

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Вступление. Загрязнение теплопередающей поверхности теплообменников представляет собой одну из важнейших проблем в общем потреблении энергии. Появление отложений различного характера не только ухудшает теплопередачу и увеличивает расходы на перекачивание рабочих сред через аппарат, но и на стадии проектирования требует учета запаса поверхности, что увеличивает капитальные затраты. Кроме того, очистка теплообменников как безразборная промывка, так и с полной разборкой, требует дополнительных финансовых и людских затрат. Поэтому задача создания математических моделей, позволяющих на стадии проектирования прогнозировать появление и рост отложений на теплопередающей поверхности пластинчатых теплообменников, является актуальной и имеет практическую ценность.

Состояние проблемы и формулировка задачи. В большинстве практических приложений загрязнение поверхности теплопередачи является следствием проявления действующих одновременно нескольких механизмов отложений. Наиболее распространено загрязнение за счет реакции кристаллизации, механическое осаждение, коррозия и химическая реакция. Среди этих механизмов наиболее опасным с точки зрения экономического ущерба является кристаллизация и осаждение из растворов, действующие одновременно.

Несмотря на то, что процесс кристаллического осаждения из насыщенных растворов достаточно хорошо изучен, однако практическое приложение исследований пока не имеет широкого применения, в силу отсутствия информации, подтверждающей достоверность расчетов.

Кристаллизационное загрязнение возникает при кристаллизации растворенных свободных радикалов из раствора теплоносителя на теплопередающую поверхность. Это происходит, когда концентрация растворенных частиц в рабочем растворе превысит его предел растворимости. В пластинчатых теплообменниках эти условия могут быть достигнуты в следующих случаях:

- теплоноситель с нормальным растворением солей охлаждается ниже температуры растворения;
- теплоноситель с обратной растворимостью солей нагревается выше температуры растворимости;
- смешивание различных потоков опережает условия перенасыщения раствора;
- изменение pH теплоносителя.

Из многочисленных экспериментальных исследований и натуральных наблюдений известно, что нормально растворимые соли подобные NaCl, CaCl₂ и т.д. осаждаются на холодной стороне тогда, как соли обратной растворимости такие, как CaSO₄, CaCO₃, Li₂SO₄, Na₂SO₄, CaSiO₃, MgSiO₃, Mg(OH)₂ и т.д., осаждаются на горячей стороне. Обычно соли обратной растворимости вызывают больше проблем с загрязнением в процессе теплопередачи в водяных системах. Исследователями сделан большой прогресс в изучении процессов кристаллизационного отложения [1–9]. Однако в большинстве случаев наблюдается совместное действие двух и более видов загрязнения [10]. Многочисленные математические модели зачастую не позволяют с достаточной точностью предсказать развитие отложений на поверхности теплообмена.

Главными особенностями появления и роста загрязнений, где доминирующим процессом является кристаллизационное отложение, является следующее [11], рис. 1. Присутствие «времени появления шероховатости» («roughness delay time»), когда для нового или почищенного теплообменника начальный рост отложений служит причиной увеличения коэффициента теплопередачи. Имеет место так называемое «отрицательное» загрязнение. Физической причиной такого явления является изменение характеристик движения жидкости возле теплопередающей стенки. Появление слоя отложений в вязком подслое увеличивает турбулентность, и коэффициент теплоотдачи возрастает. Этот процесс продолжается до тех пор, пока вклад термического сопротивления слоя отложений в ослабление коэффициента теплоотдачи не станет больше, чем вклад, создаваемый за счет турбулентности [9–11].

Иногда на интервале «времени появления шероховатости» отдельно выделяют начальный период («initial period», согласно терминологии [11]), рис. 1, когда теплообменник работает с чистой поверхностью. Однако, по мнению большинства исследователей, этот период времени настолько мал или вообще отсутствует, что его можно не принимать во внимание, и в расчетах включать в общее «время появления шероховатости».

В соответствии с общепринятой классификацией различных типов загрязнений по закону изменения скорости загрязнения во времени, кристаллизационное загрязнение обычно имеет линейную зависимость

[11–13], рис. 1. Однако имеется достаточное количество исследований демонстрирующих падение скорости отложений со временем и даже ее асимптотический характер [3,4], рис. 1.

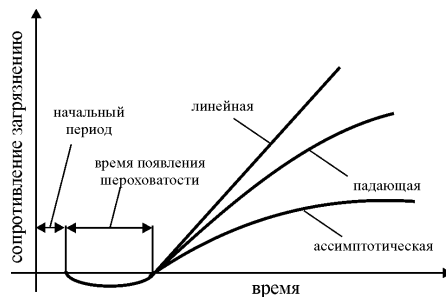


Рисунок 1 – Зависимость изменения скорости отложений от времени

Еще одним важнейшим фактором, который оказывает существенное влияние на интенсивность кристаллизационных отложений, является учет появления дополнительных центров кристаллизации с ростом загрязнения теплопередающей поверхности. Наличие этого фактора, по мнению многих исследователей, в значительной степени позволяет объяснить достаточно сильное расхождение имеющихся классических моделей образования отложений по сравнению с натурными наблюдениями.

Постановка задачи и цель работы. Многочисленные модели рассматривают появление и рост депозита как функцию концентрации солей, умноженную на функцию Аррениуса температурной зависимости. Целью настоящей работы является построение количественной модели развития загрязнений при совместном действии осаждения и кристаллизации и проверка соотношений сравнением с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Создание такой модели позволит учитывать возможное загрязнение поверхности теплообмена на стадии проектирования теплообменного аппарата.

В зависимости от условий протекания процесса теплообмена кристаллическое загрязнение может иметь диффузионную природу, быть химической реакцией или комбинированной. Традиционно классический закон для диффузионной природы отложений имеет вид

$$\dot{m}_f = B_m \cdot (k_{con} - k_w), \tag{1}$$

где \dot{m}_f – интенсивность выпадения отложений в единицу времени; B_m – коэффициент массопереноса; k_{con} – концентрация данного вида загрязнителя в потоке; k_w – концентрация загрязнителя на границе стенка – поток раствора. Классический закон для химической реакции представляется как

$$\dot{m}_f = K_R \cdot (k_w - k_s)^n, \tag{2}$$

где k_s – концентрация насыщения потока раствора; K_R и n – константа реакции и показатель степени. Если процесс загрязнения комбинированный, то исключив из уравнений (1) и (2) k_w , например для $n = 2$, можно получить

$$\dot{m}_f = B_m \cdot \left[\frac{1}{2} \left(\frac{B_m}{K_R} \right) + (k_{con} - k_s) - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{B_m}{K_R} \right)^2 + \left(\frac{B_m}{K_R} \right) \cdot (k_{con} - k_s)} \right]. \tag{3}$$

Выражения (1)–(3) представляют собой традиционные «классические» соотношения для определения весового отложения депозита на поверхности теплообмена. Иногда в эти выражения включают дополнительные множители, учитывающие нарастание отложений с увеличением количества центров зародышеобразования отложений [11,13]. При проектировании пластинчатых теплообменников практическое использование этих соотношений для прогнозирования загрязнений теплопередающей поверхности теплообменного аппарата крайне затруднено. Главными причинами здесь являются отсутствие в каждом конкретном случае какой-либо информации о входящих в соотношения значениях постоянных величин.

Теоретические положения. Уравнение, описывающее скорость роста отложений в каналах пластинчатого теплообменника, представим в виде

$$\frac{\partial m_f}{\partial t} = \frac{\partial h_f}{\partial t} \cdot F_f \cdot \rho_f \cdot (1 - \phi), \quad (4)$$

где m_f – общий вес отложений на поверхности теплопередачи, кг; h_f – усредненная толщина слоя отложений, м; F_f – площадь теплопередающей поверхности, на которой появляются отложения, м², $F_f = F_{he} \cdot k_f$, F_{he} – площадь теплопередающей поверхности, м², k_f – коэффициент, учитывающий на какой площади происходит достаточно интенсивное выпадение отложений, $0 < k_f \leq 1$; ρ_f – плотность вещества депозита, кг/м³; ϕ – относительное содержание пор в единичном объеме отложений, $0 \leq \phi < 1$.

С другой стороны интенсивность выпадения отложений, как функцию параметров теплоносителя, представим в виде

$$\frac{\partial h_f}{\partial t} \cdot F_f \cdot \rho_f \cdot (1 - \phi) = V_c \cdot (k_{con0} - k_s)^{n_k} \cdot K_{foul} \cdot \varphi(t), \quad (5)$$

где V_c – объемный расход теплоносителя в теплообменнике, м³/с, $V_c = G_c / \rho_c$, где G_c – массовый расход теплоносителя, кг/с; ρ_c – средняя плотность теплоносителя в каналах теплообменника, кг/м³; k_{con0} – начальная (входная) концентрация загрязнителя в потоке теплоносителя, кг/м³; K_{foul} – коэффициент, учитывающий скорость потока в каналах, температуру, давление, чистоту теплопередающей поверхности и т.д.; $\varphi(t)$ – коэффициент, учитывающий изменение скорости отложения во времени; n_k – постоянная величина, показатель степени.

Соотношение (5) запишем в виде

$$\frac{\partial h_f}{\partial t} = \frac{V_c \cdot (k_{con0} - k_s)^{n_k}}{F_{pl} \cdot k_f \cdot \rho_f \cdot (1 - \phi)} \cdot K_{foul} \cdot \varphi(t). \quad (6)$$

Объемный расход теплоносителя через каналы аппарата можно представить в виде [14] $V_c = w \cdot f_{ch} \cdot n_{ch}$, где w – скорость теплоносителя в каналах теплообменника, м/с; $f_{ch} = b \cdot \delta$ – площадь поперечного сечения межпластинного канала, м², b – ширина пластины, м, δ – высота гофрировки, м; n_{ch} – число каналов в аппарате для рассматриваемого теплоносителя. Площадь теплопередающей поверхности по стороне одного теплоносителя равна $F_{pl} = f_{pl} \cdot n_{ch}$, площадь пластины – $f_{pl} = b \cdot l_{pr}$, где l_{pr} – приведенная длина пластины, м. При проектировании теплообменников используют величину термического сопротивления загрязнений, которую представляют в виде $R_f = h_f / \lambda_f$, где λ_f – коэффициент теплопроводности отложений, Вт/(м·К). Такое представление, использующее величину усредненной толщины слоя отложений h_f , делает физически невозможным представление термического сопротивления загрязнений в виде отрицательной величины, как это показано на рис. 1. Для того чтобы преодолеть эту трудность необходимо качественно изменить традиционное представление $R_f = h_f / \lambda_f$, таким образом, чтобы учитывать «время появления шероховатости», связанное с ростом турбулентности потока в вязком подслое на стенке пластины. В настоящее время отсутствуют научно обоснованные математические модели позволяющие учесть этот фактор. Поэтому представим уравнение (6) в виде

$$\frac{\partial R_f}{\partial t} = \frac{w(t) \cdot f_{ch}(t) \cdot (k_{con0} - k_s)^{n_k}}{f_{pl} \cdot k_f \cdot \rho_f \cdot (1 - \phi) \cdot \lambda_f} \cdot K_{foul} \cdot \varphi(t). \quad (7)$$

Площадь поперечного сечения канала меняется с течением времени так, как по мере роста отложений уменьшается высота гофрировки. В качестве множителя, учитывающего изменение скорости отложения во времени, предлагается зависимость, описывающая падающий и асимптотический характер скорости роста сопротивления термического загрязнения, вида: $\varphi(t) = 1 - e^{-\beta \cdot (t - t_m)}$, где β – постоянный коэф-

фициент, $1/c$; t_m – время, для которого «отрицательное» загрязнение принимает максимальное значение, ч; K_{foul} – коэффициент, учитывающий влияние на образование отложений различных параметров процесса теплообмена. К таким параметрам относят: скорость теплоносителей; температура поверхности стенки; рабочее давление; геометрия, материал и шероховатость поверхности пластины и т.д. Влияние этих параметров должно быть четко известно перед началом проектирования теплообменного аппарата на выбранную позицию.

Необходимо заметить, что в выражение (7) непосредственно входят геометрические параметры теплообменного аппарата, такие как высота гофрировки (через f_{ch}), длина пластины (через f_{pl}). Это соотношение может быть переписано в виде

$$\frac{\partial R_f}{\partial t} = \frac{w_f(t) \cdot \delta_f(t) \cdot (k_{con0} - k_s)^{n_k}}{l_{pr} \cdot k_f \cdot \rho_f \cdot (1-\phi) \cdot \lambda_f} \cdot K_{foul} \cdot \varphi(t), \quad (8)$$

где δ_f – текущая высота гофрировки загрязненной поверхности пластины.

Запишем выражение для начальной скорости теплоносителя в каналах w_0 и скорости в каналах при наличии отложений – w_f

$$w_0 = V_c / (b \cdot \delta_0 \cdot n_{ch}) \quad \text{и} \quad w_f = V_c / (b \cdot \delta_f \cdot n_{ch}).$$

Откуда получим $\delta_f(t) = w_0 \cdot \delta_0 / w_f(t)$ и подставим в (8)

$$\frac{\partial R_f}{\partial t} = \frac{w_0 \cdot \delta_0 \cdot (k_{con0} - k_s)^{n_k}}{l_{pr} \cdot k_f \cdot \rho_f \cdot (1-\phi) \cdot \lambda_f} \cdot K_{foul} \cdot \varphi(t). \quad (9)$$

Из (9) следует, что при равных условиях по загрязнению теплоносителя, одинаковой скорости в каналах, интенсивность загрязнения будет больше для теплообменного аппарата с большей высотой гофры и меньшей приведенной длиной. Также можно сделать вывод о том, что увеличение пористости отложений и уменьшение поверхности подверженной накоплению отложений способствует интенсивности их роста.

Результаты и обсуждения. В качестве примера использования предложенного подхода к расчету загрязнения теплообменной поверхности пластинчатого теплообменника рассмотрим сравнение с экспериментальными данными, опубликованными в [11] для теплообменного аппарата со следующими параметрами: $b = 0,126$ м; $\delta_0 = 0,0024$ м; $f_{pl} = 0,061$ м²; толщина металла стенки пластины – 0,0006 м. В данной работе было рассмотрено совместное действие осаждения частиц из раствора и кристаллизационное загрязнение.

Загрязнение реализовывалось кристаллизацией сульфата кальция из раствора со средней концентрацией 2,985 кг/м³ в потоке, при концентрации насыщения – 2,0 кг/м³. Для рабочих условий концентрация насыщения не изменялась с температурой. Начальная скорость потока раствора в каналах теплообменника была равной $w_0 = 0,35$ м/с. Условия проведения эксперимента были выбраны такими, чтобы отложения появлялись на поверхности теплопередачи (стенке), а не образовывались в объеме жидкости. Входная температура раствора 50–52 °С, входная температура греющей воды 86–88 °С, входная концентрация раствора 2,993 кг/м³, максимальное время проведения эксперимента – 4600 минут. Коэффициент теплопроводности отложений принимался равным в среднем $\lambda_f = 2$ Вт/(м·К). Результирующая величина сопротивления загрязнению за время $\tau = 4600$ мин. $R_f = h_f / \lambda_f = 3,2 \cdot 10^{-5}$ м²·К/Вт или $h_f = 6,4 \cdot 10^{-5}$ м, если считать отложения равномерно распределенными по поверхности теплообмена.

В качестве коэффициента, учитывающего влияние параметров теплообмена в пластинчатом аппарате, примем $K_{foul} = w^{-n_w}(t)$, где n_w – постоянная величина. Значение коэффициента β определим из соотношения $k_s / k_{con0} = 1 - e^{-\beta \cdot \tau}$. Для заданных условий $k_{con0} = 2,993$ кг/м³, $k_s = 2,0$ кг/м³, для $\tau = 4600$ мин или ~76,7 часов $\beta = 0,014$. Из экспериментальных данных, приведенных в работе [11], можно сделать вывод, что за время проведения эксперимента скорость в каналах теплообменника примерно линейно возросла

и за 4600 мин работы достигла значения 0,629 м/с. Тогда изменение скорости будем описывать линейной функцией $w_f(t) = w_0 + k_\tau \cdot t$, где $k_\tau = 3,64 \cdot 10^{-3}$ м/с².

Примем значение постоянных величин $n_w = 1 + tg\beta_g$ и $n_k = 1$, где β_g – угол наклона гофрировки пластины [14]. Для термического сопротивления загрязнению поверхности теплообмена R_f можно записать соотношение

$$R_f(t) = \frac{b \cdot w_0 \cdot \delta_0 \cdot (k_{con0} - k_s)}{f_{pl} \cdot k_f \cdot \rho_f \cdot (1 - \phi) \cdot \lambda_f} \int_0^\tau \frac{1 - e^{-\beta \cdot (t - t_m)}}{(w_0 + k_\tau \cdot t)^{1 + tg\beta_g}} dt. \quad (10)$$

В соотношении (10) плотность вещества отложений принималась 2960 кг/м³. Величина пористости определяется физическими свойствами загрязнителя и условиями его отложения на теплопередающей поверхности. Это значение можно вычислить, воспользовавшись экспериментальной зависимостью приведенной в работе [15]

$$\phi = (0,0048 \cdot T^2 - 0,8803 \cdot T + 46,804) / 100, \quad (11)$$

где T – температура, °С. Для сульфата кальция при данной концентрации в заданном температурном интервале значение коэффициента пористости, вычисленное из соотношения (11), равно 0,14.

Согласно исследованиям, опубликованным в [11–13] кристаллические отложения распределяются по площади пластины неравномерно. Наибольшие отложения наблюдаются в местах замедления скорости потока, особенно возле точек контакта. С другой стороны для участков с максимальной скоростью отложения могут практически отсутствовать. Поэтому определить заранее коэффициент k_f , показывающий какая площадь фактически подвержена загрязнению, крайне затруднительно. В настоящей работе в расчетах этот коэффициент принят равным 0,95.

Подставим геометрические параметры теплообменника, значение $\beta = 0,014$, $t_m = 14,5$ ч и значения других коэффициентов в (10), и получим для термического сопротивления отложений $R_f = 3,189 \cdot 10^{-5}$ м²·К/Вт и толщины загрязнения $h_f = 6,378 \cdot 10^{-5}$ м. Относительная погрешность с полученным экспериментальным значением из [11] $R_f = 3,2 \cdot 10^5$ м²·К/Вт составляет ~ 0,35 %.

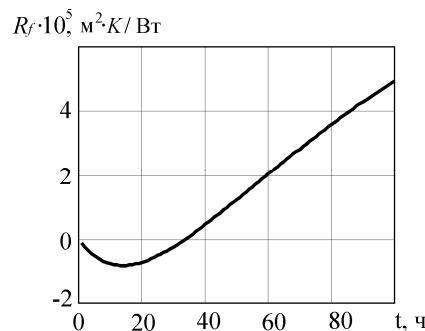


Рисунок 2 – Рост величины термического сопротивления отложений во времени

На рис. 2 представлен рост величины термического сопротивления отложений во времени на поверхности теплообмена при заданном значении максимального «отрицательного» загрязнения поверхности. $t_m = 14,5$ ч. Время «появления шероховатости» практически всегда имеет место для чистых поверхностей и проявляется не так сильно для очищенных от загрязнений поверхностей пластин. Значение этой величины обладает большим разбросом и на практике колеблется от нескольких часов до нескольких суток, и зависит от концентрации загрязнителя в теплоносителе, первоначального состояния поверхности теплообмена, скорости потока и температуры стенки.

Соотношение (10) отражает асимптотический характер накопления отложений, который представлен на рис. 3 экстраполяцией полученной кривой на рис. 2 для более протяженного времени работы теплообменника.

Зависимость изменения термического сопротивления отложений накопленных за время $t = 76,7$ ч от времени максимального «отрицательного» загрязнения t_m представлена на рис. 4. Можно видеть, что для времени $t_d = 30$ ч накопленное значение термического сопротивления будет оставаться отрицательным, что соответствует большему значению фактического коэффициента теплопередачи по сравнению с первоначальным расчетным значением.

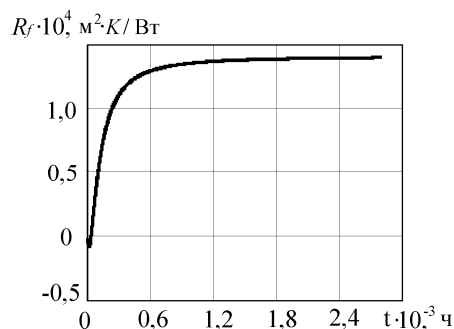


Рисунок 3 – Прогнозирование изменения термического сопротивления загрязнению

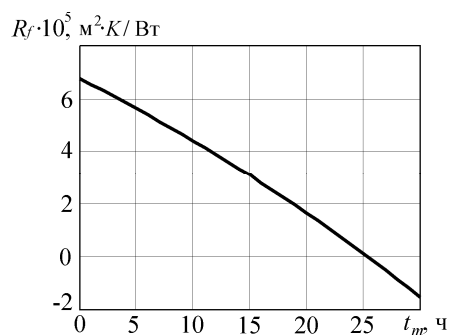


Рисунок 4 – Изменение величины термического сопротивления отложений в зависимости от времени максимального «отрицательного» загрязнения t_m

Величина «времени появления шероховатости» и максимального «отрицательного» загрязнения зависит от параметров работы теплообменника. Чем выше начальная скорость в каналах аппарата, тем больше величина «времени появления шероховатости», т.е. при прочих равных условиях, с увеличением скорости возрастает время первоначального загрязнения поверхности теплопередачи.

Заключение. Представлена модель, позволяющая при известных характеристиках потока теплоносителя и параметрах теплообменного аппарата прогнозировать толщину слоя отложений в течение срока эксплуатации пластинчатого теплообменника. Предложенная модель учитывает наличие «отрицательного» сопротивления загрязнению в начале работы чистого теплообменника и описывает скорость роста отложений во времени падающей и асимптотической кривой. Также учитываются свойства раствора теплоносителя, пористость отложений, площадь покрытия загрязнений на пластине и ее геометрические параметры, скорость теплоносителя в каналах и некоторые другие характеристики депозита. Проведенное сравнение с экспериментальными результатами для сульфата кальция показало хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Литература

1. Hasson D. Rate of decrease of heat transfer due to scale deposition / D. Hasson // DECHEMA Monogr. – 1962. – Vol.47. – P. 233–282.
2. Reitzer B. J. Rate of scale formation in tubular heat exchangers / B. J. Reitzer // I&EC Process Des. Dev. – 1964. – Vol.3, №4. – P. 345–348.
3. Bohnet M. Fouling of heat transfer surfaces / M. Bohnet// Chem. Eng. Technol. – 1987. – Vol.10. – P. 113–125.

4. Watkinson A. P. Scaling of heat exchanger tubes by calcium carbonate / A. P. Watkinson, O. Martinez // ASME J. Heat Transfer – 1975. – Vol. 97. – P. 504–508.
5. Гонионский В.Т. Вычисление коэффициента теплопередачи с учетом образования отложений [Текст] / В.Т. Гонионский, С.И. Голуб, А.М. Розен // Теплопередача.– 1970. – Т.2, №3. – С. 116–121.
6. Арсеньева О.П. Уменьшение образования отложений со стороны охлаждающей воды в пластинчатых теплообменных аппаратах промышленных предприятий / О. П. Арсеньева // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тем. выпуск «Инновационные исследования в научных работах студентов». – Харьков : НТУ «ХПИ».– 2012. – № 10. – С. 13–28.
7. Bansal B. Deposition and removal mechanisms during calcium sulphate fouling in heat exchangers / B. Bansal, X.D. Cheng, H. Muller-Steinhagen // Int. J. Transport Phenom.– 2005.–Vol. 7.– P. 1–22.
8. Bansal B. Effect of suspended particles on crystallization fouling in plate heat exchangers // B. Bansal, H. Muller-Steinhagen, X.D. Cheng // ASME J. Heat Transfer – 1997.–Vol.19. – P. 568–574.
9. Andritsos N. The influence of particulates on CaCO₃ scale formation / N. Andritsos, A. J. Karabelas // ASME J. Heat Transfer. – 1999. – Vol.121. – P. 225–227.
10. Yu H. The effects of silica and sugar on the crystallographic and morphological properties of calcium oxalate / H. Yu, R. Sheikholeslami, W.O.S. Doherty // J. Crystal Growth. – 2004. – Vol. 265. – P. 592–603.
11. Bansal B. Analysis of “classical” deposition rate low for crystallization fouling / B. Bansal, X.D. Cheng, H. Muller-Steinhagen // Chemical Engineering and Processing.– 2008. – Vol. 47.– P. 1201–1210.
12. Bansal B. Crystallization fouling in heat exchangers / B. Bansal, H. Muller-Steinhagen // ASME J. Heat Transfer. – 1993. – Vol. 115. – P. 584–591.
13. Bansal B. Performance of plate heat exchangers during calcium sulphate fouling – investigation with an in-line filter / B. Bansal, H. Muller-Steinhagen, X.D. Cheng // Chemical Engineering and Processing. – 2000. – Vol. 39. – P. 507–519.
14. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении: Монография / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, Г.Л. ХАВИН, О.П. АРСЕНЬЕВА / Под ред. Г.Л. Хавина.– Харьков: НТУ «ХПИ», 2007.– 448 с.
15. Бубликов И.А. Исследование термического сопротивления отложений в теплообменниках, охлаждаемых технической водой [Текст] / И.А. Бубликов, З.Л. Миропольский, Б.Е. Новиков // Теплоэнергетика. – 1992. – №5.– С. 71–74.

Bibliography (transliterated)

1. Hasson D. Rate of decrease of heat transfer due to scale deposition D. Hasson DECHEMA Monogr. – 1962. – Vol.47. – P. 233–282.
2. Reitzer B. J. Rate of scale formation in tubular heat exchangers B. J. Reitzer I&EC Process Des. Dev. – 1964. –Vol.3, #4. – P. 345–348.
3. Bohnet M. Fouling of heat transfer surfaces M. Bohnet Chem. Eng. Technol. – 1987. – Vol.10. – P. 113–125.
4. Watkinson A. P. Scaling of heat exchanger tubes by calcium carbonate A. P. Watkinson, O. Martinez ASME J. Heat Transfer – 1975. –Vol. 97. – P. 504–508.
5. Gonionskij V.T. Vychislenie koefefficienta teploperedachi s uchetom obrazovaniya otlozhenij [Tekst] V.T. Gonionskij, S.I. Golub, A.M. Rozen Teploperedacha.– 1970. – Т.2, #3. – p. 116–121.
6. Arsen'eva O.P. Umen'shenie obrazovaniya otlozhenij so storony ohlazhdajushhej vody v plastincha-tyh teploobmennyh apparatah promyshlennyh predpriyatij O. P. Arsen'eva Vestnik NTU «HPI». Sbornik nauchnyh trudov. Tem. vypusk «Innovacionnye issledovaniya v nauchnyh rabotah studentov». – Har'kov : NTU «HPI».– 2012. – # 10. – p. 13–28.
7. Bansal B. Deposition and removal mechanisms during calcium sulphate fouling in heat exchangers / B. Bansal, X.D. Cheng, H. Muller-Steinhagen Int. J. Transport Phenom.– 2005.–Vol. 7.– P. 1–22.
8. Bansal B. Effect of suspended particles on crystallization fouling in plate heat exchangers B. Bansal, H. Muller-Steinhagen, X.D. Cheng ASME J. Heat Transfer – 1997.–Vol.19. – P. 568–574.
9. Andritsos N. The influence of particulates on CaCO₃ scale formation N. Andritsos, A. J. Karabelas ASME J. Heat Transfer. – 1999. – Vol.121. – P. 225–227.
10. Yu H. The effects of silica and sugar on the crystallographic and morphological properties of calcium oxalate H. Yu, R. Sheikholeslami, W.O.S. Doherty J. Crystal Growth. – 2004. – Vol. 265. – P. 592–603.
11. Bansal B. Analysis of “classical” deposition rate low for crystallization fouling B. Bansal, X.D. Cheng, H. Muller-Steinhagen Chemical Engineering and Processing.– 2008. – Vol. 47.– P. 1201–1210.
12. Bansal B. Crystallization fouling in heat exchangers B. Bansal, H. Muller-Steinhagen ASME J. Heat Transfer. – 1993. – Vol. 115. – P. 584–591.

13. Bansal B. Performance of plate heat exchangers during calcium sulphate fouling – investigation with an in-line filter В. Bansal, Н. Muller-Steinhagen, X.D. Cheng Chemical Engineering and Processing. – 2000. – Vol. 39. – P. 507–519.

14. Platinchatye teploobmenniki v teplosnabzhenii: Monografija L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapus-tenko, G.L. Havin, O.P. Arsen'eva Pod red. G.L. Havina.– Har'kov: NTU «HPI», 2007.– 448 p.

15. Bublikov I.A. Issledovanie termicheskogo soprotivlenija otlozhenij v teploobmennikah, ohlazh-daemyh tehničeskoj vodoj [Tekst] I.A. Bublikov, Z.L. Miropol'skij, B.E. Novikov Teplojenergetika. – 1992. – #5.– p. 71–74.

УДК 621.565.954

Хавін Г.Л.

ПРОГНОЗУВАННЯ ВЕЛИЧИНИ ВІДКЛАДЕНЬ НА ПОВЕРХНІ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Розглянуто задачу прогнозування величини кристалізаційних відкладень для пластинчатих теплообмінників. Надано математичну модель що до розрахунку відкладень, що враховує час появи забруднення, характеристики потоку теплоносія та геометричні параметри пластини теплообмінного апарату. Проведене порівняння з експериментальними результатами продемонструвало гарну збіжність розрахункових та експериментальних даних.

G. Khavin

THE PREDICTION OF DEPOSIT PROCESS ON THE SURFACE OF PLATE HEAT EXCHANGERS

The problem of crystallization fouling prediction for plate heat exchanger is considered. The mathematical model for calculation of deposits, which taking into account roughness delay time, behavior of stream carrier and plate's geometrical parameters of plate heat exchanger is presented. The comparison between theoretical and experimental results is made and it showed a good coincided of data.