось и усиливалось влияние скорости. Оптимальный режим выпаривания с максимальным коэффициентом теплоотдачи α_{\max} и соответствующим кажущимся уровнем заполнения кипячительной трубы L_k достигался при одновременном возрастании значений плотности теплового потока и скорости циркуляции раствора $w_0 = G/(\rho' \cdot f)$. Здесь G и ρ' — расход раствора на входе в канал, кг/с, и его плотность, кг/м³, при температуре кипения; f — площадь проходного сечения кипячительного канала, м².

Следовательно, в аппаратах, выпаривающих растворы высокой концентрации, следует поддерживать повышенный кажущийся уровень. При этом наряду с удовлетворительной теплоотдачей снижается накипеобразование в каналах. В работе [5] показано, что в зависимости от L_k даже при кипении высококонцентрированных сульфатных щелочков среднее значение $\bar{\alpha}$ может быть выше, чем у слабо концентрированных. Это определяет более сильную зависимость теплоотдачи от гидродинамики, чем от плотности щелоча. Значение оптимального кажущегося уровня L_k достигается дополнительной подпиткой ВА раствором.

Для получения оптимального распределения скоростей смеси в кипячительных каналах ВА при проектировании имеются компоновочные и конструктивные решения уменьшения проходного сечения для раствора [3]. Некоторые ВС состоят из девяти парных, работающих параллельно, ВА с использованием на одной, первой по ходу раствора, ступени испарения. Имеются ВС с последними по ходу раствора ВА в двухходовом исполнении: подъемным и опускным или двумя ВА с подъемным движением раствора [2]. Следует отметить, что эти ВА, обогреваемые острым паром, в соот-

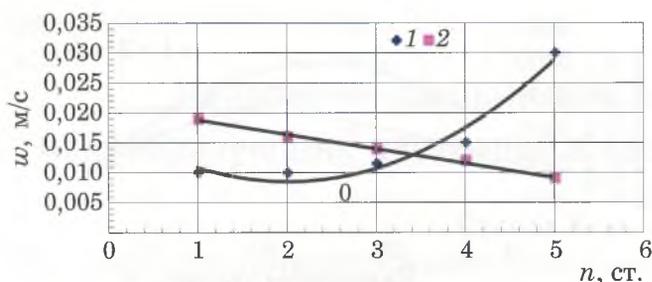


Рис. 2. Значения реального (2) и необходимого (1) изменения скорости циркуляции раствора в ВА по мере его выпаривания на ВС:

n — номер ступени ВС (корпуса) по ходу раствора

ветствии с принципом многоступенчатости должны обеспечивать максимальную производительность всей ВС.

Промышленные исследования режимов работы ВС показали [6], что на ВС, укомплектованных ВА с равной поверхностью теплообмена (проходным сечением), происходит уменьшение поступающего в ВА расхода раствора и снижение его скорости вследствие выпаривания на ВС (рис. 2, кривая 2).

В ВА, работающих при гравитационно стекающем растворе, неразрывное его течение по всей поверхности испарения возможно при условии

$$G > G_{\min} \approx 0,252 \cdot 10^{10} \sigma^{3,6} \mu^{0,49},$$

где G_{\min} — минимальная плотность орошения, при наличии которой вся поверхность орошения покрыта сплошной пленкой; σ и μ — коэффициенты поверхностного натяжения и динамической вязкости [7].

При $G < G_{\min}$ возможны разрывы пленки и появление сухих пятен, характеризующих образование зоны ухудшенной теплоотдачи.

Данные работ [8, 9] показывают, что предельные значения паросодержаний парорастворной смеси на выходе из кипящего канала, при которых коэффициенты теплоотдачи снижались, определяются тепловой нагрузкой, параметрами и режимами течения двухфазной смеси, а также теплофизическими свойствами раствора. Так, с повышением концентрации раствора предельное значение паросодержания двухфазной смеси уменьшалось при одновременном снижении коэффициента теплоотдачи в верхней части трубы.

Известно, что накипеобразование на испарительной поверхности связано с процессом кипения раствора. При этом усиленное накипеобразование в трубах и каналах ВА, приводящее к выходу ВА из эксплуатации, происходит при достижении тепловой нагрузкой критических плотностей $q_{кр}$ при образовании зоны ухудшенной теплоотдачи. На рис. 3 представлена зависимость критической тепловой нагрузки от паросодержания при кипении отработанных варочных пенообразующих растворов ЦБП [5, 10].

Из рис. 3 видно, что данные для пенных растворов качественно корреспондируются с аналогичной зависимостью для воды, но значения $q_{кр}$ ограничиваются очень узким диапазоном значений паросодержания x вследствие пенообразующих свойств растворов [10, 11].

Результаты исследований [10] показали, что с ростом массовой скорости значения $q_{кр}$ возрастают при отрицательных паросодержаниях и уменьшаются при положительных. Значение $q_{кр}$ больше при выпаривании концентрированных растворов вследствие повышения устойчивости пристенной пленки и понижения способности раствора к вспениванию. Паросодержание пароцеллюлозной смеси

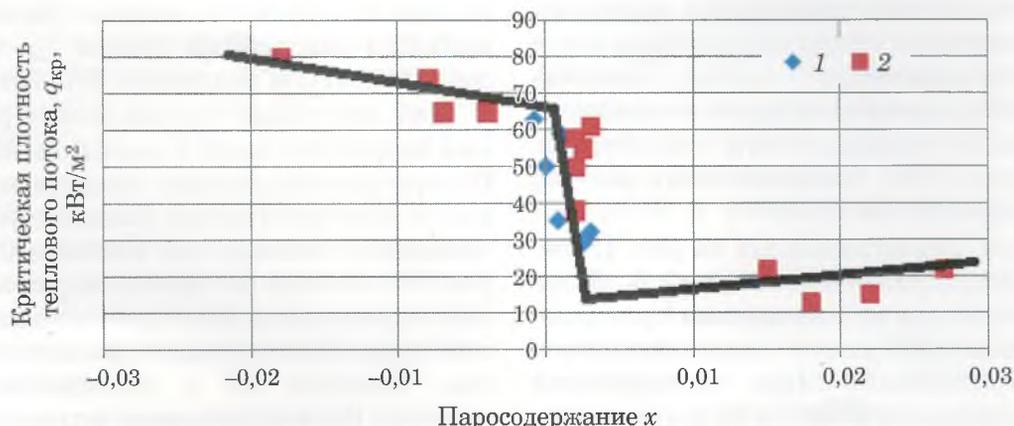


Рис. 3. Зависимость $q = f(x)$ для кризисных условий при кипении черного сульфатного щелока:

$\rho w = 25 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}); w_0 = 0,015 - 0,025 \text{ м}/\text{с}; 1 - b < 30 \%; 2 - b > 30 \%$ а.с.в.

в интервале $x = 0 \div 0,003$ не влияет на критическую плотность теплового потока.

Для предотвращения вероятности возникновения кризиса в условиях пузырькового режима кипения на начальном участке кипящей трубы, возникающего при образовании паровой прослойки, разрушающей пристенную жидкую пленку и отделяющей жидкую фазу от теплопередающей поверхности, следует поддерживать недогрев пенообразующих растворов на входе в ВА до температуры насыщения в пределах $\delta t_n = 8 \div 10$ °C и скорость растворов в кипящих каналах и трубах не менее $w = 0,07 \div 0,09$ м/с.

Из приведенных в работе [5] данных следует, что с изменением паросодержания изменяется механизм кризиса кипения. При отрицательных значениях паросодержания кризис теплоотдачи возникал в результате нарушения гидродинамической устойчивости потока пара, движущегося от стенки, и встречного потока жидкости, что согласуется с [12]. При положительных значениях x наблюдалось высыхание пленки раствора, как указывалось в [13]. В этом случае, как следует из работы [14], $q_{кр}$ определяется расходом теплоносителя, давлением, размерами кипящей трубы, пульсациями расхода, состоянием поверхности, характером распределения q_w по длине трубы и т. д.

В наших опытах эмульсионный либо дисперсно-кольцевой режим течения в кипящей трубе регистрировался при невысоких положительных значениях паросодержаний парожидкостной смеси. Согласно [14] в этих условиях кризис кипения возникал в результате высыхания на поверхности канала жидкой микропленки. Расход жидкости в микропленке при заданном давлении зависит от массовой скорости, расходного массового паросодержания и концентрации раствора [15]. Увеличение массовой скорости в диапазоне её изменения $\rho w = 10 \div 100$ кг/(м²·°C) увеличивало $q_{кр}$. При этом недогрев раствора до температуры насыщения $\delta t_n = < 30$ °C не влиял на изменение её значения.

Критическую плотность теплового потока $q_{кр}$ при кипении пенообразующих растворов ЦБП на этом участке рассчитывали по уравнению [5]:

$$q_{кр} = 525 \cdot 10^{-5} \frac{(\rho w)^{0,31} b^{0,88}}{x^{0,75}},$$

где $b = 20 \div 60$ % а.с.в — концентрация раствора; $\delta t_n = 1 \div 30$ °C — недогрев раствора до температуры кипения; $\rho w = 10 \div 100$ кг/(м²·°C) —

массовая скорость; $x = 0,001 \div 0,01$ — массовое паросодержание раствора. Гидравлическая схема ВА из пучка кипящих труб, объединенных приемной камерой, может оказаться неустойчивой из-за возникновения на входе и выходе из труб пульсаций расхода. При этом увеличение расхода на входе в одном или нескольких каналах одновременно сопровождается снижением расхода на входе в остальных. Временное уменьшение расхода раствора при постоянном подводе теплоты к потоку в трубе приведёт 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 массового паросодержания критическая плотность теплового потока для режима с пульсациями расхода может быть в несколько раз меньше, чем для беспульсационного режима [17]. Пульсации наиболее интенсивны при значительном недогреве жидкости на входе в трубу и паросодержаниях жидкости, близких к нулю, на выходе из трубы. При $x = 0$ наличие пульсаций приводит к снижению $q_{кр}$ до 5 раз. Вследствие значительного снижения $q_{кр}$ пульсационные режимы в парогенерирующих каналах нежелательны. Для равномерной подачи раствора в трубки кипящего пучка, снижения в них пульсаций расхода и повышения таким образом устойчивости работы ВА в каждой трубе желательно устанавливать шайбы или под нижней трубной доской устанавливать устройство в виде сетки [18]. Также необходимо уделять внимание очистке выпариваемого раствора и поверхности теплообмена. Даже незначительные отложения накипи на стенке кипящего канала могут стать причиной появления пульсации, вызывающих ухудшение теплоотдачи и, следовательно, повышенное накипеобразование.

Анализ приведенных в работе [10] опытных данных показал неоднозначность влияния плотности теплового потока на теплоотдачу. В работе [17] указывается на возможность интенсивного удаления влаги из растворов в условиях поверхностного испарения при подавлении пузырькового кипения. При этом уменьшается градиент концентрации раствора у теплообменной поверхности, что снижает вероятность образования накипи. Кроме того, уменьшаются унос раствора с паром и вспенивание, характерные для щелоков ЦБП.

Для предотвращения возникновения пузырькового кипения в условиях гравитационного течения согласно методике, приведенной

в работах [5, 19], должны поддерживаться соответствующие предельные температурные напоры между стенкой трубы и раствором, зависящие от концентрации выпариваемого раствора ($\Delta t = 2 \div 12$ °C). При этом может быть обеспечен безнакипный процесс выпаривания.

В эксплуатации встречаются ВА с падающей пленкой, работающие по принципу противотока фаз. Для выпаривания пенных растворов применение подобных ВА нецелесообразно. В таких ВА пленка выпариваемого раствора стекает по внутренним стенкам кипятильных каналов, а пар, поднимаясь, в центре этих каналов барботирует через слой раствора, подаваемого в аппарат на верхнюю трубную доску, образуя пену, затрудняющую выпаривание.

Применяются ВА с ламельной поверхностью теплообмена для выпаривания гравитационно стекающей пленки раствора. Два сваренных листа из профилированной выгнуто-вогнутой поверхности составляют ламель. Ламели объединяются в пакет на расстоянии нескольких сантиметров одна от другой. Пар движется по каналам, образованным профилированными листами внутри ламели. Выпариваемый раствор стекает по наружной поверхности листов. Данные аппараты отличаются высокими коэффициентами компактности поверхности теплообмена.

В работе [4] показано, что производительность противоточных ВС можно увеличить за счет применения в первых ступенях ВС по ходу пара, выпаривающих концентрированные растворы, ВА с падающей пленкой, а в остальных ступенях — выпаривающих растворов меньшей концентрации — с восходящей пленкой. При этом большая длина трубы ВА ЦБП (≈ 10 м) способствует эффективному пенированию.

Для обеспечения устойчивого и экономичного режима выпаривания можно рекомендовать применение ВС в противоточном исполнении, комплектуемых последними по ходу выпариваемого раствора ВА с принудительной циркуляцией, выпаривающих раствор с концентрацией более 45 %.

Наличие на выпарной станции ВА с принудительной циркуляцией не исключает её комплектации концентраторами и расширителями, концентрирующими раствор до 75 — 80 % а.с.в [20, 21]. При этом первые по ходу выпаривания пенных слабоконцентрированных растворов ВА должны быть длиннотрубными с восходящим движением раствора для борьбы с пенообразованием и накипеобразованием.

Остальные ВА могут иметь пластинчатую или трубчатую поверхность теплообмена при гравитационном стекании пленки раствора.

Выводы

1. Современные выпаривающие пенообразующие растворы ВС ЦБП, укомплектованные ВА поверхностного типа с поднимающимся или гравитационным течением раствора, для повышения эффективности должны работать по шестиступенчатой противоточной схеме выпаривания.

2. С целью обеспечения оптимального теплообмена при минимальном накипеобразовании для выпаривания пенных растворов с концентрацией $b < 35$ % необходимо поддерживать оптимальные значения кажущегося уровня в интервале $L_k = 20 \div 40$ % от высоты кипятильного канала. Для щелоков с высокой концентрацией — $L_k = 50 \div 70$ %.

3. Для предотвращения вероятности возникновения кризиса в условиях пузырькового режима кипения на начальном участке кипятильной трубы, приводящего к интенсивному накипеобразованию, следует поддерживать на входе в ВА недогрев пенообразующих растворов до температуры насыщения в пределах $\delta t_n = 8 \div 10$ °C и скорость растворов в кипятильных каналах и трубах не менее $w = 0,07 \div 0,09$ м/с.

4. Увеличение массовой скорости раствора в диапазоне её изменения $\rho w = 10 \div 100$ кг/(м²·°C) повышает критическую плотность теплового потока при кризисе кипения в результате высыхания на поверхности жидкой микропленки в верхней части канала. При этом изменение её значения не зависит от недогрева раствора до температуры насыщения при $\delta t_n < 30$ °C.

5. Первые по ходу выпаривания пенных слабоконцентрированных растворов ВА должны быть длиннотрубными с восходящим движением раствора для борьбы с пенообразованием и накипеобразованием. Остальные ВА, комплектуемые ВС, могут иметь пластинчатую или трубчатую поверхность теплообмена при гравитационном стекании пленки раствора.

Список литературы

1. Мовсесян, В. Л. Выпарные аппараты и схемы выпарных станций ЦБП / В. Л. Мовсесян, В. А. Суслов // ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. Обзорная информация. — М., 1979, 50 с.
2. Суслов, В. А. Основные процессы при выпаривании щелоков целлюлозного производ-

- ства: **Учебное пособие** / В. А. Суслов. — СПб.: ГОУ ВПО СПб ГТУ РП СПб, 2004.
3. **Суслов, В. А. Оптимальные скорости подачи щелока в трубы выпарных аппаратов сульфат целлюлозного производства** / В. А. Суслов, Г. В. Рижинашвили // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС. Межвуз. сб. научн. тр. СПТИ ЦБП.
 4. **Слесаренко, В. Н. Исследование опреснения морской воды** / В. Н. Слесаренко, Ю. В. Якубовский, Б. Я. Карастлев // (ГОРОД?) Труды ДВПИ, 1971. — Т. 71. Вып. 2.
 5. **Суслов, В. А. Повышение эффективности выпаривания отработанных варочных растворов целлюлозного производства**. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. — Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2006.
 6. **Суслов, В. А. Результаты промышленных исследований режимов работы выпарных станций ЦБП** / В. А. Суслов // Машины и аппараты ЦБП. Межвуз. сб. научн. тр. Вып. 10 — ЛТИ ЦБП, 1982.
 7. **Тобилевич, Н. Ю. Кризис теплообмена при испарении в стекающей пленке жидкости при спутном движении жидкости и вторичного пара** / Н. Ю. Тобилевич, В. А. Ардашев. — Всесоюзная конференция «Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации». Тез. докладов. Т. 1. Пузырьковое, переходное и пленочное кипение. Кризисы кипения. Рига, 1982.
 8. **Толубинский, В. И. Механизм теплообмена при кипении и его интенсивность** / Толубинский В. И. — В кн. «Тепло-и массоперенос при фазовых превращениях». Ч. 1. — Минск, 1974.
 9. **Суслов, В. А. Исследование паросодержания двухфазного потока при кипении щелока целлюлозно-бумажной промышленности в длинных трубах** / В. А. Суслов, М. И. Чайка. — Тр. третьей Российской национальной конференции по теплообмену. — М.: Изд-во МЭИ, 2002.
 10. **Суслов, В. А. Кризисы теплообмена при кипении щелочных растворов в трубах выпарных аппаратов ЦБП** / В. А. Суслов. — Современная наука и образование в решении проблем экономики европейского севера. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию АЛТИ-АГТУ. Архангельск, 2004.
 11. **Ткаченко, С. И. Кризисные явления при кипении высоковязких сильно пенящихся растворов в большом объеме** / С. И. Ткаченко, В. З. Глоба, Ю. К. Пинчук. — Всесоюзная конференция «Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации». Тез. докладов. Т. 1. Пузырьковое, переходное и пленочное кипение. Кризисы кипения. Рига, 1982.
 12. **Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем** [Текст] / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. — М.: Энергия, 1976. — 296 с.: ил.
 13. **Мильман, О. О. Предельные тепловые нагрузки при кипении в теплообменниках с вертикальными трубами** / О. О. Мильман. — Всесоюзная конференция «Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации». Тез. докладов. Т. 1. Пузырьковое, переходное и пленочное кипение. Кризисы кипения. Рига, 1982.
 14. **Барулин, Ю. Д. Исследование теплогидравлических характеристик труб применительно к работе парогенераторов ТЭС** [Текст] / Ю. Д. Барулин // Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах: тез. докл. 8-й Всесоюзн. конф., т. 1. — Л., 1990. — С. 13 – 15.
 15. **Дорошук, В. Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах** / В. Е. Дорошук. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 167 с.
 16. **Невструева, Е. И. Взаимосвязь тепловых и гидродинамических характеристик в двухфазном неравновесном потоке** / Е. И. Невструева, В. В. Тютяев. — Сб. «Тепломассообмен – У», Т. 3, ч. 2, Минск, 1976, с. 13 – 20.
 17. **Петухов, Б. С. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учеб. пособие для ВУЗов**. — 2-е изд., перераб. и доп. / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 472 с., ил.
 18. **Тананайко Ю. М. Методы расчета и исследования пленочных процессов** / Ю. М. Тананайко, Е. Г. Воронцов. — Киев: Техника, 1975. — 311 с: ил.
 19. **Ардашев, В. А. Исследование теплообмена при выпаривании гравитационно стекающей пленки жидкости в вертикальных трубах**. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук, Киев, 1983.
 20. **Суслов, В. А. Теплообмен и гидродинамика пленочного течения в выпарных аппаратах целлюлозного производства** / В. А. Суслов, Г. В. Рижинашвили: Тр. Первой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 4, «Кипение, кризисы кипения, закритический теплообмен». — М.: Изд-во МЭИ, 1994. — С. 225 – 229.
 21. **Готовский, М. А., Тепломассообмен в технологических установках** / М. А. Готовский, В. А. Суслов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. — 420 с.

References

1. **Movsesyan V. L., Suslov V. A. Vyparnye apparaty i skhemy vyparnykh stantsii TsBP** (Evaporators and schemes of pulp and paper evaporation stations), TSINTIKHIMNEFTEMASH, Survey information, Moscow, 1979, 50 p.
2. **Suslov V. A. Osnovnye protsessy pri vyparivanii shchelokov tsellyuloznogo proizvodstva** (Basic processes in the evaporation of liquors from cellulose production), St. Petersburg, GOU VPO SPb GTU RP SPb, 2004.
3. **Suslov V. A., Rizhinashvili G. V. Optimal'nye skrorosti podachi shcheloka v truby vyparnykh apparatov sul'fat tsellyuloznogo proizvodstva** (Optimal rates of supplying liquor to pipes of evaporators sulfate cellulose production), Problems of saving fuel and energy resources at industrial enterprises and thermal power plants, Interuniversity collection scientific proceedings SPTI TsBP.
4. **Slesarenko V. N., Yakubovsky Yu. V., Karastlev B. Ya. Issledovanie opresneniya morskoi vody** (Research of seawater desalination), Proceedings of the Far Eastern Pedagogical Institute, 1971, Vol. 71, Issue 2.

5. **Suslov V. A.** *Povyshenie effektivnosti vyparivaniya otrabotannykh varochnykh rastvorov tsellyuloznogo proizvodstva* (Increasing the efficiency of evaporation of spent cooking liquors from cellulose production), Abstract of the thesis for the degree of Doctor of Tech. Scien., St. Petersburg, SPbSPU, 2006.
6. **Suslov V. A.** *Rezultaty promyshlennykh issledovaniy rezhimov raboty vyparnykh stantsii TsBP* (Results of industrial research of operating modes of pulp and paper evaporation stations), Machines and devices for pulp and paper industry, Interuniversity collection scientific proceedings, Issue 10, LTI TsBP, 1982.
7. **Tobilevich N. Yu., Ardashev V. A.** *Krizis teploobmena pri isparenii v stekayushchei plenke zhidkosti pri sputnom dvizhenii zhidkosti i vtorichnogo para* (Heat transfer crisis during evaporation in a falling liquid film during co-motion of liquid and secondary vapor), All-Union conference «Thermal physics and hydro-gas dynamics of boiling and condensation processes», Abstracts reports, Vol. 1, Bubble, transitional and film boiling, Boiling crises, Riga, 1982.
8. **Tolubinsky V. I.** *Mekhanizm teploobmena pri kipeanii i ego intensivnost'* (The mechanism of heat exchange during boiling and its intensity), Heat and mass transfer during phase transformations, Part 1, Minsk, 1974.
9. **Suslov V. A., Chaika M. I.** *Issledovanie parosoderzhaniya dvukhfaznogo potoka pri kipeanii shcheloka tsellyulozno-bumazhnoi promyshlennosti v dlinnykh trubakh* (Investigation of the vapor content of a two-phase flow during the boiling of liquor of the pulp and paper industry in long pipes), Proceedings third Russian national conference on heat transfer, Moscow, Publ. MPEI, 2002.
10. **Suslov V. A.** *Krizisy teploobmena pri kipeanii shchelochnykh rastvorov v trubakh vyparnykh apparatov TsBP* (Heat transfer crises during boiling of alkaline solutions in pipes of pulp and paper evaporators), Modern science and education in solving the problems of the economy of the European North, Materials of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 75th anniversary of ALTI-ASTU, Arkhangelsk, 2004.
11. **Tkachenko S. I., Globa V. Z., Pinchuk Yu. K.** *Krizisnye yavleniya pri kipeanii vysokovyazkikh sil'no penyashchikhsvya rastvorov v bol'shom ob'eme* (Crisis phenomena during boiling of highly viscous, highly foaming solutions in a large volume), All-Union conference «Thermal physics and hydro-gas dynamics of boiling and condensation processes», Abstracts reports, Vol. 1, Bubble, transitional and film boiling, Boiling crises, Riga, 1982.
12. **Kutateladze S. S., Styrikovich M. A.** *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* (Hydrodynamics of gas-liquid systems), Moscow, Energiya, 1976, 296 p.
13. **Milman O. O.** *Predel'nye teplovye nagruzki pri kipeanii v teploobmennikakh s vertikal'nymi trubami* (Limiting thermal loads during boiling in heat exchangers with vertical pipes), All-Union conference «Thermal physics and hydro-gas dynamics of boiling and condensation processes», Abstracts reports, Vol. 1, Bubble, transitional and film boiling, Boiling crises, Riga, 1982.
14. **Barulin Yu. D.** *Dvukhfaznyi potok v energeticheskikh mashinakh i apparatakh: tez. dokl. 8-i Vsesoyuzn. konferentsii* (Two-phase flow in power machines and devices: abstracts report 8th All-Union conference), Leningrad, Vol. 1, 1990, pp. 13 – 15.
15. **Doroshchuk V. E.** *Krizisy teploobmena pri kipeanii vody v trubakh* (Heat transfer crises during boiling water in pipes), Moscow, Energoatomizdat, 1983, 167 p.
16. **Nevstrueva E. I., Tyutyaev V. V.** *Sbornik «Teplo-massoobmen - Y»* (Collection «Heat and mass transfer - Y», Vol. 3, part 2, Minsk, 1976, p. 13 – 20).
17. **Petukhov B. S., Genin L. G., Kovalev S. A.** *Teploobmen v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh* (Heat transfer in nuclear power plants), Textbook manual for universities, Moscow, Energoatomizdat, 1986, 472 p.
18. **Tananaiko Yu. M., Vorontsov E. G.** *Metody rascheta i issledovaniya plenochnykh protsessov* (Methods of calculation and research of film processes), Kiev, Technics, 1975, 311 p.
19. **Ardashev V. A.** *Issledovanie teploobmena pri vyparivaniy gravitatsionno stekayushchei plenki zhidkosti v vertikal'nykh trubakh* (Investigation of heat transfer during evaporation of a gravitationally flowing liquid film in vertical pipes), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Kiev, 1983.
20. **Suslov V. A., Rizhinashvili G. V.** *Tr. Pervoi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu, «Kipenie, krizisy kipeaniya, zakrizisnyi teploobmen»* (Proceedings First Russian National Conference on Heat Transfer, «Boiling, boiling crises, post-crisis heat transfer»), Moscow, Publ. MPEI, Vol. 4, 1994, pp. 225 – 229.
21. **Gotovsky M. A., Suslov M. A.** *Teplo-massoobmen v tekhnologicheskikh ustanovkakh* (Heat and mass transfer in technological installations), St. Petersburg, Publ. Polytechnic University, 2017, 420 p.

vyachsuslov@mail.ru

Some conditions for efficient evaporation of foaming solutions in the pulp and paper industry

Suslov V. A.

Recommendations for the best arranging of the evaporation process in evaporators (VA) upon boiling foaming solutions in pipes and channels are presented. Spent cooking liquors of the sulfate production of the pulp and paper industry (PPI), soap stocks and sugar solutions were used for the analysis.

Keywords: evaporation, boiling of solutions in pipes and channels of evaporators; heat transfer coefficient, boiling crises; intensification of heat transfer.