

УДК 66.045.01:664.1

Товажнянский Л.Л., Демирский А.В., Хавин Г.Л.

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИНЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ САХАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Вступление.** Применение теплообменников в промышленных процессах всегда сопровождается загрязнением теплопередающей поверхности слоем отложений. Эта проблема приобрела не только технический характер, связанный с ухудшением передачи тепла и повышению потерь давления, приводящим к нарушению технологического режима, но и экономический характер. Последнее обстоятельство связано с увеличением затрат на энергоносители и стоимость работы загрязненного аппарата. Массовое внедрение в промышленность и коммунальное теплоснабжение пластинчатых теплообменников потребовало создания математических моделей и методов проектирования пластинчатых аппаратов с учетом образования отложений. Изучение процессов теплопередачи при загрязнении поверхности и развитие методов расчета являются актуальными научными задачами, имеющими важное практическое значение в промышленности.

**Состояние проблемы и формулировка задачи.** Прогнозирование изменения толщины отложений на теплообменной поверхности и, как следствие, изменение термического сопротивления, дает возможность повысить точность теплового и гидравлического расчета. Сложность создания надежных методов расчета заключается не только в существовании различных механизмов образования отложений [1], но и в многообразии факторов, влияющих на процесс появления депозитов при реализации того или иного механизма образования отложений. Большинство исследований в этом направлении носят экспериментальный характер с последующим обобщением полученных результатов.

Одним из наиболее ярких промышленных приложений, в которых самую существенную роль играет появление загрязнений поверхности теплопередачи, является сахарная промышленность, где тепломаассообменные процессы играют основную роль. Необходимость модернизации и замены кожухотрубчатых подогревателей соков на сахарных заводах пластинчатыми теплообменниками была достаточно полно обоснована как технически, так и экономически в достаточном количестве публикаций. В работах [2,3] была сформулирована задача модернизации подогревателей сахарного сока, учитывающая экономические аспекты выбора теплообменных аппаратов. Главной идеей в такой постановке был расчет теплообменника или системы теплообменников по приведенным затратам. Пластинчатые теплообменники в большинстве случаев меньше подвержены загрязнению, чем другие виды, например, кожухотрубчатые.

В отечественной литературе имеется достаточное количество прикладных исследований, посвященных проблеме загрязнения теплообменных поверхностей на заводах сахарной промышленности [4–7]. Практически все имеющиеся данные относятся к загрязнению кожухотрубчатых аппаратов. При изучении вопроса о появлении отложений в пластинчатых подогревателях, несомненно, необходимо опираться на имеющиеся физические закономерности по загрязнению кожухотрубчатых аппаратов. К тому же опыт такой аналогии уже имеется и применяется на практике [8].

**Постановка задачи и цель работы.** Слой загрязнения на теплообменной поверхности проявляется в виде двух факторов. Во-первых, рост термического сопротивления передачи тепла через стенку пластины, что приводит к снижению тепловых характеристик; и, во-вторых, уменьшение эквивалентного диаметра и изменение значения коэффициента гидравлического трения приводит к росту потерь давления теплоносителей при протекании через пакет пластин. Цель настоящей работы – физически обоснованный учет влияния загрязнений теплообменной поверхности на стадии проектирования пластинчатых теплообменников и разработка практических рекомендаций для расчета пластинчатых подогревателей сахарного сока.

**Теоретические положения.** При проектировании теплообменника по выполнению условий теплопередачи (по выполнению заданного коэффициента теплопередачи) обычно задают дополнительную поверхность теплообмена, которая с течением времени компенсирует появление загрязнений теплопередающей поверхности. Однако такой подход приводит к изначальному занижению скорости теплоносителей в каналах аппарата, что, в свою очередь, способствует более интенсивному росту отложений.

Соотношение [4], основанное на предположении, что термическое сопротивление накипи  $R_f = \Psi \cdot g \cdot t$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт, пропорционально количеству тепла, для текущего коэффициента теплопередачи  $K_t$ , имеет вид

$$K_t = K_{cl} \cdot e^{-R_f \cdot K_{cl}}; \quad (1)$$

$$R_f = \Psi \cdot g \cdot t, \quad (2)$$

где  $K_{cl}$  – коэффициент теплопередачи для чистой поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Psi$  – термический коэффициент накипеобразования для подогревателей [9], м<sup>3</sup>·К/(Вт·кг), который характеризует прирост термического сопротивления  $R_f$  в сутки, отнесенный к 1 кг сахарного сока, проходящего за 1 час через 1 м<sup>2</sup>;  $g$  – массовое термическое напряжение нагрева стенки, кг·м/(м<sup>2</sup>·ч);  $t$  – время.

Величина  $\Psi$ , согласно данным [9] полученным из экспериментальных данных для промышленных кожухотрубчатых подогревателей, может быть рассчитана по формуле

$$\Psi = C \cdot w^{-2,2}, \quad (3)$$

где значение коэффициента  $C$  определяется качеством сахарного сока и равно: для диффузионного сока –  $40 \cdot 10^{-10}$ , для сока I сатурации –  $12,6 \cdot 10^{-10}$ , перед выпарной установкой –  $3,9 \cdot 10^{-10}$ .

Массовое термическое напряжение нагрева стенки можно рассчитать из соотношения

$$g = w \cdot F_{ch} \cdot 3600 \cdot \rho \cdot l_{pr} / F_h, \quad (4)$$

где  $w$  – скорость сока, м/с;  $F_{ch}$  – общая площадь сечения, по которому протекает сок, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность сахарного сока, кг/м<sup>3</sup>;  $l_{pr}$  – приведенная длина пластины, м;  $F_h$  – поверхность нагрева сока, м<sup>2</sup>.

Таким образом, используя соотношения (1)–(4) можно рассчитать уменьшение коэффициента теплопередачи теплообменника в течение заданного времени работы. В работе [8] для компактных теплообменников рекомендуется величина дополнительной поверхности не более 10% от чистой расчетной поверхности. Если записать коэффициент термического сопротивления  $R_f = \delta_f / \lambda_f$ , где  $\delta_f$  – текущая толщина отложений, м;  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности слоя отложений, Вт/(м·К), для этого случая, то критерий можно записать в виде

$$R_f \leq 0,1 / K_{cl}, \quad (5)$$

где  $K_{cl}$  – расчетный коэффициент теплопередачи для чистой поверхности.

Для критерия по потерям давления считается, что загрязнение равномерно распределено по поверхности пластин и имеет одинаковую толщину. Тогда принимается, что толщина слоя отложений уменьшает величину эквивалентного диаметра  $d_e$ , примерно равного удвоенной высоте гофрировки пластины –  $g_{ap}$ , на удвоенную величину  $\delta_f$ . Исходя из величины дополнительной поверхности не более 10 %, для компактных теплообменников с величиной гидравлического диаметра не более 5 мм можно записать

$$4 \cdot \delta_f / d_e \leq 0,1. \quad (6)$$

Для труб и каналов, близких к круглым коэффициент 4 заменяется на 2. Соотношение (6) для термического сопротивления загрязнения  $R_f$  примет вид

$$R_f \leq \frac{0,1 \cdot d_e}{4 \cdot \lambda_f}. \quad (7)$$

Для проектирования пластинчатых теплообменников рекомендуется следующий порядок определения расчетной величины сопротивления загрязнения  $R_f$ . Вначале рассчитываются величины  $R_f$  из соотношений (5) и (7), далее из них выбирается наименьшая, которая и должна впоследствии использоваться при проектировании пластинчатого теплообменника. Такой подход будет оценивать величину

$R_f$  для приращения потерь давления около 20 %, и, следовательно, в большинстве случаев обеспечит работу насосного оборудования. Предложенный инженерный подход не учитывает асимптотическую природу  $R_f$  во времени, которая имеет место во многих промышленных приложениях и зависимость величины сопротивления загрязнений от скорости и давления потока. Кроме того, назначение предельного значения термического сопротивления загрязнению не дает возможности определить время до остановки аппарата для чистки теплопередающей поверхности.

**Результаты и обсуждения.** В качестве примера, демонстрирующего достоверность предложенных методов, рассмотрим расчет пластинчатого подогревателя сахарного сока перед выпариванием, с использованием в качестве греющего теплоносителя конденсата. Исходные данные для расчета принимались следующими: расход сахарного сока –  $G_c = 350000$  кг/ч, входная температура сока –  $t_{11} = 112$  °С, воды –  $t_{21} = 88$  °С, выходная температура сока –  $t_{12} = 92$  °С, воды –  $t_{22} = 93,3$  °С. Среднее значение теплофизических характеристик сахарно сока для заданного температурного режима: плотность –  $\rho = 1035$  кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоемкость – 3966 Дж/(кг·К); теплопроводность  $\lambda = 0,6264$  Вт/(м·К); динамическая вязкость  $\mu = 0,7174 \cdot 10^{-2}$  Па·с. Потери давления по стороне сока принимались 50 кПа.

Примем к установке теплообменник марки М15М производства фирмы «Альфа Лаваль», с геометрическими параметрами пластин: высота гофрировки – 4 мм; ширина пластины – 450 мм; эквивалентный диаметр – 8 мм; площадь теплопередающей поверхности пластины – 0,62 м<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения канала –  $1,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>; приведенная длина – 1,378 м.

Было выбрано 4 аппарата симметричной компоновкой пластин с числом каналов  $n_{ch}$  по стороне сахарного сока – 54, 60, 67, 75. Результаты расчетов для теплообменников по программе CAS 200 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициента теплопередачи и потерь давления для теплообменников с различной площадью теплопередающей поверхности

Число каналов	Площадь теплопередачи, м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопередачи $K_{cl}$ (чистый), Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Коэффициент теплопередачи $K_{serv}$ (с запасом), Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	Потери давления, кПа
54	33,48	3698	3216	14,8	48,52
60	37,20	3451	2882	19,8	41,04
67	41,54	3213	2576	24,7	34,65
75	46,50	2985	2302	29,6	29,36

По значению запаса по табл. 1 можно пересчитать эквивалентное значение сопротивления загрязнения  $R_f$ , используя известное соотношение

$$R_f = \frac{\delta_f}{\lambda_f} = \frac{1}{K_{cl}} - \frac{1}{K_{serv}} \quad (8)$$

Подогреватель сахарного сока работает без остановки в течение всего сезона сахароварения (около 120 дней) и подлежит чистке по окончании этого сезона. Расчет сопротивления загрязнения  $R_f$  из соотношений (2), (5) и (8) представлены в табл. 2, здесь и далее принято значение коэффициента теплопроводности загрязнения равным  $\lambda = 1,0$  Вт/(м·К). Значение термического сопротивления по формуле (7) равно  $20 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>·К/Вт.

Таблица 2 – Значение термического сопротивления загрязнению, рассчитанное различными методами

Число каналов	$R_f \cdot 10^5$ по формуле (2)	$R_f \cdot 10^5$ по формуле (5)	$R_f \cdot 10^5$ по формуле (8)
54	3,142	2,708	4,016
60	3,550	2,898	5,721
67	4,037	3,112	7,696
75	4,666	3,350	9,940

Таким образом, соотношение (2) дает завышенное значение  $R_f$ , чем по рекомендуемой инженерной формуле (5) [8], и меньшее, чем расчетное по данным табл. 1. Отсюда можно сделать вывод о том, что выбор теплообменника с 54 каналами по стороне сока, по всей видимости, является наиболее предпочтительным. Кроме того, такой аппарат имеет наибольшую скорость в каналах – 0,95 м/с. Соотношение (2) является линейным во времени и нелинейно зависит от скорости теплоносителя в каналах и с увеличением скорости термическое сопротивление  $R_f$  уменьшается (рис. 1), несмотря на увеличение массового термического напряжения нагрева стенки  $g$ .

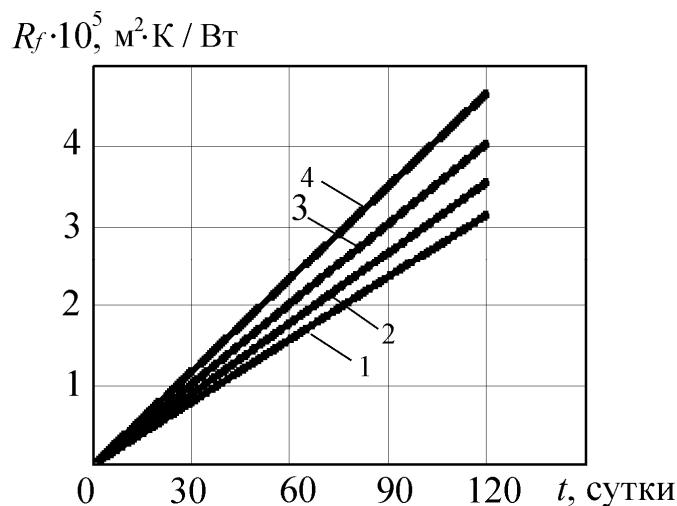


Рисунок 1 – Зависимость термического сопротивления от времени работы для теплообменников с различным числом каналов: 1 – 54; 2 – 60; 3 – 67; 4 – 75

Рассчитанные из соотношения (1) значения коэффициента теплопередачи для работы теплообменников в течение 120 суток, запас относительно чистой поверхности, и толщина отложений  $\delta_f$  представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчета коэффициента теплопередачи и толщины отложений для теплообменников с различной площадью теплопередающей поверхности по соотношению (1)

Число каналов	Коэффициент теплопередачи $K_{cl}$ (чистый), Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Расчетный коэффициент теплопередачи $K_f$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	$\delta_f \cdot 10^5$ , м	Скорость в каналах, м/с
54	3693	3288	12,3	3,14	0,97
60	3451	3053	13,0	3,55	0,87
67	3213	2822	13,9	4,04	0,78
75	2985	2597	14,9	4,67	0,70

**Заключение.** Предложенная методика проектирования пластинчатого теплообменника с учетом загрязнений в процессе работы позволяет достаточно точно рассчитывать изменение коэффициента теплопередачи и определять время работы аппарата до его остановки на очистку. Приведенные соотношения также хорошо согласуются с известным инженерным подходом, рекомендуемым к использованию при проектировании пластинчатых теплообменников. При проектировании пластинчатых подогревателей в сахарной промышленности, можно рекомендовать рассчитывать снижение коэффициента теплопередачи, в течение срока эксплуатации, используя соотношение (1).

Литература

1. Пластинчатые теплообменники в промышленности /Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Ха-

вин, 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. Hesselgraves J.E. An approach to fouling allowances in the design of compact heat exchangers // Applied Thermal Engineering, 2002. – 22. – P. 755–762.

9. Исследование влияния скорости движения сока на коэффициент накипеобразования в подогревателях сахарной промышленности / Тobileвич Н.Ю., Сагань И.И., Горяжа В.Т., Князев А.А. // Пищевая промышленность.– Киев, 1965. – С. 132–135.

#### Bibliography (transliterated)

1. Plastinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arseneva. – Harkov: NTU «HPI», 2004.– 232 p.

2. Modernizatsiya sistemyi posledovatelno ustanovlennyih podogrevateley saharnogo soka Arseneva O.P., Babak T.G., Demirskiy A.V., Havin G.L. Naukovi pratsi ONAHT.– Odesa: 2011, Vip.39.– Том.2.– p. 151–155.

3. Arseneva O.P., Demirskiy A.V., Havin G.L. Optimizatsiya plastinchatogo 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 saharnoy promyishlennosti 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. Voprosyi nakipeobrazovaniya.– K.: Vischa shkola, 1987.– 179 p.

8. Hesselgraves J.E. An approach to fouling allowances in the design of compact heat exchangers Applied Thermal Engineering, 2002. – 22. – P. 755–762.

9. Issledovanie vliyaniya skorosti dvizheniya soka na koeffitsient nakipeobrazovaniya v podogrevatelyah saharnoy promyishlennosti Tobilevich N.Yu., Sagan I.I., Garyazha V.T., Knyazev A.A. Pischevaya promyishlennost.– Kiev, 1965. – p. 132–135.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в рамках проекта EU project FP7-SME-2010-1-262205-INHEAT.

УДК 66.045.01:664.1

Товажнянський Л.Л., Демірський О.В., Хавін Г.Л.

### ДО ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ЗАБРУДНЕННЯ ПЛАСТИНЧАТИХ ПІДГРІВАЧІВ ЦУКРОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Розглянуто питання проектування пластинчатого теплообмінника з урахуванням появи забруднень поверхні теплопередачі. Запропоновано використання лінійного співвідношення для зростання відкла-

день у часі. Вірогідність залежностей продемонстровано для розрахунків пластинчатого підігрівача цукрового соку. Надано порівняння одержаних результатів з розрахунками по інженерній методиці. Зроблено висновок про коректне використання запропонованих розрахункових залежностей для прогнозування роботи пластинчатого теплообмінника.

Tovazhnyanskyy L., Demirsky A., Khavin G.

**THE FOILING VALUE DEFINED FOR PLATE EXCHANGERS OF SUGAR INDUSTRY**

The problem of plate heat exchanger design with fouling of heat surface is considered.

The linear correlation for deposit growing in the time is proposed. The reliability of correlations is demonstrated for sugar thing juice plate heaters calculate. The comparison of received results with engineering methodology calculations is presented. The resume of correctness of presented calculation correlation using for prediction of operate plate heat exchanger is made.