

Ц

Pulp

еллюлоза

Б

Paper

умага

К

Board

артон

05 [2012]

- 
- Что будет в ВТО?
 - На российских предприятиях: Майкоп; Таганрог; Сокол; Пермь.
 - Киевский КБК отмечает юбилей.
 - Обзор Рынка: целлюлоза.
 - “Дискуссионный Клуб”
 - Новые разработки отечественных специалистов.
 - За рубежом.
 - Торговый Дом.
 - Конференции, семинары, выставки....
 - Исчезающие виды бумаги.

УДК 676.164.3.082.3

Эффективный интервал работы выпарных станций между промывками

В. А. Сулов,
А. А. Комиссаренков,
А. В. Гропянов, СПб ГТУ РП

Производительность целлюлозного производства в значительной мере определяется эффективностью работы его системы регенерации отработанных химикатов. Выпарные станции (ВС) – один из элементов этой системы. Правильная эксплуатация рационально подобранного и скомпонованного оборудования ВС должна обеспечить максимальную производительность и продолжительность ее работы до остановки на промывку:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (1)$$

где τ_1 – продолжительность работы ВС при постоянных режимных параметрах работы и концентрации выпаренного раствора; τ_2 – период работы ВС при постепенно снижающейся концентрации выпаренного раствора.

Продолжительность работы ВС при постоянной концентрации выпаренного раствора на выходе определяется по уравнению:

$$\tau_1 = \frac{\sum \Delta \tau_i - \sum 10^3 R_{oi} \cdot r_i \cdot U_i}{\sum 10^3 \psi_i R_{oi} \cdot U_i^2 \cdot r_i}, \text{ сутки,} \quad (2)$$

где $\sum \Delta \tau_i$ – сумма располагаемых температурных напоров в корпусах ВС, °C;

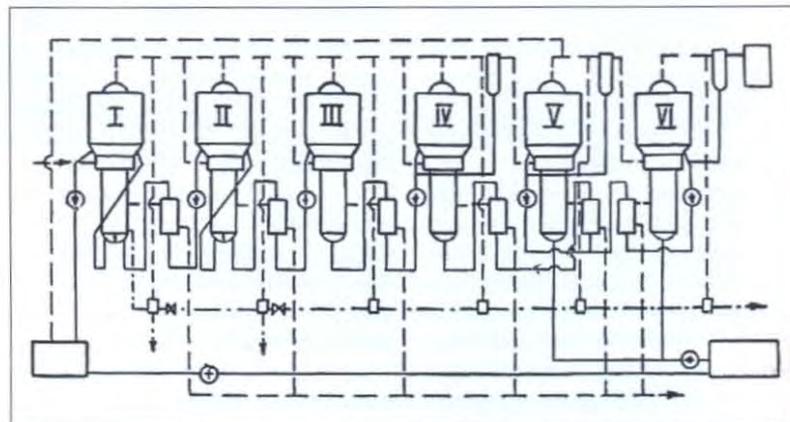


Рис. 1. Технологическая схема ВС КБП

$\sum 10^3 \cdot R_{oi} \cdot r_i \cdot U_i$ – сумма необходимых температурных напоров ВС;

$R_{oi} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$ – термическое сопротивление теплопередаче в безнакипном режиме; ($m^2 \cdot ^\circ C$); α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке кипятильной трубы выпарного аппарата (ВА) и от стенки к кипящему раствору соответственно, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$; $(\delta/\lambda)_{cr}$ – термическое сопротивление стенки трубы; r_i – теплота парообразования, $кДж/кг$; $U = w/F$ – массовое напряжение кипятильной поверхности ВА, $кг/(m^2 \cdot ^\circ C)$; $\sum 10^3 \psi_i \cdot U_i^2 \cdot r_i$ – необходимый ежесуточный прирост температурного напора; $\psi_i = \frac{R_n}{U \cdot \tau}$ – термический коэффициент накипобразования, характеризующий прирост термического сопротивления накипи в единицу

времени, отнесенного к одному килограмму выпаренной воды с единицы поверхности теплообмена ВА, ($m^2 \cdot ^\circ C$)/ $Вт \cdot кг$; $R_n = (\frac{\delta}{\lambda})_n$ – термическое сопротивление накипи; δ_n – толщина слоя накипи, $м$; λ_n – коэффициент теплопроводности накипи, $Вт/(m \cdot ^\circ C)$; $w = S(1 - b/B)$ – количество выпаренной в ВА влаги, $кг/с$; S – количество раствора, подаваемого в ВА на выпаривание, $кг/с$; b, B – концентрации раствора на входе и выходе из ВА соответственно, % а. с. в.; F – поверхность теплообмена ВА, m^2 .

Разность термических сопротивлений теплопередаче в ВА, определенных через определенные промежутки времени, является следствием приращения термического сопротивления накипи,

$$R_i = \frac{1}{\bar{E}_i} - \frac{1}{\bar{E}_i} \quad (3)$$

$$\text{где } \hat{E}_{i,j} = \frac{Q}{F \cdot \Delta t} = \frac{w \cdot r}{F \cdot \Delta t} = \frac{q}{\Delta t} = \frac{U \cdot r}{\Delta t}$$

– коэффициенты теплопередачи, полученные в разные интервалы времени в результате долговременных исследований работы ВС, Вт/(м² · °С); Q = w · r – тепловая нагрузка аппарата, Вт; Δt = t_{гр} – t_р – температурный напор; t_{гр} – температура греющего пара, °С; t_р – температура кипящего раствора, °С; q = Q/F – плотность теплового потока, Вт/м².

Для нахождения термического коэффициента накипеобразования в филиале ОАО «Группа «ИЛИМ» в г. Коряжме исследовались две шести-корпусные ВС картонно-бумажного производства (КБП) фирмы «Розенблад», работавшие по параллельным и равнозначным технологическим схемам и ВС фирмы «Парсон и Виттемор» на ТЭС-3. Технологическая схема ВС КБП приведена на рис. 1.

ВС КБП были укомплектованы равновеликими корпусами с поверхностью теплообмена 1540 м². Питание корпусов щелоком осуществлялось по противоточной схеме. Питательный щелок, плотностью 1100–1150 кг/м³ и температурой 75–92 °С подавался параллельно в Y и YI корпуса. Из них щелок через три подогревателя подавался в корпус IY. Далее, на первой ВС, щелок подавался в бак полуупаренного щелока (на схеме не показан), и затем противоточно через подогреватели в корпус III. На второй ВС щелок из корпуса IY через подогреватель поступал в III и по аналогии доходил до корпуса I, где достигалась окончательная концентрация раствора. Из корпуса I щелок поступал в бак крепкого щелока. Поскольку бак находился под давлением корпуса YI, в нем происходило самоиспарение раствора. Далее щелок поступал в сорогенерационный котлоагрегат. Греющий пар подавался в корпус I. Вторичный пар корпуса I являлся греющим паром для корпуса II и т. д. Вторичный пар корпуса YI направлялся в поверхностный конденсатор, а конденсат от каждого корпуса – в расширитель конденсата. Пары вскипания направлялись в паровую магистраль,

Таблица 1.

Типовой режим работы выпарной батареи № I КБП

Величина	Размерность	Корпуса				
		II	III	IY	Y	YI
t _{гр}	°С	142,9	118,6	104,4	89,3	80,8
Δt = t _{гр} – t _р	°С	16,8	9,1	10,2	3,9	4,9
t _р	°С	126,1	109,5	94,2	85,4	75,8
ϑ _i	°С	6,48	4,08	2,97	2,61	2,75
θ _i	°С	119,6	105,4	91,3	82,8	73,1
b _{вык}	%	48,5	38,0	32,0	28,0	27,5
ω _i	кг/с	9,0	9,1	6,12	10,0	3,21
S _i	кг/с	43,1	52,2	58,3	56,7	14,8
w _i	м/с	0,016	0,02	0,023	0,022	0,006
Q _i	кВт	19820	20396	13946	23006	7463
κ _н	Вт/(м ² · °С)	765	1450	1570	1840	984
κ _р	Вт/(м ² · °С)	2548	1989	1403	978	644
Rн * 10 ⁴	(м ² · °С)/Вт	9,15	1,87	2,11	-	-
U * 10 ³	кг/(с · м ²)	5,84	5,91	4,97	6,49	2,08

Таблица 2.

Типовой режим работы выпарной батареи № II КБП

Величина	Размерность	Корпуса				
		I	II	IY	Y	YI
t _{гр}	°С	138,2	127,1	117,0	101,5	79,6
Δt = t _{гр} – t _р	°С	4,5	4,3	6,9	5,4	1,8
t _р	°С	133,7	122,8	94,6	84,0	77,7
ϑ _i	°С	5,64	4,76	3,12	2,45	2,92
θ _i	°С	128,1	118,0	91,4	81,6	74,8
b _{вык}	%	45,5	41,5	32,5	26,5	31,5
ω _i	кг/с	2,14	6,90	5,34	3,80	3,76
S _i	кг/с	24,6	31,5	36,8	29,9	14,5
w _i	м/с	0,009	0,012	0,014	0,012	0,005
Q _i	кВт	4661	15227	12167	8754	8726
κ _н	Вт/(м ² · °С)	677	1294	1338	1045	2063
κ _р	Вт/(м ² · °С)	1658	1754	1388	760	650
Rн * 10 ⁴	(м ² · °С)/Вт	0,65	1,23	1,74	-	-
U * 10 ³	кг/(с · м ²)	1,39	4,48	3,47	2,47	2,44

конденсат – в конденсатную. Конденсат острого пара направлялся на ТЭЦ.

Типовые параметры режимов работы станции I приведены в табл. 1, второй – в табл. 2.

Технологическая схема ВС фирмы «Парсон и Виттемор» приведена на рис. 2.

Первая ступень испарения – аппараты с принудительной циркуляцией щелока с поверхностью теплообмена

1690 м². Аппараты в работу включались попеременно. II, III и IV корпуса имели одинаковую поверхность теплообмена, равную 1850 м². Корпуса V и VI были изготовлены с одинаковой поверхностью испарения – 2160 м². Острый пар подавался либо в I-AB, либо в I-CD корпуса. Для конденсации вторичного пара из последнего корпуса предусмотрен поверхностный конденсатор и паровой эжектор.

ВС работала по противоточной схеме питания корпусов. Черный щелок закачивался параллельно в корпуса V и VI. Далее он поступал в бак полуупаренного щелока, откуда противоточно прокачивался через подогреватель и корпуса IV и III. Далее он поступал в следующий по ходу движения подогреватель, корпус II и затем – в аппараты с принудительной циркуляцией щелока I-AB либо I-CD. Щелок из них поступал в трехступенчатый расширитель и далее – в бак крепкого щелока.

Греющий пар подавался в корпус I. Вторичный пар – I являлся греющим паром второго корпуса; вторичный пар корпуса II являлся греющим паром третьего и т. д. Вторичный пар из корпуса VI направлялся в поверхностный конденсатор, где конденсировалось основное количество пара, и затем в барометрический конденсатор.

Чистый конденсат поступал в двухступенчатый расширитель, пары вскипания из которого обогревали подогреватели щелока. Оставшийся конденсат возвращался на ТЭС. Грязные конденсаты перепускались последовательно через все выпарные аппараты и направлялись на очистку.

Параметры работы батареи приведены в табл. 3. В табл. 1-3 обозначено: t_i^j – температурная депрессия; θ_i – температура вторичного пара; $b_{\text{вых}}$ – концентрация на выходе из корпуса; ω_i – количество выпаренной корпусом влаги; S_i – расход раствора на входе в ВА; w_i – скорость циркуляции раствора; r_i – теплота парообразования; Q_i – тепловая нагрузка в корпусе; L_{yp} – высота кажущегося уровня заполнения кипяtilьной трубы ВА.

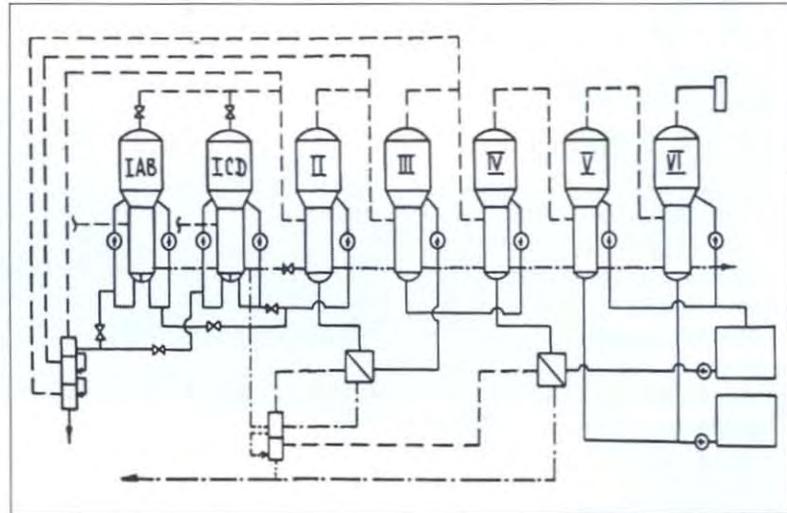


Рис. 2. Технологическая схема ВС фирмы «Парсон и Виттемор»

Таблица 2.

Типовой режим работы выпарной батареи № II КБП

Величина	Размерность	Корпуса					
		I	II	III	IV	V	VI
$t_{\text{гр1}}$	°C	151,1	134,5	119,6	105,4	92,5	79,8
Δt_1	°C	11,8	11,0	12,0	11,2	11,5	14,3
$t_{\text{гр2}}$	°C	139,3	123,5	107,6	94,2	81,0	65,5
t_i^j	°C	5,3	3,9	3,2	3,0	2,7	2,7
θ_i	°C	1134,0	119,6	104,5	91,3	78,3	62,7
$b_{\text{вых}}$	%	44,6	37,3	32,9	31,6	28,9	29,5
w_i	м/с	14,9	12,2	9,2	9,2	9,5	10,7
r_i	кДж/кг	2160,8	2202,2	2243,4	2278,8	2312,5	2351,4
$S_i^{\text{вх}}$	кг/с	91,0	103,2	107,4	116,6	68,4	68,4
w_i	м/с	0,031	0,033	0,032	0,034	0,016	0,016
Q_i	кВт	32184	26867	9422	20965	21969	25160
L_{yp}	м	-	4,24	5,11	3,04	2,19	2,19
$k_{\text{н}}$	Вт/(м ² · °C)	1674,2	1346	1054	984,6	753,4	703,1
α_1	Вт/(м ² · °C)	7332	6909	6480	5964	5473	4997
$\alpha_{\text{в.к}}$	Вт/(м ² · °C)	238	255	260	262	207	200
$\alpha_{\text{в.к}}$	Вт/(м ² · °C)	5253	3062	1745	1430	1494	942
$k_{\text{п}}$	Вт/(м ² · °C)	2213	1677	1436	1102	1121	768
$Rn \cdot 10^4$	(м ² · °C)/Вт	1,45	1,46	1,48	1,74	4,35	1,2
$U \cdot 10^3$	кг/(с · м ²)	-	6,74	2,09	4,53	3,76	4,29

Из результатов исследований следует:

- расход щелока, поступающего на ВС, характеризовался значительными колебаниями, препятствующими стабильной работе установок;

- в условиях накипеобразования для сохранения производительности ВС по мере их загрязнения постепенно увеличивались параметры греющего пара, поступающего в корпус I и вакуум в последнем корпусе; в начале работы после промывки ВС имела определенный запас температурного напора, равный

$$\sum_{\Delta} \tau_{\text{зап}} = \sum_{\Delta} \tau_{\text{расч}} - \sum_{\Delta} \tau_0 \quad (4)$$

где $\sum_{\Delta} \tau_{\text{расч}}$ – расчетный температурный напор; $\sum_{\Delta} \tau_0$ – реальный температурный напор на батарее.

По мере загрязнения кипяtilьной поверхности резерв температурного напора постепенно расходовался. При $\sum_{\Delta} \tau_{\text{зап}} = 0$ сохранение производительности ВС становилось невозможным и, либо происходила остановка ВС для очистки кипяtilьной поверхности от накипи, либо ВС работала, как показано на **рис. 3**, с постепенно уменьшающейся производительностью (уменьшалось количество выпаренной воды ω и снижалась концентрация выпаренного щелока b).

Коэффициент теплопередачи K_n полученный в результате исследований ВС, не являлся постоянной величиной, а непрерывно уменьшался во времени в связи с отложениями накипи на кипяtilьной поверхности.

На **рис. 4** приведены усредненные в течение суток зависимости $K_n = f(t)$ для всех корпусов ВС ТЭС-III, на **рис. 5** – для корпусов ВС № I КБП, на **рис. 6** – корпусов ВС № II КБП.

Из данных представленных на **рис. 4–6** следует, что $K_n = 600–2000$. Первые по ходу пара корпуса ВС, находившиеся в наиболее тяжелых условиях, работали с минимальными и практически постоянными коэффициентами

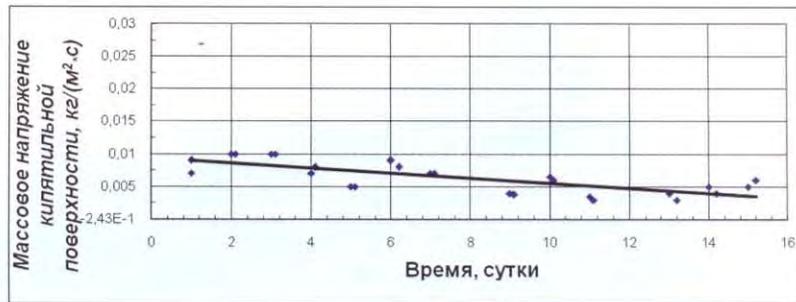


Рис. 3. Типовая зависимость испарительной способности корпуса от времени эксплуатации

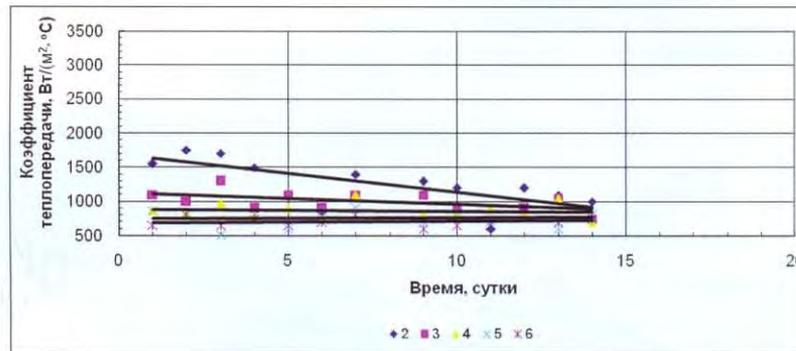


Рис. 4. Изменение коэффициента теплопередачи K_n в корпусах ВС ТЭС-III в зависимости от продолжительности работы: 2; 3; 4; 5; 6 – соответственно K_n во II; III; IV; V; VI корпусах

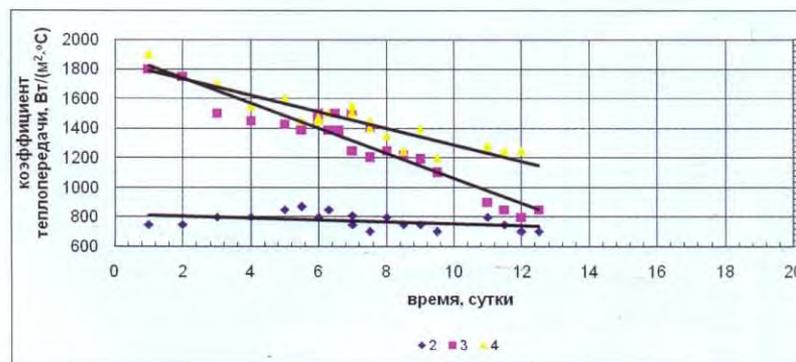


Рис. 5. Изменение коэффициента теплопередачи K_n в корпусах ВС № I в зависимости от продолжительности работы: 2; 3; 4; – соответственно K_n во II; III; IV корпусах

ми теплопередачи. Для большинства остальных аппаратов K_n убывал со временем. Регулярные промывки, проводившиеся через полторы недели рабо-

ты отдельных корпусов на ВС ТЭС-III, малоэффективны. Значительный разброс опытных точек объясняется колебаниями в расходах сульфатного щелока,

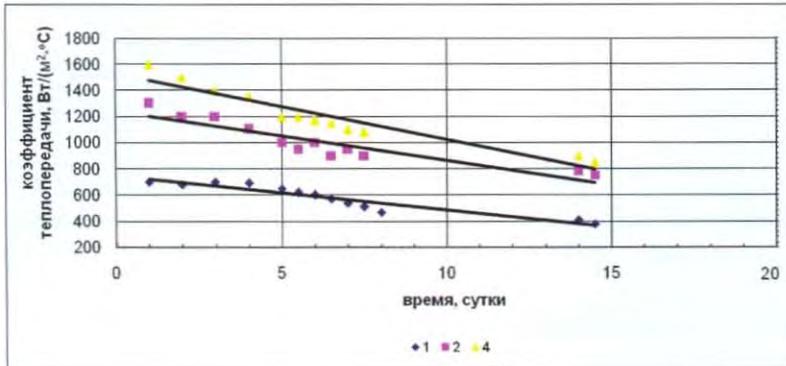


Рис. 6. Изменение коэффициента теплопередачи \$k_f\$ в корпусах ВС № II в зависимости от продолжительности работы: 1; 2; 3; – соответственно \$k_f\$ в I; II; III корпусах ВС

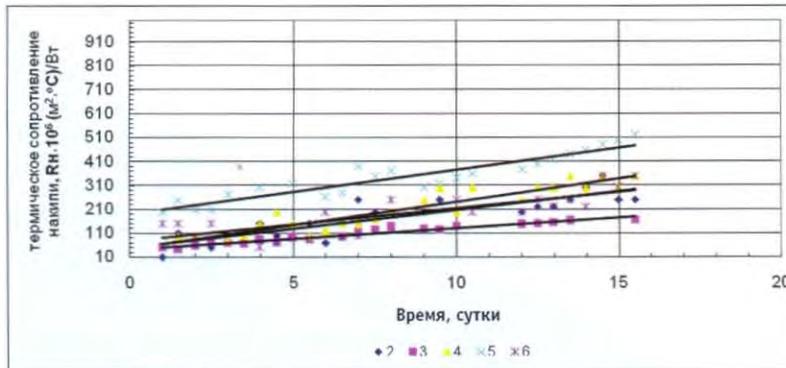


Рис. 7. Зависимость термического сопротивления накипи \$R_{i,j}\$ от продолжительности работы корпусов ВС ТЭС-III: 2, 3, 4, 5, 6 – соответственно в II, III, IV, V, VI корпусах

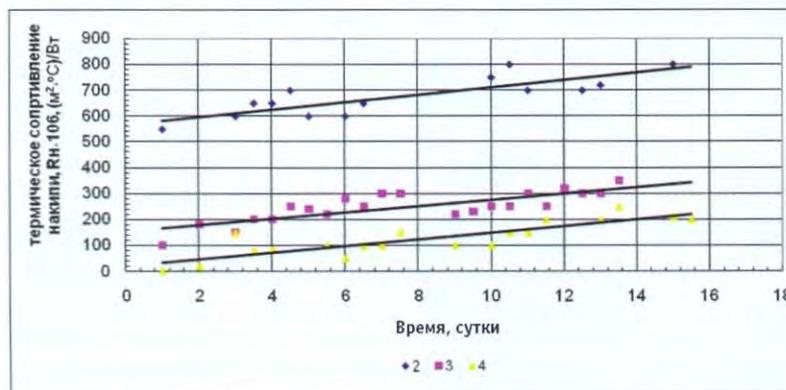


Рис. 8. Зависимость термического сопротивления накипи \$R_{i,j}\$ от продолжительности работы корпусов ВС № I КБП: 2, 3, 4 – II, III, IV корпуса

колебаниями давления в ВА, а также малой точностью определения температур и давлений теплоносителей по корпусам ВС.

Термическое сопротивление накипи в соответствии с (3) определялось для каждого опыта по зависимости:

$$R_{i,j} = \frac{1}{k_f} - \left[\frac{1}{\alpha_1} + \left(\frac{\delta}{\lambda} \right)_{\text{н.о.}} + \frac{1}{\alpha_2} \right]. \quad (5)$$

Изменение термического сопротивления накипи \$R_{i,j}\$ во времени в корпусах ВС ТЭС-III приведено на рис. 7, в корпусах ВС № 1 и № 2 КБП – на рис. 8 и 9 соответственно.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что термические сопротивления накипи составляют для большинства корпусов примерно 20 % (45 % – для отдельных, см. табл. 1–3) от полного термического сопротивления теплопередаче. Представленные данные убедительно показывают необходимость продолжения исследований по накипеобразованию не только для уточнения расчетов теплообменного оборудования, но и для выяснения наиболее рациональных мероприятий по экономии энергоресурсов, достигаемых при снижении отложений накипи и тем самым значительно увеличивая производительность ВС.

По данным, представленным на рис. 7–9 определялся ежесуточный прирост термического сопротивления накипи для каждого корпуса по зависимости:

$$\Delta R_{i,j} = \frac{R_{i,j}'' - R_{i,j}'}{\tau}, \quad (6)$$

где \$R_{i,j}''\$ и \$R_{i,j}'\$ – термические сопротивления накипи в корпусе в конце и в начале эксперимента.

Ежесуточный прирост сопротивления накипи неодинаков для разных корпусов и даже для одного и того же корпуса в различные периоды времени его работы. Для объяснения этого явления требуется дополнительное проведение стендовых исследований [1]. Постепенное увеличение \$R_{i,j}\$ связа-

но с увеличением содержания накипеобразователей в сульфатном щелоке.

Выпадение накипеобразователей из щелока зависит главным образом от увеличения их концентрации в растворе. Соответственно величина коэффициента термического сопротивления накипеобразования ψ в зависимости от концентрации щелока показана на рис. 10 в координатах « ψ – В».

Представленные данные показывают, что коэффициент накипеобразования не является постоянной величиной, а с увеличением концентрации щелока постепенно увеличивается. Для выяснения причин этого увеличения ψ необходимо проведение специальных химико-технологических исследований.

Из результатов проведенных исследований следует, что термическое сопротивление накипи определяется следующими величинами:

$$R_n = f(\psi, U, B, \tau) \quad (7)$$

Согласно зависимости (7) для среднечасовых эксплуатационных условий нами получено уравнение $R_n = 1,658 \cdot 10^{-3} U B^{0,37}$ (8) и построена, представленная на рис. 11 номограмма, позволяющие определить прирост R_n за сутки при конечной концентрации щелока и среднесуточном напряжении кипятильной поверхности.

Для облегчения расчетов при определении величины нами составлена номограмма и представлена на рис. 12. По приведенным выше зависимостям может быть рассчитана продолжительность работы ВС.

Так, согласно данным, представленным в табл. 3, для ВС ТЭС-3 сумма температурных напоров составляет $\sum_i \tau_i = 71,8$ °С, сумма необходимых температурных напоров составляет 58,4 °С. Согласно номограмме, приведенной на рис. 12, $\sum 10^3 \psi_i U^2 r$ составляет 2,04 °С. Тогда время между промывками ВС, обеспечивающее устойчивый режим выпаривания составит $r = \frac{71,8 - 58,4}{2,04} = 6,6$ суток.

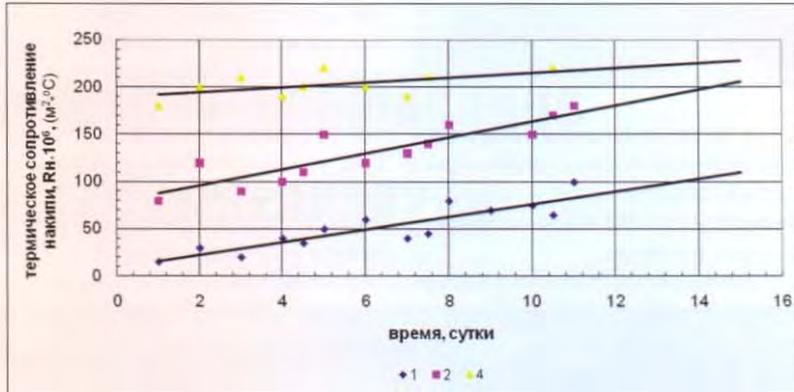


Рис. 9. Зависимость термического сопротивления накипи R_n от продолжительности работы аппаратов ВС № II КБП: 1, 2, 4 – соответственно в I, II, IV корпусах

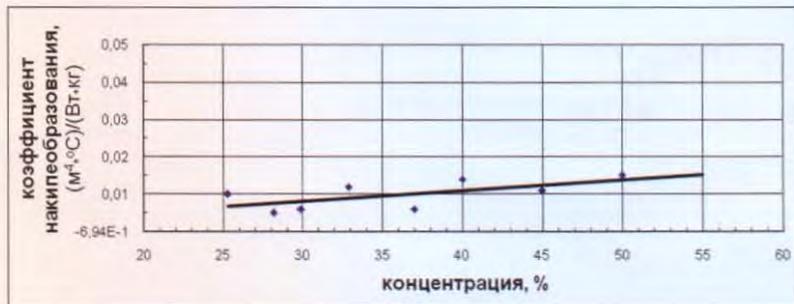


Рис. 10. Зависимость термического коэффициента накипеобразования от концентрации черного сульфатного щелока для различных периодов работы батарей

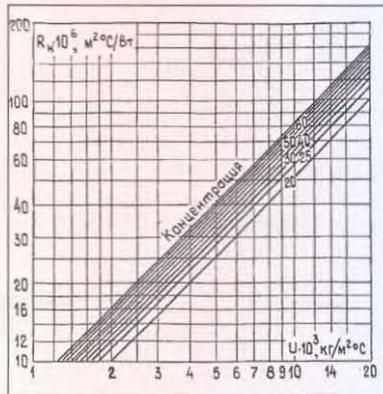


Рис. 11. Среднесуточный прирост термического сопротивления накипи

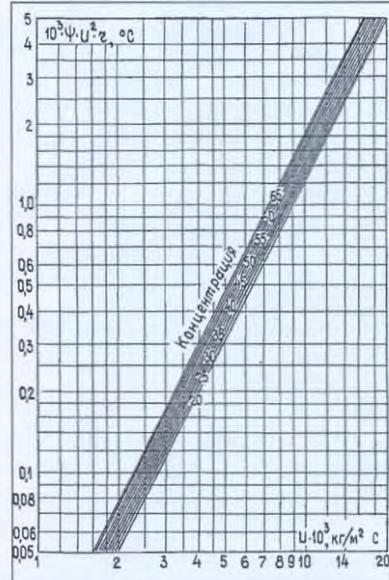


Рис. 12. Номограмма для определения необходимого ежесуточного прироста температурного напора

Выводы

1. Получено уравнение, описывающее взаимосвязь между общим термическим сопротивлением и продолжительностью работы выпарных аппаратов при $\Delta\tau = \text{const}$.

2. Установлены расчетные законо-

мерности отложения накипи на кипяtilьной поверхности ВА ЦБП в зависимости от продолжительности работы выпарной батареи, средних значений напряжения кипяtilьной поверхности и концентрации сульфатного щелока в условиях эксплуатации.

3. Найдена зависимость коэффициента накипеобразования от концентрации отработанного щелока в

условиях эксплуатации.

4. Уточнена методика вычисления продолжительности работы ВС до промывки, предложенная ранее **Г. Н. Костенко** для ВС сахарного производства.

5. Составлены номограммы для расчета оптимального периода работы между промывками выпарных батарей ЦБП.