

# ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2023 12

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING

С Днем  
энергетика!



DOI: 10.34831/EP.2023.44.47.004

## Метод управления режимами работы выпарных аппаратов по показаниям кажущегося уровня заполнения их кипяtilьных труб

Сулов В. А., доктор техн. наук

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

Предложен метод контроля управлением режимами работы выпарных аппаратов, основанный на показаниях уровней водомерных стекол. Рассмотрены вопросы теплообмена и гидродинамики при кипении восходящей парорастворной смеси в выпарных аппаратах целлюлозно-бумажного производства.

**Ключевые слова:** выпарные аппараты, теплоотдача, кипение, пенные растворы, двухфазная смесь, кажущийся уровень, скорость циркуляции.

Выпарные станции (ВС) широко применяются во многих отраслях промышленности. Так, ВС в процессе регенерации отработанных химикатов производства целлюлозы является одним из звеньев, обеспечивающих экономию химикатов и выполнение экологических требований по охране окружающей среды [1].

Интенсивность теплообмена, определяющая эффективность работы выпарного аппарата (ВА), определяется суммарным влиянием основных режимных параметров его работы: температурного напора, массовой скорости раствора, его концентрации, температуры недогрева до состояния насыщения, расходного массового паросодержания. Влияние этих параметров на теплообмен, как показано в [2, 3], проявляется через механизм формирования и перераспределения по высоте кипяtilьных труб ВА зон с различными режимами кипения раствора.

В соответствии с задачей исследования теплообмена при выпаривании отработанных растворов целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) был спроектирован и смонтирован экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 1 [4]. Основная рабочая часть стенда — кипяtilьная труба натуральных по отношению к выпарному аппарату размеров с установленными на ней измерительными датчиками. Интервал изменения гидродинамических и теплообменных параметров стенда позволял охватить весь диапазон работы промышленных ВС при выполнении основных требований теплового моделирования.

В качестве рабочих растворов использовались вода, отработанный (черный) сульфат-

ный щелок, полученный при варке хвойных пород и водный предгидролизат от лиственных пород древесины. Физико-технические характеристики растворов приведены в работе [5].

Замкнутый циркуляционный контур экспериментального стенда (рис. 1) состоял из однострубногo вертикального однопроводного ВА и вспомогательных элементов (подогревателей, конденсатора вторичного пара, мерников конденсата греющего и вторичного пара, водомерного стекла, электронагревателя греющего пара, бакового хозяйства, щелоковой ловушки, регулирующей и запорной арматуры).

При анализе полученных экспериментальных данных зону кипения недогретого раствора определяли между сечениями, где температура стенки и температура раствора достигали значений температуры насыщения. В этой зоне насыщения диапазон значений расходных массовых паросодержаний раствора соответствовал  $x_{н.к.} < x < 0$ , где  $x_{н.к.}$  — паросодержание начала кипения.

При достижении раствором температуры насыщения (при  $x = 0$ ) фиксировали начало зоны развитого кипения (пенного, так как исследовались пенообразующие растворы), характеризующегося низкими температурными напорами и относительно высокими коэффициентами теплоотдачи.

В процессе выпаривания влагосодержание потока уменьшалось, образовывалось двухфазное движение с увеличивающейся скоростью парорастворной смеси: кипящей плёнки раствора по стенке и влажного пара в центре трубы (пены). На этом участке дисперсно-

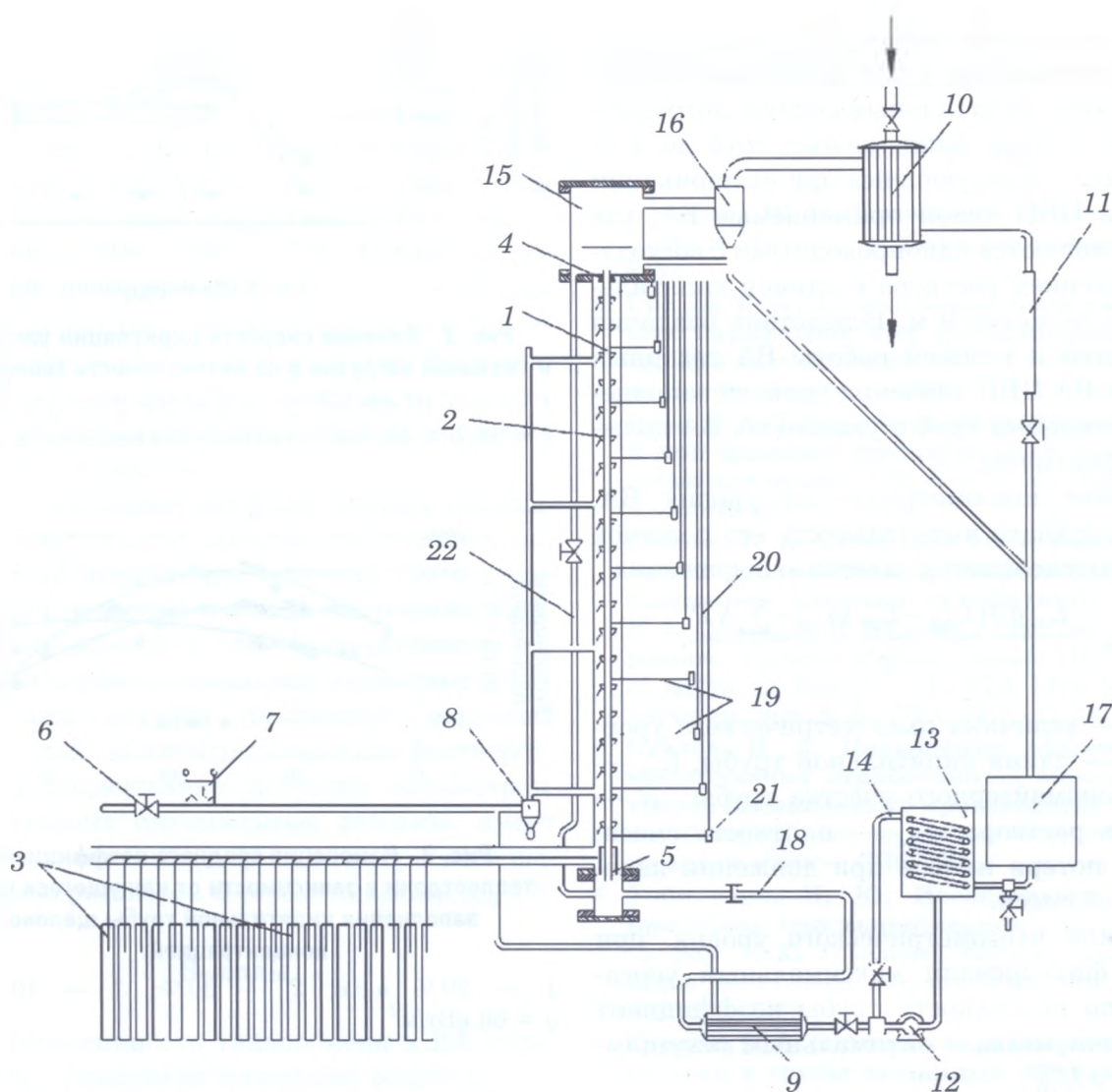


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — кипяtilьная труба; 2 — конденсатосборные стаканы; 3 — мерники конденсата; 4 — конус для отвода конденсата с верхней трубной доски; 5 — стакан отвода конденсата с нижней трубной доски; 6 — дроссельный вентиль; 7 — электрический нагреватель; 8 — водоотделитель; 9 — паровой подогреватель раствора; 10 — конденсатор вторичного пара; 11 — мерник конденсата; 12 — шестеренчатый насос; 13 — питательный бак; 14 — возвратная магистраль; 15 — сепаратор; 16 — тангенциальная щелочная ловушка; 17 — сборный бак; 18 — участок стабилизации для измерения скорости потока раствора; 19 и 20 — импульсные и пьезометрические трубки; 21 — буферные сосуды; 22 — водомерное стекло

кольцевого режима течения наблюдался значительный рост значений коэффициентов теплоотдачи.

По мере продвижения двухфазной смеси в область высоких паросодержаний контакт парорастворной смеси с поверхностью трубы уменьшался вследствие испарения из потока влаги, отмечались рост температуры стенки трубы и падение коэффициентов теплоотдачи. При паросодержании  $x = x_{кр}$  фиксировали кризис теплоотдачи, начиная с которого образовывалась зона ухудшенной теплоотдачи.

Показателем тепловой эффективности ВА, явившейся результатом перераспределения этих зон, как показано в [2, 6], может служить кажущийся уровень заполнения кипяtilьной трубы  $L_{ур}$ , измеренный по уровню установленного на ВА водомерного стекла или с помощью манометров. Работы по интенсификации режимов выпаривания ВА с помощью показаний водомерных стёкол, установленных на кипяtilьниках ВА сахарных заводов, были начаты с середины прошлого века Н. Ю. Тобилевичем [6]. Однако в этих ВА с многократной циркуля-

цией выпаривался сахарный, а не пенообразующий раствор, как на ВС ЦБП, поэтому использовались кипяtilьные секции погружного типа с длиной кипяtilьных труб до 4 м. Для борьбы с образующейся при выпаривании растворов ЦБП пеной применяемые ВА, как правило, являются однопроходными с восходящим движением раствора и длиной кипяtilьных труб не менее 9 м. Вследствие различия конструкций и условий работы ВА сахарных заводов и ВА ЦБП значения уровней заполнения кипяtilьных труб в указанных ВА должны быть различны.

Значение пьезометрического уровня ВА, характеризующее интенсивность его режимов работы, определялось с помощью выражения:

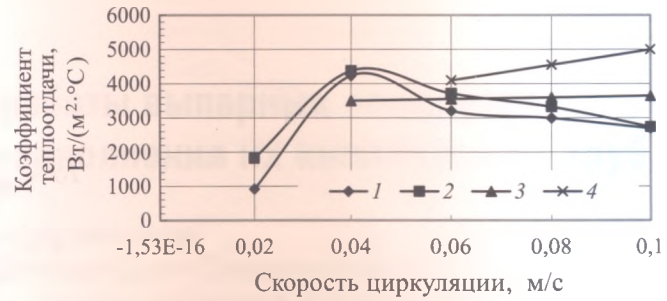
$$L_{ур} = \frac{L_{эк}\rho' + (L_{тр} - L_{эк})\rho_{см} + \sum \Delta P}{\rho'}$$

где  $L_{ур}$  — величина пьезометрического уровня;  $L_{тр}$  — длина кипяtilьной трубы;  $L_{эк}$  — длина экономайзерного участка трубы;  $\rho'$  — плотность раствора;  $\rho_{см}$  — плотность смеси;  $\sum \Delta P$  — потери напора при движении парорастворной смеси.

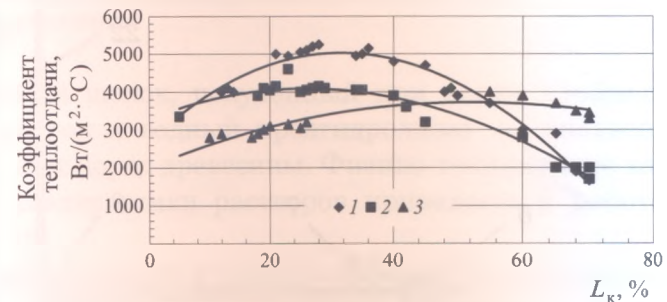
Значение пьезометрического уровня, при котором фиксировали максимальный усредненный по поверхности трубы коэффициент теплоотдачи, назвали оптимальным кажущимся уровнем  $L_{ур}^{opt}$ .

Представленные в работе [2] данные при кипении в трубе воды и растворов показали, что при определенных соотношениях между количествами теплоты пара и раствора, подаваемых в аппарат, достигаются высокие значения коэффициентов теплоотдачи, в том числе и в ВА, выпаривающих растворы высокой концентрации. Максимальное значение усредненного коэффициента теплоотдачи при кипении раствора с постоянной концентрацией на входе в трубу и неизменной тепловой нагрузкой определялось оптимальной скоростью циркуляции раствора  $w_{opt}$ . Оптимальный режим при  $\alpha_{max}$  достигался при одновременном возрастании плотности теплового потока и увеличении расхода выпариваемого раствора. При достижении критических тепловых нагрузок повышение скорости циркуляции раствора приводило к снижению темпа уменьшения  $\alpha$ .

Результаты проведенных исследований [7] и приведенных на рис. 2 подтверждают вывод о влиянии на интенсивность теплообмена ско-



**Рис. 2.** Влияние скорости циркуляции раствора и тепловой нагрузки  $q$  на интенсивность теплоотдачи: 1 —  $q = 10$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 —  $q = 30$ ; 3 —  $q = 60$ ; 4 —  $q = 90$ ;  $b = 40$  % абсолютно сухих веществ (а.с.в)



**Рис. 3.** Изменение среднего коэффициента теплоотдачи в зависимости от кажущегося уровня заполнения кипяtilьной трубы щелоком концентрацией:

1 — 20 % а.с.в; 2 — 30 %; 3 — 40 % при  $q = 60$  кВт/м<sup>2</sup>

рости циркуляции и тепловой нагрузки. При этом влияние тепловой нагрузки на участке пузырькового кипения недогретого до насыщения раствора особенно значительно. С увеличением концентрации кипящего раствора уменьшается влияние тепловой нагрузки на интенсивность кипения и усиливается её зависимость от скорости.

При достижении кажущегося уровня более 35 % и дальнейшем его увеличении при выпаривании раствора с концентрацией  $b \leq 30$  % наблюдалось снижение интенсивности теплообмена (рис. 3).

Оптимальный кажущийся уровень заполнения кипяtilьной трубы для всех режимов работы ВА, выпаривающих растворы данной концентрации, составляет 30 – 35 %. При выпаривании щелоков с концентрацией менее 30 % оптимальны уровни, составляющие 20 – 40 % высоты трубы, а для щелоков более высокой концентрации — уровни порядка 50 – 70 %.

Следовательно, в ВА для выпарки отработанных щелоков ЦБП высокой концентрации необходимо поддерживать повышенное значение кажущегося уровня. При этом отмечалось, что наряду с удовлетворительной теплоотдачей снижалось накипеобразование в трубах.

Также из рис. 3 следует, что в зависимости от  $L_k$  при выпаривании плотных щелоков значение  $\bar{\alpha}$  может быть выше, чем при выпаривании средних и слабых щелоков. Этот факт указывает на более сильную зависимость теплоотдачи от гидродинамики процесса кипения, чем от плотности щелока.

Представленные опытные данные показывают значительную зависимость теплоотдачи от скорости циркуляции раствора, его концентрации и плотности теплового потока. Особенно резкое падение  $\alpha$  при незначительном отклонении  $w_0$  от оптимальной скорости наблюдается при низких плотностях тепловых потоков для концентрированных растворов. Поэтому поддержание значений параметров, определяющих оптимальные режимы, имеет актуальное значение для ведения процесса выпаривания растворов с переменными  $q$ ,  $w_0$  и  $b$ .

### Выводы

1. Интенсивность теплообмена в ВА определяется суммарным влиянием основных режимных параметров: температурного напора, расходного массового паросодержания, массовой скорости раствора, его концентрации, температуры недогрева до состояния насыщения, что проявляется через механизм формирования и перераспределения по высоте кипяtilьных труб ВА зон с различными режимами кипения раствора.

2. Характеристикой эффективности перераспределения зон кипения может служить кажущийся уровень заполнения кипяtilьной трубы.

3. Зависимость теплоотдачи от гидродинамики процесса кипения более сильная, чем от плотности выпариваемых растворов.

4. Оптимальный кажущийся уровень заполнения кипяtilьных труб ВА ЦБП, выпаривающих раствор концентрацией от 30 до 50 % а.с.в, должен составлять порядка 30 – 35 % высоты трубы. Для концентрации щелока менее 30 % оптимальными являются уровни, составляющие 20 – 40 %, а для щело-

ков высокой концентрации (более 50 %) — уровни порядка 50 – 70 % высоты трубы.

### Список литературы

1. Непенин, Ю. Н. *Технология целлюлозы*. Том II / Ю. Н. Непенин. — М.: Гослесбумиздат, 1963. — 935 с.
2. Сулов, В. А. *Оптимальные значения режимных параметров при выпаривании черных сульфатных щелоков* / В. А. Сулов // *Целлюлоза*. Бумага. Картон. — 2006. — № 5. — 68 – 71 с.
3. Ягов, В. В. *Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учебное пособие для вузов* / В. В. Ягов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 542 с.
4. Сулов, В. А. *Стенд для исследования механизма теплообмена и гидродинамики при пленочном кипении сульфатного щелока* / В. А. Сулов, В. И. Кушнир // *Машины, конструирование, расчеты и оборудование ЦБП*. Межвуз. сб. научн. тр. Вып. 6. — Л.: ЛТА, 1978. Межвуз. сб. научн. тр., вып. 6.-Л., ЛТА, 1978.- С. 102 – 106.
5. Сулов, В. А. *Повышение эффективности выпаривания отработанных варочных растворов целлюлозного производства* / В. А. Сулов. Автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук. — СПб, 2006.
6. Тобилевич, Н. Ю. *Исследование рабочих процессов при выпаривании сахарных растворов* / Н. Ю. Тобилевич. Автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук. — Киев: КТИ ПП, 1969.
7. Сулов, В. А. *Оптимальные скорости подачи щелока в трубы выпарных аппаратов сульфат целлюлозного производства* / В. А. Сулов, Г. В. Рижинашвили // *Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС*. Межвуз. сб. научн. тр. — СПб.: СПбТИ ЦБП, 1992. — С. 19 – 21.

### References

1. Nepenin Yu. N. *Tekhnologiya tsellyulozy* (Cellulose technology), Moscow, Vol. II, Goslesbumizdat, 1963, 935 p.
2. Suslov V. A. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* (Cellulose. Paper. Cardboard), 2006, No. 5, pp. 68 – 71.
3. Yagov V. V. *Teploobmen v odnofaznykh sredakh i pri fazovykh prevrashcheniyakh* (Heat transfer in single-phase media and during phase transformations), Moscow, Publ. MPEI, 2014, 542 p.
4. Suslov V. A., Kushnir V. I. *Mashiny, konstruirovaniye, raschety i oborudovaniye TsBP* (Machines, design, calculations and equipment for pulp and paper industry), Vol. 6, Leningrad, LTA, Interuniversity Sat. scientific tr., pp. 102 – 106.
5. Suslov V. A. *Povysheniye effektivnosti vyparivaniya otrabotannykh varochnykh rastvorov tsellyuloznogo proizvodstva* (Increasing the efficiency of evaporation of waste cooking solutions from pulp production),

Abstract of the thesis for the degree of Doctor of Tech. Scien., St. Petersburg, 2006.

6. **Tobilevich N. Yu.** *Issledovanie rabochikh protsessov pri vyparivanii sakharnykh rastvorov* (Study of work processes during the evaporation of sugar solutions), Abstract of the thesis for the degree of Doctor of Tech. Scien., Kyiv, KTI PP, 1969.
7. **Suslov V. A., Rizhinashvili G. V.** *Problemy ekonomii toplivno-energeticheskikh resursov na prompredpriyatiyakh i TES* (Problems of saving fuel and energy resources at industrial enterprises and thermal power plants), Interuniversity Sat. scientific tr., St. Petersburg, SPbTI TsBP, 1992, pp. 19 – 21.

**vyachsuslov@mail. ru**

## **A method for controlling operation modes of evaporators by the indications of the apparent level of filling their boiling tubes**

Suslov V. A.

A method of controlling operation modes of evaporators based on the readings of the levels of water measuring glasses is proposed. The issues of heat transfer and hydrodynamics during boiling of an ascending two-phase mixture in the evaporators of pulp and paper production (PPP) are considered.

**Keywords:** evaporators, heat transfer, boiling solutions under conditions of an ascending two-phase mixture, apparent level, circulation rate.