

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ В ПЛАСТИНЧАТЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЯХ САХАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Вступление.** Образование отложений или твердого депозита при работе оборудования сахарной промышленности более детально изучалось для выпарных аппаратов. В настоящее время произошла замена кожухотрубчатых подогревателей продуктов на пластинчатые подогреватели. Поведение аппаратов такого класса в условиях образования загрязнений изучено не достаточно. Поэтому задача анализа процессов образования отложений в пластинчатых подогревателях сахарной промышленности и их математическое моделирование является актуальной и имеет практическую ценность.

Осаждение твердых отложений в подогревателях сахарной промышленности относят к процессам образования и роста кристаллов в перенасыщенных растворах солей, которые происходят в пристенном слое гофрированных пластин. Кристаллизация на теплопередающей поверхности пластин происходит при значительных перенасыщениях растворов и зависит от таких факторов рабочего процесса, как скорость, температура, концентрация загрязняющих веществ.

**Состояние проблемы и формулировка задачи.** Формирование слоя отложений в пластинчатых подогревателях происходит в условиях интенсивного гидродинамического воздействия потока. Основная часть отложений образуется в начальный период (после некоторого времени работы оборудования). Как правило, слой загрязнений достаточно рыхлый и неплотный. Далее происходит изменение структуры свойств и увеличивается механическая прочность отложений. Считается, что если прочность слоя отложений превышает касательное напряжение сдвига на стенке, то скорость роста отложений определяется скоростью кристаллизации и будет иметь место рост слоя отложений. В противоположном случае происходит размыв отложений, и их толщина уменьшается.

Основу отложений на поверхности нагрева подогревателей сатурационного сока и подогревателей перед выпарной станцией составляют кристаллические образования карбоната кальция, гипс, кремнезем и органические вещества [1]. Специфика образования кристаллических отложений на теплопередающей поверхности пластинчатых теплообменников состоит в том, что сложный характер потока, обеспечивающий высокую степень турбулизации, приводит к существованию зон с высокой и низкой скоростью. Зоны пониженной скорости имеют место у точек контакта смежных пластин или у краев пластины, и являются центрами кристаллизации [2]. Кроме того, для чистых поверхностей пластин характерно наличие отрицательного коэффициента сопротивления загрязнению [3], который проявляется в начальный период работы чистого теплообменника и объясняется увеличением турбулентности в пристенном слое за счет появления шероховатости на поверхности пластины.

Основу состава отложений в подогревателях соков в сахарной промышленности составляют соли кальция (окись кальция, карбонаты и сульфаты) [4]. С одной стороны имеется опыт эксплуатации трубчатых подогревателей очищенного сока перед выпариванием [5–8]. Были проведены экспериментальные исследования и разработаны математические модели прогнозирования роста загрязнений на теплопередающей поверхности. Несмотря на практически полную замену трубчатых теплообменников на пластинчатые подогреватели для нагрева чистого сока перед выпариванием, исследованиям работы установленных аппаратов на этих позициях уделялось не достаточно внимания. Отчасти вопросы оптимального проектирования теплообменников и прогнозирования их работы нашли свое отражение в работах [9–12].

**Цель работы.** Целью настоящей работы является анализ и математическая обработка результатов натурных экспериментов, полученных из наблюдения работы подогревателей очищенного сока на сахарном заводе в г. Валуйки (Россия), и разработка теоретической модели предсказания роста отложений на теплопередающей поверхности пластинчатых теплообменников, работающих на подогреве сахарного сока перед выпариванием. На основе полученных результатов предложен анализ работы одного из пластинчатых аппаратов, построена математическая модель, прогнозирующая его работу во времени между остановками на чистку.

**Постановка задачи.** При модернизации сахарного завода в г.Валуйки сотрудниками научно-производственной компании «Теплокомплект» был запроектирован пластинчатый теплообменный аппарат для первой ступени подогрева очищенного сахарного сока конденсатом из первого корпуса выпарной станции. Исходные данные для расчета принимались следующими. По стороне сахарного сока: расход – 350 м<sup>3</sup>/ч; входная температура – 88 °С; выходная температура – 93,3 °С; потери давления не

более

50 кПа. По стороне греющего конденсата: расход – 87,4 м<sup>3</sup>/ч; входная температура – 112 °С; выходная температура – 92 °С; потери давления не более 50 кПа. Запас по поверхности принимался равным 30 %. В результате проектирования к установке был принят пластинчатый теплообменный аппарат марки M15M производства «Альфа Лаваль» с двумя входами-выходами по стороне сахарного сока и пакетом из 150 пластин.

Для этого теплообменника во время эксплуатации были проведены измерения технологических параметров его работы в течение 13 дней с момента пуска выпарной станции. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений технологических параметров работы теплообменника

Параметры	Время, ч				
	96	144	216	264	312
Расход сока, м <sup>3</sup> /ч	265	260	270	277	265
Входная температура сока, °С	103	101	100,5	102	101,7
Выходная температура сока, °С	108	105	106	107	106
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	65	63	61	66	64
Входная температура воды, °С	123,5	123,5	123,5	123,5	123,5
Выходная температура воды, °С	105	102,8	104,8	106,1	104,8

Первое измерение было проведено после пусковых работ, которые заняли продолжительный период и сопровождались остановками в работе аппарата. Было принято, что устойчивый режим функционирования теплообменника наступил примерно по достижению 96 ч эксплуатации. Расчетным путем сравнения данных работы реально работающего аппарата и его чистого аналога были получены значения величины фактора загрязнения  $R_f$ , представленные в табл. 2. Значение фактора загрязнения  $R_f$  рассчитывались на основе экспериментального значения коэффициента теплопередачи с учетом отложений  $K_f$  и расчетного коэффициента теплопередачи для чистого теплообменника  $K$ , используя соотношение

$$R_f = \frac{1}{\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K}}$$

где  $K$  – значение чистого коэффициента теплопередачи.

Таблица 2 – Результаты расчета фактора загрязнения и коэффициента теплопередачи теплообменника

Время $\tau$ , ч	Фактор загрязнения $R_f \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> / (К·Вт)	Коэффициент теплопередачи $K$ (чистый), Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Коэффициент теплопередачи $K_f$ (fouling), Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$K_f/K \cdot 100\%$
96	0,27	2673	2493	93,3
144	1,10	2220	1784	80,4
216	1,55	2668	1887	70,7
264	1,67	2686	1853	69,0
312	1,9	2382	1640	68,8

Изменение фактора загрязнения и относительного коэффициента теплопередачи ( $K/K_f \cdot 100\%$ ) во времени с учетом прогнозирования на весь период работы вплоть до остановки на чистку (примерно 960 ч) показано на рис. 1.

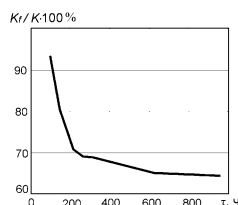


Рисунок 1 – Экспериментальное (<324 ч) и прогнозируемое изменение во времени относительного коэффициента теплопередачи

Анализ полученных результатов показывает, что изменение фактора загрязнения и, как следствие, коэффициента теплопередачи во времени носит асимптотический характер. Прогнозируемое уменьшение коэффициента теплопередачи ожидается не более 60 % от исходного чистого коэффициента теплопередачи.

**Теоретические положения.** Для теоретического описания закономерностей изменения фактора загрязнения и коэффициента теплопередачи и построение математической модели предлагается использовать методику учета динамики развития отложений, предложенную в работах [13,14]. Согласно положениям этих работ большинство моделей, описывающих механизм образования отложений, основан на предсказании уровня образования отложений как разницы между интенсивностью осаждения отложений  $\varphi_d$  и интенсивностью удаления отложений  $\varphi_r$ :

$$\frac{d\delta}{dt} = \varphi_d - \varphi_r, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина отложений, мм;  $t$  – время, с.

Было принято допущение о том, что  $\varphi_r$  пропорционально касательному напряжению на стенке, возведенному в степени  $m$  и толщине отложений  $\delta$

$$\varphi_r = b \cdot \tau_w^m \cdot \delta, \quad (2)$$

где  $b$  – коэффициент пропорциональности, [1/(Па·с)].

Тогда изменение фактора загрязнения во времени можно записать в виде

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{\varphi_d}{\lambda_f} - b \cdot \tau_w \cdot R_f, \quad (3)$$

где  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности загрязнений.

Интегрирование дифференциального уравнения (3) дает решение

$$R_f(t) = \frac{\varphi_d}{b \cdot \tau_w \cdot \lambda_f} \cdot [1 - \exp(-b \cdot \tau_w \cdot t)]. \quad (4)$$

Для определения касательного напряжения на стенке гофрированного поля межпластинных каналов используется выражение

$$\tau_w = \zeta_s \cdot \psi \cdot \rho \cdot w^2 / 8, \quad (5)$$

где  $\zeta_s$  – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления единицы относительной длины канала (учитывающий потери от трения на стенке и от гидродинамического сопротивления формы);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – скорость в канале, м/с. Для каналов сетчато-поточного типа пластинчатых теплообменников этот коэффициент определялся согласно формуле

$$A = 380 / [tg(\beta)]^{1.75}; \text{ для } Re > A \quad \psi = \left( \frac{Re}{A} \right)^{-0.15 \cdot \sin(\beta)}; \text{ для } Re \leq A \quad \psi = 1, \quad (6)$$

где  $\beta$  – угол наклона гофра к продольной оси пластины;  $Re$  – число Рейнольдса.

Для вычисления величины образования отложений  $\varphi_d$  было использовано выражение

$$\varphi_d = \frac{A_m \cdot C_f \cdot u \cdot T_s^{2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot \mu^{-4/3}}{1 - B_m \cdot u^3 \cdot C_f^2 \cdot \rho^{-1/3} \cdot \mu^{-1/3} \cdot T_s^{2/3} \cdot \exp(E / (R \cdot T_s))}, \quad (7)$$

где  $T_s$  – температура поверхности, К;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $R=8,314$  Дж/(Моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $C_f$  – коэффициент трения Фаннинга;  $u$  – средняя скорость потока, м/с.

**Результаты и обсуждения.** Используя соотношения (5)–(7) было рассчитаны значения фактора загрязнения для исходных данных, представленных в табл. 1 для очищенного сахарного сока. Значения

расчетных параметров, которые дают наилучшее согласование с экспериментальными данными принимались следующие:

$E=52100$  Дж/Моль;  $A_m=1,9 \cdot 10^{-11}$  кг<sup>2/3</sup>К<sup>1/3</sup>М<sup>5/3</sup>(КВт)<sup>-1</sup>с<sup>-1/3</sup>ч<sup>-1</sup>;  $B_m=1,2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>13/3</sup>кг<sup>-2/3</sup>с<sup>8/3</sup>К<sup>-2/3</sup>;  $b = 2,3 \cdot 10^{-4}$  1/(Па·).

**Заключение.** Предложенная методика позволяет достаточно точно прогнозировать качественно и количественно величину фактора загрязнения и ее изменение во времени. Предложенный подход может быть использован при проектировании пластинчатых подогревателей очищенного сахарного сока перед выпариванием. Приведенные оценки позволяют заранее на стадии проектирования определить падение величины коэффициента теплопередачи и спрогнозировать примерное время остановки аппарата на чистку. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с распространением использованной методики для расчета пластинчатых теплообменников на других позициях сахарного производства и в различных отраслях промышленности.

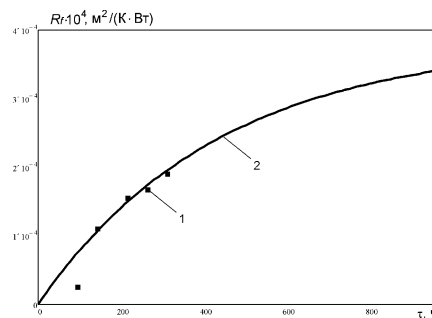


Рисунок 2 – Экспериментальное (<324 ч) и прогнозированное изменение расчетных величин во времени фактора загрязнения: 1 – по данным измерений из рис. 1; 2 – расчетное по формуле (4)

#### Підтримка

Автор благодарит за финансовую поддержку ЕС FP7 проект “Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks” – DISKNET, Grant Agreement No: PIRSES-GA-2011-294933 and ЕС проект “Efficient Energy Integrated Solutions for Manufacturing Industries” – EFENIS, Grant Agreement No. ENER/FP7/296003/EFENIS.

#### Литература

1. Пластинчатые теплообменники в промышленности /Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньева. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004.– 232 с.
2. Модернизация системы последовательно установленных подогревателей сахарного сока / Арсеньева О.П., Бабак Т.Г., Демирский А.В., Хавин Г.Л. // Наукові праці ОНАХТ.– Одеса: 2011, Вип.39.– Том.2.– С. 151–155.
3. Арсеньева О.П., Демирский А.В., Хавин Г.Л. Оптимизация пластинчатого теплообменника // Пробл. машиностроения.– 2011.– т.14, №1.– С. 23–31.
4. Сагань И.И., Разладин Ю.С. Борьба с накипеобразованием в теплообменниках.– Киев: Техника, 1986.– 133 с.
5. Накипеобразование и пути его снижения в сахарной промышленности / А.Т. Богорош, И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983.– 192 с.
6. Богорош А.Т. Возможности управления свойствами кристаллических отложений.- К.: Вища школа, 1987.– 247 с.
7. Богорош А.Т. Вопросы накипеобразования.– К.: Вища школа, 1987.– 179 с.
8. Исследование влияния скорости движения сока на коэффициент накипеобразования в подогревателях сахарной промышленности / Тобилович Н.Ю., Сагань И.И., Гаряжа В.Т., Князев А.А. // Пищевая промышленность.– Киев, 1965. – С. 132–135.
9. Практическая реконструкция системы подогревателей сахарного сока перед выпариванием / Товажнянский Л.Л., Арсеньева О.П., Демирский А.В., Хавин Г.Л. // Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ ”ХПІ”. – 2012, №2.– С. 99–102.
10. Анализ работы пластинчатого подогревателя сахарного сока с учетом отложений / Арсеньева О.П., Бабак Т.Г., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. // Наукові праці ОНАХТ.– Одеса: 2012, Вип.41.– Том. 2.– С. 173–177.

11. Товажнянський Л.Л., Демирський А.В., Хавин Г.Л. К определению величины загрязнения теплопередающей поверхности пластинчатых теплообменников // Интегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012, №4. – С. 99–104.
12. Анализ работы систем подогревателей сахарного сока с учетом загрязнений теплообменной поверхности / Демирський А.В., Товажнянський Л.Л., Арсеньєва О.П., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. // Интегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013, №.2.– С. 14–17.
13. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers // O. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P. Kapustenko // Applied Thermal Engineering. 2013. – 61. – P. 53–59.
14. Mitigation of Fouling in Plate Heat Exchangers for Process Industries / O. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko // Chemical Engineering Transaction, 2012. – 29. – P. 1441–1446.

### Bibliography (transliterated)

1. Platinchatye teploobmenniki v promyshlennosti. L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arseneva. – Harkov: NTU «HPI», 2004.– 232 p.
2. Modernizatsiya sistemy posledovatelno ustanovlennykh podogrevateley saharного soka. Arseneva O.P., Babak T.G., Demirskiy A.V., Havin G.L. Naukovi pratsi ONAHT.– Odesa: 2011, Vip.39.– Tom.2.– P. 151–155.
3. Arseneva O.P., Demirskiy A.V., Havin G.L. Optimizatsiya platinchatogo teploobmennika. Probl. mashinostroeniya.– 2011.– t.14, #1.– P. 23–31.
4. Sagan I.I., Razladin Yu.S. Borba s nakipeobrazovaniem v teploobmennikah.– Kiev: Tehnika, 1986.– 133 p.
5. Nakipeobrazovanie i puti ego snizheniya v saharной promyshlennosti. A.T. Bogorosh, I.M. Fedotkin, I.S. Gulyiy. – M.: Legkaya i pischevaya prom-st, 1983.– 192 p.
6. Bogorosh A.T. Vozmozhnosti upravleniya svoystvami kristallicheskih otlozheniy.– K.: Vischa shkola, 1987.– 247 p.
7. Bogorosh A.T. Voprosy nakipeobrazovaniya.– K.: Vischa shkola, 1987.– 179 p.
8. Issledovanie vliyaniya skorosti dvizheniya soka na koeffitsient nakipeobrazovaniya v podogrevatelyah saharной promyshlennosti. Tobilevich N.Yu., Sagan I.I., Garyazha V.T., Knyazev A.A. Pischevaya promyshlennost.– Kiev, 1965. – P. 132–135.
9. Prakticheskaya rekonstruktsiya sistemy podogrevateley saharного soka pered vyiparivaniem. Tovazhnyanskiy L.L., Arseneva O.P., Demirskiy A.V., Havin G.L. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. – Harkiv: NTU "HPI". – 2012, #2.– P. 99–102.
10. Analiz raboty platinchatogo podogrevatelya saharного soka s uchetoм otlozheniy. Arseneva O.P., Babak T.G., Kapustenko P.A., Havin G.L. Naukovi pratsi ONAHT.– Odesa: 2012, Vip.41.– Tom. 2.– P. 173–177.
11. Tovazhnyanskiy L.L., Demirskiy A.V., Havin G.L. K opredeleniyu velichiny zagryazneniya teploperedayushey poverhnosti platinchatykh teploobmennikov. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. – Harkiv: NTU "HPI". – 2012, #4. – P. 99–104.
12. Analiz raboty sistem podogrevateley saharного soka s uchetoм zagryazneniy teploobmennoy po-verhnosti. Demirskiy A.V., Tovazhnyanskiy L.L., Arseneva O.P., Kapustenko P.A., Havin G.L. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal.– Harkiv: NTU "HPI".– 2013, #.2.– P. 14–17.
13. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. O. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P. Kapustenko. Applied Thermal Engineering. 2013. – 61. – P. 53–59.
14. Mitigation of Fouling in Plate Heat Exchangers for Process Industries. O. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko. Chemical Engineering Transaction, 2012. – 29. – P. 1441–1446.

УДК 66.045.01

Демірський О.В.

### АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ВІДКЛАДЕНЬ У ПЛАСТИНЧАТИХ ПІДГРІВНИКАХ ЦУКРОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Розглянуто питання прогнозування роботи пластинчатого теплообмінного апарату на позиції підігріву чистого сульфатованого цукрового соку перед випаровуванням. На основі безпосередніх натурних вимірювань та їх математичної обробки запропоновано математичну модель прогнозування зміни фактора забруднення у часі як функції дотичного напруження на стінці пластини і товщини забруднення. Одержані експериментальні та розрахункові результати показали наявне добре погодження.

Demirskyy A.

**THE ANALYSIS OF DEPOSITS CREATION IN PLATE HEATERS OF SUGAR INDUSTRY**

The problem of prediction of plate heat exchanger unit operation for the preheating of purified sulfated sugar juice before the evaporation is considered. Based on the experimental measurements and their mathematical treatment, a mathematical model for the fouling factor prediction during the time as a function of wall shear stress and plate thickness is proposed. The experimental and calculated results showed good agreement.