

ISSN 0033-1155

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2021

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING



DOI: 10.71759/a5cd-fg32

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Термическое сопротивление накипи при выпаривании чёрного сульфатного щёлока

Суслов В. А. доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики

Увеличение накипи на кипятильных поверхностях выпарных аппаратов приводит к снижению производительности выпарных станций до 40 %. Термический коэффициент накипеобразования, характеризующий прирост термического сопротивления накипи в единицу времени, определялся на трёх выпарных станциях Котласского ЦБК в течение года. В результате исследований установлены приближённые закономерности отложения накипи на кипятильной поверхности выпарных аппаратов целлюлозно-бумажных производств в эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: выпарные станции и аппараты, теплообмен, кипение щёлока, термический коэффициент накипеобразования, термическое сопротивление, концентрация чёрного щёлока, коэффициент теплопроводности.

Накипеобразование при выпаривании растворов является процессом отложения солей накипи на кипятильных поверхностях выпарных аппаратов (ВА), снижающим интенсивность теплообмена и производительность выпарных станций (ВС). Этот вопрос в условиях кипения воды рассмотрен в работах [1, 2], сахарных растворов — в [3 – 5].

В процессе кипения сульфатных щёлоков на внутренней поверхности кипятильных труб образуется накипь, состоящая из органических веществ и минеральных солей. Термическое сопротивление теплопередаче в результате накипеобразования достигает 50 % и выше. В первых ВА по ходу пара и последних по ходу щёлока накипь на 60 – 70 % состоит из органических веществ и на 30 – 40 % — из минеральных солей. В последних ВА, выпаривающих относительно «слабые» щёлоки, накипь содержит до 20 % органических веществ и до 80 % солей. Относительно большое содержание органических веществ в первых ВА объясняется воздействием более высоких температур на органические вещества, находящихся в чёрном щёлоке. Происходит обугливание органических веществ и выделение солей из густого щёлока. Накипь на стенках кипятильных труб состоит из волокон, углистых веществ, смолы, сульфата, соды, солей кальция, силикатов и алюмосиликатов. Состав солей в накипи неодинаков и зависит от причин, вызвавших её образование. По отложениям на кипятильных

трубах ВА предоставляется возможность характеризовать работу практически всех звеньев технологической цепи целлюлозных комбинатов. Однако исследований по накипеобразованию с целью интенсификации процесса выпаривания растворов целлюлозно-бумажных производств (ЦБП), за исключением настоящей работы, не проводилось.

Для определения влияния накипеобразования на режим работы выпарных станций (ВС) и их производительность кафедрой промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (СПбГТУРП) проведены длительные исследования режимов работы трёх ВС Котласского целлюлозно-бумажного комбината (КЦБК) [6]. Исследования проводились ежемесячно в течение года. При этом использовались лабораторные манометры, мановакууметры, термометры, термопары и ареометры, а также показания приборов щита управления ВС.

Термический коэффициент накипеобразования, характеризующий прирост термического сопротивления накипи в единицу времени, отнесённого к одному килограмму выпаренной воды с единицы поверхности теплообмена ВА, определялся по формуле [5]:

$$\psi = \frac{R_n}{u\tau}, \quad (1)$$

где $R_n = \delta_n / \lambda_n$ — термическое сопротивление накипи, зависящее от массового напряжения поверхности теплообмена, конечной концентрации раствора в корпусе и периода работы ВС при постоянной конечной концентрации щёлоча между промывками, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$; δ_n — толщина слоя накипи, м; λ_n — коэффициент теплопроводности накипи, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; $u = w / F$ — массовое напряжение поверхности теплообмена, $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $w = S(1 - b/B)$ — количество выпаренной в ВА влаги, $\text{кг} / \text{с}$; S — количество раствора, подаваемого в аппарат на выпаривание, $\text{кг} / \text{с}$; b и B — концентрации щёлоча на входе и выходе из ВА, % абсолютно сухого вещества (а.с.в); F — поверхность теплообмена ВА, м^2 ; τ — время работы ВА после промывки, сут.

Термическое сопротивление накипи находится как разность между термическими сопротивлениями теплопередачи (6):

$$R_n = \frac{1}{K_n} - \frac{1}{K_p}, \quad (2)$$

где K_n и K_p — коэффициенты теплопередачи, полученные в результате исследования и в результате расчета режимов работы ВС, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Коэффициенты теплопередачи, определяемые в результате натурных исследований, рассчитываются по зависимости

$$K_n = \frac{Q}{F \Delta t} = \frac{wr}{F \Delta t} = \frac{q}{\Delta t}, \quad (3)$$

где $Q = wr$ — тепловая нагрузка аппарата, Вт ; r — теплота парообразования, $\text{кДж} / \text{кг}$; $\Delta t = t_{\text{гр}} - t_p$ — температурный напор, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{гр}}$ и t_p — температуры греющего пара и кипящего раствора, $^\circ\text{C}$; q — плотность теплового потока, $\text{Вт} / \text{м}^2$; F — поверхность теплообмена ВА, м.

Расчётные коэффициенты теплопередачи определяются по уравнению:

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи со стороны пара и со стороны кипящего раствора, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $\delta_{\text{ст}}$ — толщина стенки кипяточной трубы, м; $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности стенки кипяточной трубы.

Средний по длине коэффициент теплоотдачи α_1 при конденсации водяного пара на длинных вертикальных трубах определяли по зависимости [7]:

$$\alpha_1 = \frac{\text{Re}}{B H (t_{\text{гр}} - t_{\text{ст}})}, \quad (5)$$

где Re — число Рейнольдса; $B = \frac{4}{r \rho v}$ — комплекс, составленный из физических параметров конденсата; ρ — плотность конденсата, $\text{кг} / \text{м}^3$; v — коэффициент кинематической вязкости конденсата, $\text{м}^2 / \text{с}$; H — высота трубы аппарата, м; $t_{\text{ст}} = 0,5(t_{\text{гр}} - t_p)$ — температура стенки трубы, $^\circ\text{C}$.

Число Re в уравнении (5) находили как функцию от приведённой длины трубы Z по формуле

$$Z = H (t_{\text{гр}} - t_{\text{ст}}) \left(\frac{g}{v^2} \right)^{1/3} \frac{\lambda}{r \rho v}, \quad (6)$$

где g — ускорение свободного падения, $\text{м} / \text{с}^2$; λ — коэффициент теплопроводности конденсата, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

При $Z < 2300$ режим течения пленки конденсата считали ламинарным, а Re рассчитывали как

$$\text{Re}_{\text{пл}} = 3,8 Z^{0,78}. \quad (7)$$

При $Z > 2300$ режим течения конденсатной пленки считали смешанным. При этом:

$$\text{Re}_{\text{пл}} = 1600 \{1 + 0,0625 \text{Pr}^{0,5} [(Z/2300) - 1]\}^{4/3}, \quad (8)$$

где Pr — число Прандтля для конденсата, определяемое по $t_{\text{пл}}$.

При кипении сульфатного щёлоча в трубах устанавливаются две характерные области влияния комплексных переменных в зависимости от критерия $k_{\Delta_{\text{и}}} = \frac{q}{\rho' w_0 \Delta_{\text{и}}}$ на теплоотдачу [6]. Для первой области, определяемой $k_{\Delta_{\text{и}}} < 0,04$, при относительно низких тепловых нагрузках и высоких значениях скоростей циркуляции и недогрева характерно увеличение интенсивности теплоотдачи с уменьшением величины недогрева. Для данной области справедливо уравнение:

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_{\text{б.к}}} = 12,5 \cdot 10^3 k_w^{0,45} K_{\Delta_{\text{и}}}^{0,21} \text{Pr}_{\text{пл}}^{0,6} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,93}. \quad (9)$$

Во второй области при $k_{\Delta_{\text{и}}} > 0,04$, характеризующейся высокими тепловыми нагрузками при малых значениях скоростей циркуляции и недогрева, интенсивность теплообмена возрас-

тает с увеличением величины недогрева. Для расчёта данной области используется формула [6]:

$$\frac{Nu}{Nu_{б.к}} = 2910 \cdot k_w^{0,45} K_{\Delta t_i}^{-0,28} Pr_{пл}^{0,6} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,93}, \quad (10)$$

где $Nu_{б.к}$ — критерий Нуссельта, определяющий теплоотдачу для некипящей жидкости; $k_w = \frac{q}{prw_0}$ — критерий кипения, представляющий собой отношение скоростей парообразования и циркуляции потока жидкости.

Уравнения (9) и (10) справедливы в следующем диапазоне изменения режимных параметров: концентрация раствора — $b = 0 - 50 \%$ а.с.в; давление греющего пара —

$P_{гр} = 1,5 - 3,5$ бар; давление вторичного пара — $P_{вт} = 0,5 - 1,5$ бар; скорость циркуляции раствора — $w_0 = 0,01 - 0,1$ м/с; плотность теплового потока — $q = 5 - 100$ кВт/м.

Две шестикорпусные ВС фирмы «Розенблад» на картонно-бумажном производстве (КБП) КЦБК работали по параллельным равнозначным технологическим схемам. ВС укомплектованы равновеликими ВА с поверхностью теплообмена 1540 м^2 каждый. Питание ВА щёлоком осуществлялось по противоточной схеме. В период исследований на ВС № 1 был отключён ВА I, на ВС № 2 — ВА III. Значения типовых параметров режимов работы ВС приведены в табл. 1, где вместе с параметрами, характеризующими режим работы ВС № 1, указаны параметры ВА I ВС № 2.

Таблица 1

Типовой режим работы ВС № I КБП

Параметр	Корпуса ВС № 1					ВС № 2
	II	III	IV	V	VI	I
$t_{гр}, ^\circ\text{C}$	142,9	118,6	104,4	89,3	80,8	138,2
$\Delta t_i, ^\circ\text{C}$	16,8	9,1	10,2	3,9	4,9	4,5
$t_p, ^\circ\text{C}$	126,1	109,5	94,2	85,4	75,8	133,7
$\vartheta_i, ^\circ\text{C}$	6,48	4,08	2,97	2,61	2,75	5,64
$\theta_i, ^\circ\text{C}$	119,6	105,4	91,3	82,8	73,1	128,1
$b_{\text{вых}}, \%$	48,5	38,0	32,0	28,0	27,5	45,5
$\omega_i, \text{кг/с}$	9,0	9,1	6,12	10,0	3,21	2,14
$S_i, \text{кг/с}$	43,1	52,2	58,3	56,7	14,8	24,6
$w_i, \text{м/с}$	0,016	0,02	0,023	0,022	0,006	3,76
$r_i, \text{кДж/кг}$	2202	2241	2279	2301	2325	2179
$Q_i, \text{кВт}$	19820	20396	13946	23006	7463	4661
$L_{ур}, \text{м}$	—	2,3	2,6	0,8	0,5	—
$\kappa_H, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	765	1450	890	3840	984	677
$\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	7505	6367	5886	6888	6356	7406
$\alpha_{б.к}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	166	206	227	207	132	131
$\alpha_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	7451	3272	1988	1195	738	2914
$\kappa_p, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	2548	1989	1403	978	644	1658
$R_H \cdot 10^4, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	9,15	1,87	4,11	—	—	0,65
$U \cdot 10^3, \text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	5,84	5,91	3,97	6,49	2,08	1,39

В табл. 1 и 2 обозначено: Δt_i — температурный напор; ϑ_i — температурная депрессия; θ_i — температура вторичного пара; $b_{\text{вых}}$ — концентрация на выходе из ВА; ω_i — количество влаги, выпаренной ВА; S_i — расход раствора в ВА; w_i — скорость циркуляции раствора; r_i — теплота парообразования; Q_i — тепловая нагрузка ВА; $L_{\text{ур}}$ — высота кажущегося уровня заполнения кипяtilьной трубы; $\kappa_{\text{н}}$ и $\kappa_{\text{р}}$ — натурный и расчётный коэффициенты теплопередачи в ВА; α_1 — расчётный коэффициент теплоотдачи при конденсации пара; $\alpha_{\text{б.к}}$ — расчётный коэффициент теплоотдачи при движении некипящего щёлоча; α_2 — расчётный коэффициент теплоотдачи при кипении сульфатного щёлоча; $R_{\text{н}}$ — термическое сопро-

тивление накипи; U — плотность испарения в ВА.

Третья исследованная ВС фирмы «Парсон и Виттемор» установлена на ТЭС-III Котласского ЦБК работала по противоточной схеме питания ВА. Первая ступень испарения — ВА I-AB и I-CD с принудительной циркуляцией щёлоча и поверхностью теплообмена 1690 м² каждый. Аппараты в работу включались попеременно. Корпуса II, III и IV ВА имели равную поверхность теплообмена — по 1850 м².

Корпуса V и VI были изготовлены с равной поверхностью испарения — по 2160 м². Значения типовых параметров режимов работы ВС ТЭС-III КЦБК приведены в табл. 2.

Таблица 2

Типовой режим работы ВС ТЭС-III КЦБК

Параметр	Корпуса					
	I	II	III	IV	V	VI
$t_{\text{гpi}}, ^\circ\text{C}$	151,1	134,5	119,6	105,4	92,5	79,8
$\Delta t_i, ^\circ\text{C}$	11,8	11,0	12,0	11,2	11,5	14,3
$t_{\text{pi}}, ^\circ\text{C}$	139,3	123,5	107,6	94,2	81,0	65,5
$\vartheta_i, ^\circ\text{C}$	5,3	3,9	3,2	3,0	2,7	2,7
$\theta_i, ^\circ\text{C}$	134,0	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
$\omega_i, \text{кг/с}$	14,9	12,2	4,2	9,2	9,5	10,7
$S_i^{\text{BX}}, \text{кг/с}$	91,0	103,2	107,4	116,6	68,4	68,4
$w_i, \text{м/с}$	0,031	0,033	0,032	0,034	0,016	0,016
$r_i, \text{кДж/кг}$	2160,8	2202,2	2243,4	2278,8	2312,5	2351,4
$Q_i, \text{кВт}$	32184	26867	9422	20965	21969	25160
$L_{\text{ур}}, \text{м}$	—	4,24	5,11	3,04	2,19	2,19
$\kappa_{\text{н}}, \text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	1674,2	1346,7	393,1	924,6	753,4	703,1
$\alpha_1, \text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	7332	6909	6480	5964	5473	4997
$\alpha_{\text{б.к}}, \text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	238	255	260	262	207	200
$\alpha_2, \text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	5253	3062	1145	1430	1494	942
$\kappa_{\text{р}}, \text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	2213	1677	936	1102	1121	768
$R_{\text{н}}\cdot 10^4, (\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})/\text{Вт}$	1,45	1,46	14,8	1,74	4,35	1,2
$U\cdot 10^3, \text{кг/(с}\cdot\text{м}^2)$	—	6,74	2,09	4,53	3,76	4,29

Результаты исследований показали значительные колебания расхода щёлоча (поступающего на ВС), которые препятствуют стабильной работе ВС. Для сохранения производительности ВС по мере их загрязнения персоналу приходилось постепенно увеличивать давление греющего пара в ВА I и вакуум в последнем ВА. После промывки ВС в первое время её работы имелся определенный запас производительности, рассчитываемый по формуле

$$\sum \Delta t_{\text{зап}} = \sum \Delta t_{\text{расч}} - \sum \Delta t_0, \tag{11}$$

где $\sum \Delta t_{\text{расч}}$ — температурный напор «чистой» ВС после промывки; $\sum \Delta t_0$ — реальный температурный напор на батарее.

По мере загрязнения кипяtilьной поверхности ВА этот резерв постепенно использовался. При $\sum \Delta t_{\text{зап}} = 0$ сохранение производительности ВС становился невозможным и либо происходила очистка поверхности ВС от накипи, либо ВС работала с постепенно убывающей производительностью.

Термическое сопротивление накипи определялось для каждого опыта по формуле:

$$R_{\text{н}} = R_{\text{и}} - \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right]. \tag{12}$$

Изменение термического сопротивления накипи $R_{\text{н}}$ во времени в ВА станции ТЭС-III показано на рис. 1, сопротивление $R_{\text{н}}$ для ВА станций № 1 и № 2 КБП определялось аналогично.

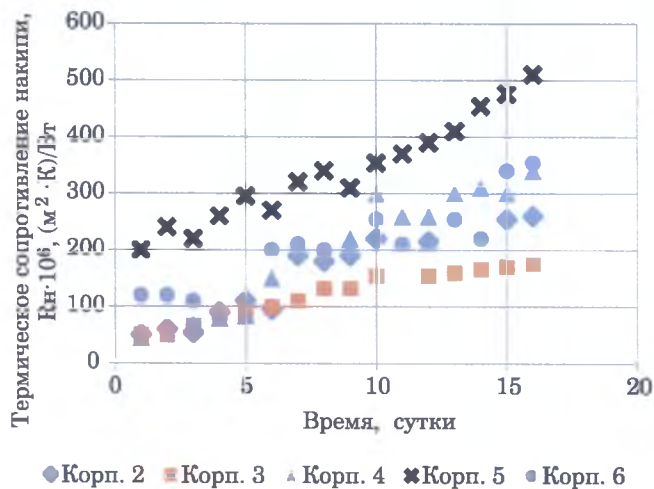


Рис. 1. Зависимость термического сопротивления накипи $R_{\text{н}}$ от продолжительности работы ВА ТЭС-III: 2, 3, 4, 5, 6 — II, III, IV, V, VI корпуса батарей

Проведенные исследования показали, что термические сопротивления накипи составляют для большинства ВА примерно 20 – 40 % от полного термического сопротивления теплопередаче.

Ежесуточный прирост термического сопротивления накипи для каждого ВА определяли по зависимости:

$$\Delta R_{\text{н}} = \frac{R_k - R_1}{\tau}, \tag{13}$$

где R_k — термическое сопротивление накипи в корпусе в конце эксперимента; R_1 — термическое сопротивление накипи в корпусе в начале эксперимента.

Ежесуточный прирост сопротивления накипи неодинаков не только для разных ВА, но и для одного и того же ВА даже в различные периоды времени его работы. Постепенный рост $R_{\text{н}}$ связан с увеличением содержания накипеобразователей в сульфатном щёлоче.

Ежесуточный термический коэффициент накипеобразования определялся по зависимости

$$\psi = \frac{\Delta R_{\text{н}}}{U_{\text{ср}}}, \tag{14}$$

где $U_{\text{ср}}$ — среднесуточное значение напряжения кипяtilьной поверхности.

Выпадение накипеобразователей из щёлоча зависит главным образом от увеличения их концентрации в растворе, поэтому величину ψ при постоянных остальных параметрах поставили в зависимость от концентрации щёлоча. На рис. 2 приведены экспериментально полученные значения ψ , показывающие, что коэффициент накипеобразования с увеличением концентрации щёлоча постепенно растёт.

Термическое сопротивление накипи определяется зависимостью от следующих основных величин $R_{\text{н}} = f(\psi, U, B, \tau)$, которая находится по уравнению

$$R_{\text{н}} = 1,658 \cdot 10^{-3} UB^{0,37} \psi^{0,1}. \tag{15}$$

Уравнение (15) может применяться в диапазоне массовых напряжений поверхности теплообмена $U = (1 \div 10) \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·К) и концентраций раствора $B = (10 - 70)$ % а.с.в.

По зависимости (15) для среднеэксплуатационных условий построена номограмма (рис. 3), позволяющая определить прирост $R_{\text{н}}$ за сутки при конечной концентрации щёлоча и

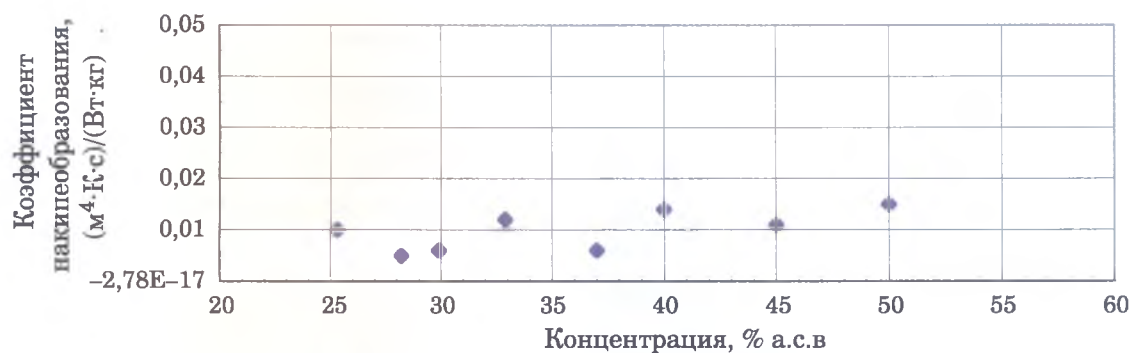


Рис. 2. Зависимость термического коэффициента накипеобразования от концентрации чёрного сульфатного щёлока для различных периодов работы ВС

среднесуточном напряжении кипяtilьной поверхности.

Известно, что полный период работы ВС до промывки составляет

$$\tau = \tau_1 + \tau_2, \tag{16}$$

где τ_1 и τ_2 — периоды работы станции при постоянной конечной и при постепенно снижающейся концентрации выпариваемого щёлока.

Продолжительность работы ВС при постоянной конечной концентрации щёлока определена по уравнению:

$$\tau_1 = \frac{\sum \Delta t_i - \sum 10^3 R_{0i} r_i U_i}{\sum 10^3 \psi_i U_i^2 r_i}, \tag{17}$$

где $\sum \Delta t_i$ — сумма температурных напоров по корпусам выпарной установки;

$R_{0i} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}$ — термическое сопротивление теплопередаче в безнакипном режиме;

r_i — теплота парообразования; U_i — массовое напряжение кипяtilьной поверхности; ψ_i — термический коэффициент накипеобразования.

По зависимости (17) рассчитывается продолжительность работы каждого отдельного корпуса ВС.

Выводы

- 1. Проведены долговременные исследования динамики работы трёх ВС ЦБП.
- 2. Установлены приближённые закономерности интенсивности отложения накипи на кипяtilьной поверхности ВА ЦБП в эксплуатационных условиях.
- 3. Показана необходимость проведения наиболее рациональных мероприятий для снижения отложений накипи и тем самым значительного увеличения производительности ВС ЦБП.

Список литературы

1. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: Учебное пособие для ВТУЗов / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. — 3-е изд., испр. — М.: Высшая школа, 1986. — 352 с.

2. Чудновская, И. И. Исследование теплообмена на внутренней поверхности труб при наличии слоя образований / И. И. Чудновская, М. А. Готовский, З. Ю. Штерн. Тезисы докладов восьмой всесоюзной конференции «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах». Т. 1. — Л., 1990.

3. Маловичко, В. С. Исследование накипеобразования при выпаривании некоторых растворов пищевой промышленности. Авторефе-

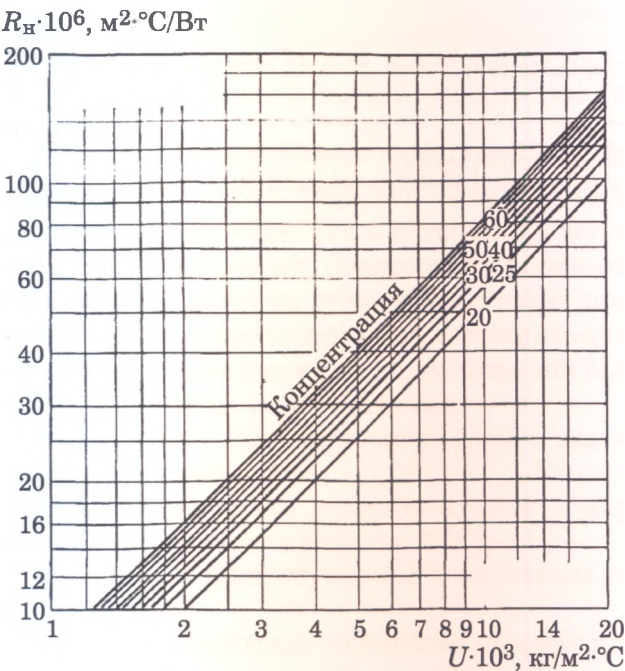


Рис. 3. Среднесуточный прирост термического сопротивления накипи

- рат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — КТИ ПП, Киев, 1973.
4. **Зелепухин, Ю. И.** Способы уменьшения образования накипи при производстве сахара из свёклы / Ю. И. Зелепухин, В. А. Голыбин, В. А. Федорук // Вестник ВГУИТ. — 2012. — № 1. — С. 144 – 147.
 5. **Тобилевич, Н. Ю.** Исследование рабочих процессов при выпаривании сахарных растворов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. — КТИ ПП, Киев, 1969.
 6. **Суслов, В. А.** Тепловые процессы в выпарных установках ЦБП : монография / В. А. Суслов, А. А. Поздняков. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. — 400 с.
 7. **Ягов, В. В.** Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учеб. пособие для вузов / В. В. Ягов. — М.: Издательство МЭИ, 2014. — 542.

References

1. **Kutepov A. M., Serman L. S., Styushin N. G.** *Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii: Uchebnoe posobie dlya VTUZov* (Hydrodynamics and Heat Transfer during Steam Generation: A Textbook for Technical Universities), third edition, corrected, Moscow, Vysshaya shkola, 1986, 352 p.
2. **Chudnovskaya I. I., Gotovskii M. A., Shtern Z. Yu.** *Issledovanie teploobmena na vnutrennei poverkhnosti trub pri nalichii sloya obrazovaniya. Tezisy dokladov vos'moi vsesoyuznoi konferentsii «Dvukhfaznyi potok v energeticheskikh mashinakh i apparatakh»* (Study of heat transfer on the inner surface of pipes

in the presence of a layer of formations. Abstracts of reports of the eighth all-Union conference «Two-phase flow in power machines and apparatus»), 1990, Vol. 1.

3. **Malovichko V. S.** *Issledovanie nakipeobrazovaniya pri vyparivanii nekotorykh rastvorov pishchevoi promyshlennosti* (Study of scale formation during evaporation of some solutions from the food industry), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Kiev, 1973.
4. **Zelepukhin Yu. I., Golybin V. A., Fedoruk V. A.** *Vestnik VGUIT* (Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies), 2012, No. 1, pp. 144 – 147.
5. **Tobilevich, N. Yu.** *Issledovanie rabochikh protsessov pri vyparivanii sakharnykh rastvorov* (Study of working processes during evaporation of sugar solutions), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Kiev, 1969.
6. **Suslov V. A., Pozdnyakov A. A.** *Teplovy protsessy v vyparnykh ustanovkakh TsBP* (Thermal processes in pulp and paper industry evaporation plants), monograph, Saint Petersburg, Polytech-Press, 2022, 400 p.
7. **Yagov V. V.** *Teploobmen v odnofaznykh sredakh i pri fazovykh prevrashcheniyakh: ucheb. posobie dlya vuzov* (Heat transfer in single-phase media and during phase transformations: a textbook for universities), Moscow, Publ. MPEI, 2014, p. 542.

vyachsuslov@mail.ru

Дата поступления 21.08.2025

Дата принятия к публикации 14.10.2025

Thermal scale resistance when black sulfate liquor is evaporated

Suslov V. A.

An increase in scale on the boiling surfaces of evaporators leads to a decrease in the productivity of evaporation stations by up to 40%. Thermal coefficient of scale formation, characterizing the increase in thermal scale resistance per unit of time, was determined on three evaporated stations of the Kotlas Central Processing Plant during the year.

Keywords: Evaporation plants and units; heat exchange; boiling of liquor; thermal coefficient of scale formation; thermal resistance; concentration of black liquor; coefficient of thermal conductivity.