

О.П. АРСЕНЬЕВА, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

УМЕНЬШЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ СО СТОРОНЫ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ В ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В роботі досліджуються процеси утворювання відкладень по стороні охолоджувальної води у пластинчастих теплообмінних апаратах. Розглянуті різні механізми утворювання відкладень. Проаналізований вплив параметрів процесів у каналах пластинчастих теплообмінних апаратів зі складною геометричною формою на рівень утворення відкладень. Запропонована математична модель для прогнозування термічного опору забруднень для механізмів утворення накипу та осідання бруду при різних швидкостях потоку

В работе исследуются процессы образования отложений со стороны охлаждающей воды в пластинчатых теплообменных аппаратах. Рассмотрены различные механизмы образования отложений. Проанализировано влияние параметров процессов в каналах пластинчатых теплообменных аппаратов со сложной геометрической формой на уровень образования отложений. Предложена математическая модель для прогнозирования термического сопротивления загрязнений механизмов образования накипи и осаждения загрязнений при разных скоростях потока

The processes of fouling formation for cooling water side in plate heat exchangers are investigated. The different types of fouling formation mechanisms are discussed. The influence of process parameters in plate heat exchangers' channels with complex geometry on the fouling level is analyzed. The mathematical model is proposed for fouling thermal resistance prediction for precipitation and particulate fouling under the different stream velocities

Введение. При применении возобновляемых источников энергии, тепловых насосов, установок когенерации и полигенерации совместно с традиционными источниками тепла в промышленности и коммунальном секторе возникают новые задачи эффективной рекуперации тепла [1]. Пластинчатые теплообменные аппараты (ПТА) являются одним из наиболее эффективных видов теплообменного оборудования, которое удовлетворяет этим новым задачам. Схема и принцип работы пластинчатых теплообменных аппаратов хорошо описаны в литературе [2, 3, 4]. В этих теплообменных аппаратах процессы теплообмена протекают в каналах сложной геометрической формы, сформированных гофрированными пластинами изготавливаемыми штамповкой из тонкого листового металла.

Форма гофрировки пластин определяет тепловые и гидравлические характеристики межпластинных каналов.

При анализе различных методик уменьшения загрязнений со стороны охлаждающей воды Панчал и Кнудсен [5] охарактеризовали использование интенсифицированных теплообменных поверхностей как один из наиболее перспективных методов. Интенсификация теплообмена является основной характеристикой пластинчатых теплообменных аппаратов, и уменьшение отложений представляет больше преимуществ при использовании этого типа теплообменного оборудования для различных случаев применения в промышленности. Для определения границ применения ПТА и оптимизации их конструкций с целью минимизации загрязнений их поверхности, необходимо установить влияние параметров процессов в каналах ПТА сложной геометрической формы на уровень образования отложений.

При подборе теплообменного аппарата для охлаждения технологической жидкости нужно в точности соблюсти температурные и гидравлические условия по стороне этой жидкости. Начальная температура охлаждающей воды, также как и ее свойства, не могут быть изменены при проектировании. В общем случае можно немного поменять расход и вследствие этого изменить температуру охлаждающей воды на выходе, с учетом ограничений всей охлаждающей системы предприятия. Могут быть изменены только внутренние параметры конструкции ПТА, такие как число, размер и форма гофрировки теплопередающих пластин, количество ходов потоков. Это влечет за собой изменения геометрии каналов, скоростей потоков и температуры стенки внутри теплообменного аппарата. Поэтому влияние этих параметров имеет очень важное значение для определения уровня образования отложений и его контроля.

Как указано для кожухотрубчатых теплообменных аппаратов в стандартах ТЕМА [6], различают пять различных типов механизмов образования отложений: накипеобразование, осаждение взвешенных частиц, химические реакции, коррозионные отложения, биологические отложения. Снижение уровня коррозионных отложений в ПТА возможно путем применения достаточно коррозионно устойчивой стали, что может быть значительно экономнее, чем для кожухотрубчатых аппаратов из-за меньшей площади поверхности для одинаковых условий и более тонкой

стенки пластин, вплоть до 0.5 – 0.3 мм. Большинство моделей, описывающих другие механизмы образования отложений [5], основаны на предсказании уровня образования отложений как разницы между интенсивностью осаждения отложений φ_d и интенсивностью удаления отложений φ_r :

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

где δ – толщина отложений, мм; t – время, с.

При φ_d равном φ_r слой осадка не увеличивается. Это возможно в двух случаях: а) удаление больше чем прилипание отложений к поверхности стенки и только после некоторого порогового условия может начаться процесс накопления отложений; б) уровень удаления прямо пропорционален толщине отложений δ , или же уровень осадений обратно пропорционален δ . В этом случае после некоторого времени t^* толщина осадений стабилизируется и приближается к некоторому асимптотическому значению δ^* .

Асимптотические значения термического сопротивления загрязнений. Асимптотическое поведение водных отложений на теплопередающей поверхности наблюдалось многими исследователями [5, 7, 8, 9, 10]. Это обычно происходит после того, как скорость потока достигнет достаточно высоких значений, которые обеспечивают определенный уровень касательного напряжения τ_w на стенке. Предположим, что в условиях асимптотического характера отложений все воздействия направленные на рост отложений учитываются интенсивностью осаждения φ_d^* , а все воздействия по их уменьшению учитываются интенсивностью удаления отложений φ_r^* . Сделаем еще одно допущение о том, что φ_r^* пропорционально касательному напряжению на стенке, возведенному в некоторую степень m и толщине отложений δ^* :

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

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

Когда толщина отложений достигает асимптотического значения, ее производная по времени равна нулю, и из уравнений (1) и (2) следует:

$$\delta^* = \varphi_d^* / (b \cdot \tau_w^m) \quad (3)$$

Тогда, зная теплопроводность осажденных загрязнений λ_f^* , можно выразить асимптотическое значение термического сопротивления отложений следующим образом:

$$R_f^* = B^* \cdot \tau_w^{-m}, \quad (4)$$

где $B^* = \varphi_d^* / (b^* \cdot \lambda_f^*)$.

Всестороннее исследование дисперсных отложений для воды в каналах ПТА было изложено в работе Карабеласа [7]. Эксперименты были проведены для каналов ПТА образованных коммерческими пластинами с углами наклона гофр 60° и 30° . Обнаружено асимптотическое поведение термического сопротивления отложений с течением времени, а также значительное влияние скорости потока.

Определить касательное напряжение на стенке основного гофрированного поля межпластинных каналов можно согласно выражению:

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

где ζ_s – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления единицы относительной длины канала (учитывающий потери от трения на стенке и от гидродинамического сопротивления формы). Для каналов сетчато-поточного типа пластинчатых теплообменников этот коэффициент определялся согласно формуле, представленной в работе [11]. Доля потерь на трение ψ можно определить по выражению, представленному в работе [12]:

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

где β – угол наклона гофр к продольной оси пластины. Число Рейнольдса Re рассчитано для скоростей, представленных в работе [7] при эквивалентном диаметре $De=0.005$ мм, теплофизические свойства воды взяты при температуре 40°C . Отношение высоты гофр к половине шага гофр равно $\gamma = 0.581$.

На Рис. 1 представлены экспериментальные данные по загрязнениям из работы [7] для различных значений касательного напряжения на стенке. Отчетливо видно, что касательное напряжение на стенке оказывает влияние на асимптотическое значение термического сопротивления загрязнений. Данные, коррелированные по формуле (4) при $m=1$ и $V^*=3.5 \cdot 10^{-4}$ К·с/м представлены на Рис. 1 сплошной линией. Для касательного напряжения на стенке более чем 40 Па термическое сопротивление загрязнений становится очень малым (менее 10^{-5} м²К/Вт) и данные нестабильны.

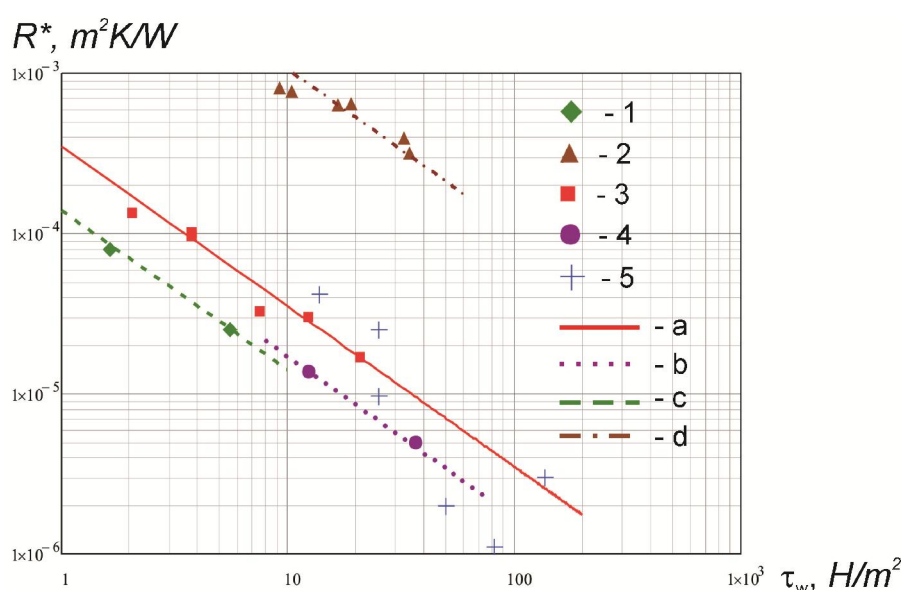


Рис. 1. Влияние касательного напряжения на стенке на асимптотическое значение термического сопротивления отложений: 1 и линия с – кольцевой канал [10]; 2 и линия d – канал ПТА с $\beta=60^\circ$ [13]; 4 и линия b – канал ПТА с $\beta=60^\circ$ [9]; 3 и линия a – канал ПТА с $\beta=30^\circ$ [7]; 5 – канал ПТА с $\beta=60^\circ$ [7]

Процесс отложения сульфатов кальция в каналах ПТА исследовали Банзал и др. [8] на образцах ПТА изготовленных из коммерческих пластин с шевронной гофрировкой. Угол наклона гофр $\beta = 60^\circ$. Для исследования влияния скорости было проведено и серии экспериментов со скоростями 0.183 м/с, 0.352 м/с и 0.667 м/с. Все остальные условия проведения экспериментов оставались неизменными. Касательное напряжение на стенке канала мы определили согласно выражениям (5) и (6), представленным выше. Расчеты проводились для температуры воды 61°C , $D_e=0.005$ мм и $\gamma = 0.581$. Две точки на Рис. 1 соответствуют терми-

ческим сопротивлениям отложений в конце экспериментов (после 7,000 минут), при скоростях 0.352 м/с и 0.667 м/с. Серия испытаний при наименьшей скорости закончилась только после 2,000 минут и не позволила определить R_f^* . Данные коррелированы по формуле (4) при $m=1$ и $B^*=2.05 \cdot 10^{-4}$ К·с/м.

Процесс образования отложений карбоната кальция на внутритрубной поверхности в кольцевом канале был экспериментально изучен Женхуа и др. [10]. Проведено две серии экспериментов для скоростей 0.6 и 1.2 м/с при одинаковых остальных условиях. На Рис. 1 представлены данные, определяющие касательное напряжение на стенке для гладкого кольцевого канала. Данные коррелированы по формуле (4) при $m=1$ и $B^*=1.45 \cdot 10^{-4}$ К·с/м.

Все указанные исследования были проведены в лабораторных условиях на малых пластинчатых теплообменных аппаратах или же на экспериментальных моделях каналов. Данные экспериментальных исследований загрязнений вследствие накипеобразования в промышленных ПТА, используемых для нагрева водопроводной воды для системы коммунального теплоснабжения, представлены в работе Чернышева [13].

Теплообменный аппарат типа M10В производства компании AlfaLaval, состоящий из 78 пластин, был установлен в системе централизованного теплоснабжения города Тула в России. Особенностью этой системы является то, что в ней используется устаревшая на сегодняшний день «открытая» схема, когда горячая вода просто отбирается из контура отопления. Для этого необходимо сначала нагреть свежую водопроводную воду до температуры контура отопления, которая значительно выше, чем в схемах с «закрытым контуром отопления». Из-за высокого содержания солей жесткости в исследованной водопроводной воде (780 мг/л) и необходимости нагревать ее до температуры 60–63 °С и выше, теплообменный аппарат очень загрязнялся. Загрязнения зависят от температуры нагреваемой пресной воды и, следовательно, от расположения по длине пластины. Характерное распределение осаждения загрязнений после достижения асимптотической толщины осадений, представлены на Рис. 2. Данные по среднему значению асимптотического термического сопротивления отложений, приведенные в работе [13] при трех различных скоростях потока (от 0.26 до 0.57 м/с) представлены на Рис. 1.

Термическое сопротивление отложений рассчитывалось по данным для толщины загрязнений и для значения теплопроводности загрязнений 1.03 мК/Вт, приведенным в работе [13]. Согласно выражениям (5) и (6), описанным выше, мы определили касательное напряжение стенки. Температура воды принималась 61°C, $D_e=0.005$ мм, $\gamma = 0.581$. Данные коррелированы уравнением (4) при $m=1$ и $B^*=115 \cdot 10^{-4}$ К·с/м. Понижение значений для наименьших скоростей вызваны относительно большой толщиной загрязнений (до 0.8 мм) по сравнению с расстоянием между пластинами (2.5 мм). Это приводит к более низким значениям действительной площади поперечного сечения для потока воды, более высоким значениям скорости и касательного напряжения, по сравнению с вычисленными значениями для чистого поперечного сечения канала.

Представленные выше данные получены для четырех различных условий образования загрязнений при движении воды в различных каналах. Для одинакового значения касательного напряжения на стенке асимптотические значения термического сопротивления загрязнений существенно отличаются. Они зависят от множества факторов: концентрации, природы и гранулометрического состава взвешенных частиц [7]; концентрации растворимых солей [8, 10] и состава смеси различных солей [14]; температуры воды и стенок канала [8, 10]. Однако для одинакового качества воды и температурных условий зависимость асимптотического значения термического сопротивления загрязнений от касательного напряжения на стенке описывается одинаковыми соотношениями. Оно обратно пропорционально касательному напряжению на стенке. Учитывая допущения, сделанные при выводе выражения (4), можно сделать вывод, что интенсивность удаления загрязнений φ_r^* в уравнении (1) пропорциональна касательному напряжению на стенке в степени $m=1$.

Определение интенсивности осаждения φ_d^* при условии, когда достигнуто асимптотическое значение загрязнений, является сложной задачей. Очень много параметров влияет на это значение. Но для большого предприятия с централизованным контуром охлаждающей воды качество воды одинаково для всех охладителей. В этом случае, при определении асимптотического загрязнения для воды в одном из теплообменных аппаратов, можно вычислить значение коэффициента B^* в выражении (4) и использовать это значение для определения загрязнений охлаждающей

воды для расчета ПГА для этого предприятия на всех других позициях охлаждения водой основного контура.



а) греющий теплоноситель

б) водопроводная вода

Рис. 2. Две стороны пластины после года эксплуатации для нагрева водопроводной воды в системе централизованного теплоснабжения (водопроводная вода подается снизу, греющая вода из системы отопления – сверху)

Особое внимание необходимо уделить условиям, когда основным механизмом формирования загрязнений является образование накипи. На Рис. 2 представлены фотографии двух сторон пластины теплообменного аппарата, который проработал примерно год в системе централизованного теплоснабжения города Киева (Украина) для нагрева водопроводной воды. Сторона а) контактировала с водой из системы теплоснабжения. Здесь происходило загрязнение за счет осаждения взвешенных в воде твердых частиц. На пластине заметны слабые отложения, равномерно распределенные по длине пластины, с некоторым увеличением в области входа горячего теплоносителя. Сторона пластины б) контактировала с пресной водой нагретой от $5 \div 10$ °С до 57 °С для горячего водоснабжения. На этой стороне поверхность пластины рядом со входом холодной водопроводной воды чистая, отложения начинаются и продолжают значительно расти по мере приближения к выходу из канала, с увеличением температуры воды и стенки. Это можно оценить при изучении Рис.3, на котором представлены фрагменты распределения загрязнений по длине пластины.

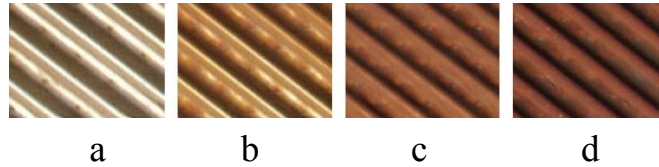


Рис. 3. Фотографии четырех частей поверхности пластины *a, b, c, d* – от входа нагреваемой воды до ее выхода из каналов ПТА

Можно сделать вывод, что для загрязнений при накипеобразовании существуют некоторые критические условия по температуре воды и содержанию солей, после которых начинается образование накипи. Таким образом, когда в контуре охлаждающей воды предприятия возможно образование накипи, температура на выходе из ПТА должна оставаться менее определенного уровня, который зависит от качества охлаждающей воды этого предприятия.

Зависимость отложения загрязнений от времени. Предположим, что интенсивность удаления отложений φ_r в течение всего времени образования загрязнений определяется согласно формуле (2) при $m=1$:

$$\varphi_r = b \cdot \tau_w \cdot \delta \quad (7)$$

Изменение термического сопротивления отложений во времени, при теплопроводности отложений λ_f , можно описать выражением, выведенным из соотношения (1):

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{\varphi_d}{\lambda_f} - b \cdot \tau_w \cdot R_f \quad (8)$$

При φ_d , b , λ_f и τ_w не зависящих от времени образования отложений t и толщине отложений δ , задача интегрирования дифференциального линейного уравнения (8) не представляет сложности. Для приближенного решения в некоторый момент времени t можно использовать значения этих параметров, усредненные по времени за период времени $0 \div t$. Тогда термическое сопротивление отложений в некоторый момент времени t после интегрирования выражения (8):

$$R_f(t) = \frac{B}{\tau_w} \cdot \left[1 - \exp\left(1 - \frac{\varphi_d}{B} \cdot \tau_w \cdot t\right) \right], \quad (9)$$

где $B = \varphi_d / (b \cdot \lambda_f)$.

Для определения коэффициента B возьмем его значение для случая асимптотических условий загрязнения $B=B^*$. Как показано при изучении

распределения образования отложений вдоль длины пластины, процесс загрязнений для воды в ПТА демонстрирует пороговое поведение. В последнее десятилетие концепция «пороговых загрязнений» была в значительной степени разработана для загрязнений образуемых на поверхностях теплопередачи при нагреве сырой нефти. После того, как эта концепция была впервые представлена Эбертом и Панчалом [15], она получила развитие в работах Полли и др. [16], Епа и др. [17] и Янга и др. [18]. Янг и Критенден [19] предложили применение их модели для труб с интенсификаторами теплоотдачи. Интенсивность осаждения согласно их модели можно выразить следующим образом:

$$\varphi_d = \frac{A_m \cdot C_f \cdot u \cdot T_s^{2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot \mu^{-4/3}}{1 - B_m \cdot u^3 \cdot C_f^2 \cdot \rho^{-1/3} \cdot \mu^{-1/3} \cdot T_s^{2/3} \cdot \exp(E / (R \cdot T_s))} \quad (10)$$

где T_s – температура поверхности, К; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – 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. Значения параметров, которые дают наилучшее согласование с экспериментальными данными для исследованной в работе [19] нефти, следующие:

$$E=52100 \text{ Дж/Моль}; A_m=7.93 \cdot 10^{-10} \text{ кг}^{2/3} \text{ К}^{1/3} \text{ м}^{5/3} (\text{КВт})^{-1} \text{ с}^{-1/3} \text{ ч}^{-1}; \quad (11)$$

$$B_m=1.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{13/3} \text{ кг}^{2/3} \text{ с}^{8/3} \text{ К}^{-2/3}.$$

Для случая интенсификации теплоотдачи скорость u определяется как эквивалентная скорость, которая является скоростью в гладкой трубе имеющей такое же касательное напряжение на стенке как и в трубе с интенсифицированной теплоотдачей того же внутреннего диаметра. Предположим, что вышесказанное справедливо также для каналов ПТА и гладкой трубы такого же эквивалентного диаметра de .

Для развитого турбулентного потока в прямой гладкой трубе с внутренним диаметром de коэффициент трения Фаннинга можно рассчитать согласно уравнения Блазиуса:

$$C_f = 0.0791 \cdot (u \cdot \rho \cdot de / \mu)^{-0.25} \quad (12)$$

Касательное напряжение на стенке в прямой гладкой трубе:

$$\tau_w = C_f \cdot \rho \cdot u^2 / 2 \quad (13)$$

Для известного значения касательного напряжения на стенке в канале с улучшенной теплоотдачей эквивалентная скорость в гладкой трубе

может быть вычислена согласно уравнению (13), используя выражение (10) для C_f :

$$u = \left(\frac{\tau_w \cdot de^{0.25} \cdot 2}{\mu^{0.25} \cdot \rho^{0.75} \cdot 0.0791} \right)^{\frac{1}{2-0.25}} \quad (14)$$

Произведение C_f и u из выражения (13):

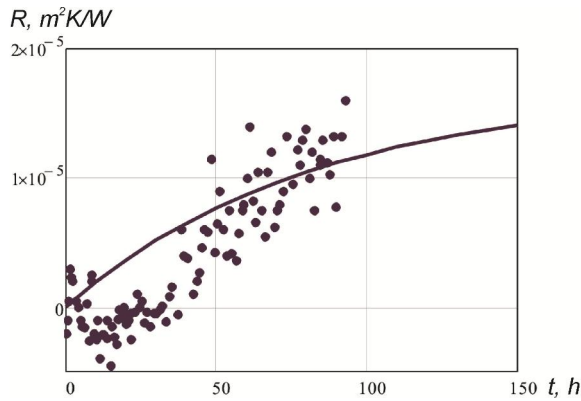
$$P_{cu} = C_f \cdot u = \frac{2 \cdot \tau_w^{\frac{1}{1.75}}}{\rho} \left(\frac{de^{0.25} \cdot 2}{\mu^{0.25} \cdot \rho^{0.75} \cdot 0.0791} \right)^{-\frac{1}{1.75}} \quad (15)$$

Исключая C_f и u из выражения (10), и используя выражения (13) и (15) получим соотношение для интенсивности осаждения, выраженное через касательное напряжение на стенке:

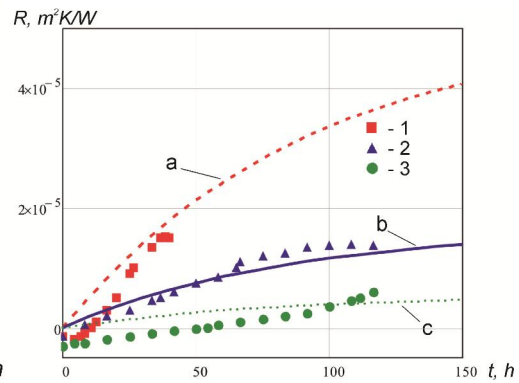
$$\varphi_d = \frac{A_m \cdot P_{cu} \cdot T_s^{2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot \mu^{-4/3}}{1 - B_m \cdot P_{cu} \cdot 2 \cdot \tau_w \cdot \rho^{-4/3} \cdot \mu^{-1/3} \cdot T_s^{2/3} \cdot \exp(E / (R \cdot T_s))} \quad (16)$$

Используя соотношение (16) и значение величины B^* , полученное в предыдущем разделе путем анализа данных по асимптотическому термическому сопротивлению отложений, можно по выражению (9) рассчитать термическое сопротивление отложений в некоторый момент времени t . Так как свойства нефти и воды значительно отличаются, эмпирические параметры A_m , B_m , E для случая воды необходимо скорректировать.

Для удовлетворения экспериментальным данным по осаждению сульфата кальция в каналах ПТА, представленных Банзалом и др. [8], мы скорректировали только один параметр A_m . Для значения $A_m = 6.5 \cdot 10^{-12} \text{ кг}^{2/3} \text{ К}^{1/3} \text{ м}^{5/3} (\text{Вт})^{-1} \text{ с}^{-1/3} \text{ ч}^{-1}$ вычисленные значения термических сопротивлений загрязнений при различных скоростях потока представлены кривыми на Рис. 4.1. Эти данные сравниваются с экспериментальными данными, взятыми из рисунка в работе [8]. В работе Бензала и др. [9] представлены данные для загрязнений сульфатом кальция в ПТА при одной скорости потока. Данные, приведенные на графике в этой работе представлены на Рис. 4.2. Учитывая разброс данных, согласование с вычислениями согласно представленной модели (сплошные линии на Рис. 4.2) достаточно хорошее. Малые значения в начальный период можно объяснить так же, как это сделали авторы работы [8]. Для образования отложений на теплопередающей поверхности может быть необходимо некоторое начальное время задержки.



4.1



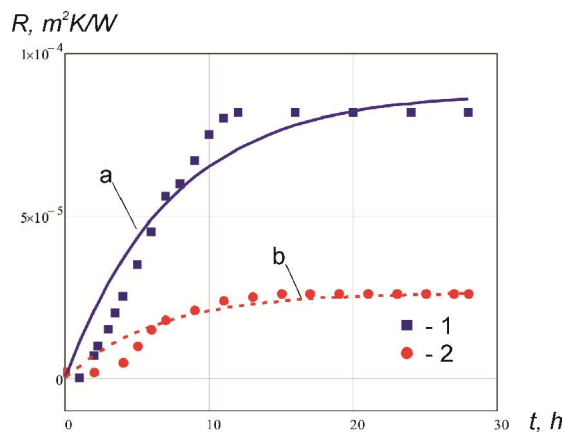
4.2

Рис. 4. Термическое сопротивление загрязнений в канале ПТА:

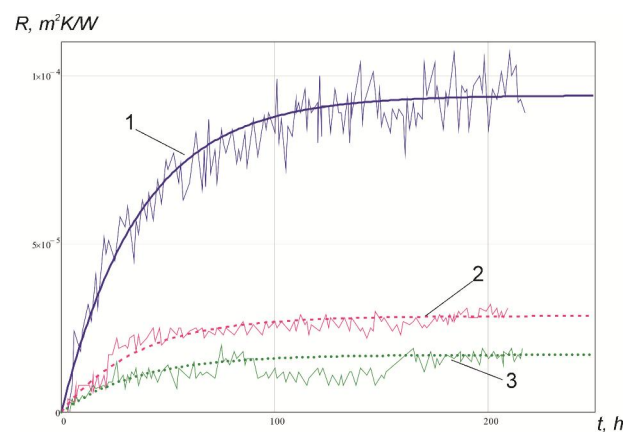
4.1 – для $\beta=60^\circ$ при осаждении сульфата кальция [8]: 1 и линия а – $w=0.183$ м/с; 2 и линия b – $w=0.352$ м/с; 3 и линия с – $w=0.667$ м/с;

4.2 – при осаждении сульфата кальция [9] – $w=0.352$ м/с и $\beta=60^\circ$

Накипеобразование карбоната кальция в кольцевом гладком канале между трубой с внутренним диаметром 22 мм и расположенной внутри нее трубой с наружным диаметром 16 мм было исследовано в работе Женхуа и др. [10]. Данные этой работы для двух различных скоростей были коррелированы для модели (16) параметром $A_m=1.5 \cdot 10^{10} \text{ кг}^{2/3} \text{ К}^{1/3} \text{ м}^{5/3} (\text{Вт})^{-1} \text{ с}^{-1/3} \text{ h}^{-1}$ (см. Рис. 5). Остальные параметры модели B_m и E неизменны.



5.1



5.2

Рис. 5. Термическое сопротивление загрязнений:

5.1 – накипи карбоната кальция в круглом канале [10]: 1 и линия а – $w=0.6$ м/с; 2 и линия b – $w=1.2$ м/с;

5.2 – в канале ПТА при $\beta=30^\circ$ [8]: 1 и линия а – $w=0.5$ м/с; 2 и линия b – $w=1.0$ м/с; 3 и линия с – $w=1.35$ м/с

Загрязнение путем осаждения частиц в каналах ПТА, работающих на воде содержащей взвешенные частицы карбоната кальция, исследовалось Карабеласом и др. в работе [7]. На Рис. 5.2 представлено сравнение данных этой работы с прогнозами согласно предложенной модели (сплошные линии рассчитаны для $T_s = 37^\circ\text{C}$). Все параметры в выражении (16) такие же, как и для вычислений для Рис. 6. Это позволяет сделать вывод, что значения параметров выражения (16) для тех же солей и их примесей имеют близкие численные значения. Выражение (16), помимо касательного напряжения стенки и физических свойств жидкости, учитывает и влияние температуры поверхности T_s . Для двух температур поверхностей T_{s1} и T_{s2} при одинаковых прочих условиях, предположим что:

$$V(T_{s1})/V(T_{s2}) = \varphi_d(T_{s1}) / \varphi_d(T_{s2}). \quad (17)$$

Данные по накипи карбоната кальция при трех различных температурах, когда скорость и концентрация солей не меняются, представлены в работе [11]. Эти данные представлены на Рис. 6. Линии на графике рассчитаны согласно выражению (9) с использованием соотношения (16) и зависимости (17). Значение коэффициента $V(T_{s1})$ было принято из предыдущего определения данных этой работы для $T_{s1} = 51^\circ\text{C}$. Прогноз асимптотического термического сопротивления загрязнений удовлетворительный. Можно заключить, что расчет с помощью предложенной модели зависимости термического сопротивления загрязнений от времени дает достаточно точные для практики результаты, причем с некоторым завышением термического сопротивления загрязнений.

Обсуждение результатов. Проанализировав полученные результаты можно сделать вывод, что представленная математическая модель дает возможность прогнозировать термическое сопротивление загрязнений для механизмов накипеобразования и осаждения взвешенных частиц при различных скоростях потока и температурах поверхности стенки. Данная

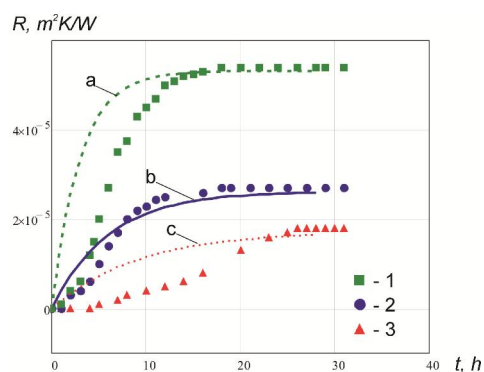


Рис. 6. Термическое сопротивление отложений при накипеобразовании карбоната кальция в круглом канале [10], $w = 1.2$ м/с: 1 и линия a – $T_s = 64^\circ\text{C}$; 2 и линия b – $T_s = 51^\circ\text{C}$; 3 и линия c – $T_s = 44^\circ\text{C}$

модель может использоваться для ПТА с интенсификацией теплоотдачи, а также для прямых гладких каналов без интенсификации. Для правильных прогнозов согласно модели, необходимы достоверные данные о ее параметрах. Эти данные, полученные для прямых труб или каналов, могут быть использованы для прогнозирования термического сопротивления отложений в ПТА работающих с такой же охлаждающей водой и наоборот.

Крупные промышленные предприятия обычно применяют большое количество теплообменных аппаратов, которые используют воду из централизованного контура охлаждающей воды предприятия. Содержание солей и твердых частиц в этой воде является одинаковым для всех теплообменных аппаратов. Поэтому, исследуя образование загрязнений по стороне воды в одном теплообменном аппарате (в ПТА или внутри труб кожухотрубного теплообменника), можно определить параметры B и A_m , используемые в предложенной математической модели. Это позволит рассчитать загрязнения по охлаждающей воде для всех ПТА этого предприятия. Также можно вычислить и пороговые значения касательного напряжения стенки и температуры поверхности. После этого при проектировании и расчете ПТА для этого предприятия касательное напряжение на стенке следует подбирать выше, чем пороговое значение, или же максимально близким к пороговому, если достичь порогового значения невозможно. Температура поверхности стенки должна быть ниже порогового значения, или же минимальной. Если же условия по предотвращению образования загрязнений невозможно выполнить, необходимо вычислить асимптотическое термическое сопротивление загрязнений по модели и использовать это значение при расчете ПТА. Для потоков внутри труб и прямых каналов расчет касательного напряжения на стенке не является проблемой. Его можно произвести по формулам, доступным в литературных источниках. Для ПТА корреляции по коэффициенту трения обычно являются собственностью производителей ПТА. Важной особенностью предсказания загрязнений, предложенного выше, является то, что касательное напряжение стенки вычисляется на основе формул для коэффициента трения на основном гофрированном поле канала ПТА, предложенных в статьях [11] и [12]. Для использования этого выражения инженеру необходимо знать только геометрические параметры основно-

го гофрированного поля пластины – угол наклона гофр к продольной оси пластины β и соотношение геометрических размеров гофрировки γ , которые можно измерить на реальных пластинах.

Выводы. Загрязнения по стороне охлаждающей воды в каналах ПТА обладают асимптотическим характером во времени. При неизменных условиях протекания процесса образования загрязнений, асимптотические значения термического сопротивления загрязнений обратно пропорциональны касательному напряжению на стенке. Эта особенность для каналов ПТА одинакова по своей природе и может быть описана теми же соотношениями, как и для прямых каналов и труб.

На начальных стадиях процесс формирования загрязнений может быть описан с помощью «пороговой модели» для гладких труб с интенсификацией теплоотдачи, предложенной Янгом и Критенденом [19]. Для достоверного прогнозирования термического сопротивления отложений по этой модели необходимо экспериментально определить один параметр модели для данной охлаждающей воды. Для конкретного контура охлаждающей воды большого промышленного предприятия этот параметр можно определить по данным о загрязнениях одного теплообменного аппарата. После этого модель может быть использована для расчетов загрязнений по охлаждающей воде во всех теплообменных аппаратах этого контура. Для определения термического сопротивления загрязнений только по данным о чистоте воды и ее химическому составу, необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования в этом направлении. При применении предложенного подхода, данные полученные для гладких труб могут непосредственно применяться для ПТА и наоборот.

Автор благодарит АО «Содружество-Т», г. Харьков за поддержку в рамках проекта ЕС INTHEAT (contract № FP7-SME-2010-1-262205).

Список литературы: 1. Sustainability in the Process Industry. Integration and Optimization / Klemes, J., Friedler, F., Bulatov, I., Varbanov, P. – The McGraw-Hill Co-s. Inc., New York, USA, 2010. – 532 p. 2. Wang L. PHEs. Design, Applications and Performance / Wang L., Sunden B., Manglik R.M. – WIT Press, Southhampton, UK, 2007. – 340 p. 3. Shah R.K. and Seculic D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. – New York: Wiley and sons, 2003. 4. Пластинчатые теплообменники в промышленности: Учебное пособие / [Товажнянский Л. Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П.]– Харьков: НТУ „ХПИ”, 2004. – 232 с. 5. Panchal C.B., Knudsen J.G. Mitigation of Water Fouling: Technology Status and Challenges // Advances in Heat

Transfer. – 1998. – № 31. – С. 431 – 474. **6.** Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 9th edn., TEMA Inc. – New York, 2007. **7.** Karabelas A.J., Yiantsios S.G., Thonon B., and Grillot J.M. Liquid side fouling of Heat Exchangers. An Integrated R&D Approach for Conventional and Novel Designs // Applied Thermal Engineering. – 1997. – № 7 (8-10). – С. 727 – 737. **8.** Bansal B, Muller-Steinhagen H, Xiao Dong Chen. Performance of plate heat exchangers during calcium sulphate fouling — investigation with an in-line filter // Chemical Engineering and Processing. – 2000. – № 39. – С. 507–519. **9.** Bansal B, Xiao Dong Chen, Muller-Steinhagen H. Analysis of ‘classical’ deposition rate law for crystallisation fouling // Chemical Engineering and Processing. – 2008. – № 47. – С. 1201–1210. **10.** Zhenhua Quan, Yongchang Chen and Chongfang Ma. Experimental Study of Fouling on Heat Transfer Surface During Forced Convective Heat Transfer // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2008. – № 16(4). – С. 535–540. **11.** Арсеньева О.П. Обобщенное уравнение для расчета гидравлического сопротивления каналов пластинчатых теплообменников // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2010. – №4.– С. 112–117. **12.** Арсеньева О.П. Взаимосвязь переноса тепла и импульса в каналах пластинчатых тепло-обменных аппаратов // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2010. – №1.– с. 3–9. **13.** Чернышев Д.В. Прогнозирование накипеобразования в пластинчатых водонагревателях для повышения надежности их работы: Дис.... канд. техн. наук. – Тула, 2002. – 182 с. **14.** Halalizadeh A, Muller-Steinhagen H, Jamialahmadi M. Mixed salt crystallization fouling // Chemical Engineering and Processing. – 2000. – № 39. – С. 29–43. **15.** Ebert W.A., and Panchal C.B., Analysis of Exxon crude-oil slip stream coking data, in Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment / [Panchal C.B., Bott T.R., Somerscales E.F.C. and Toyama S. (eds)]. – Begell House, New York, USA, 1997. – p. 451–460. **16.** Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L. and Pugh S.J., Use of crude oil threshold data in heat exchanger design. – Appl Therm Eng. – 2002a. – Vol. 22. – p. 763–776. **17.** Yeap B.L., Wilson D.I., Polley G.T. and Pugh S.J. Mitigation of crude oil refinery heat exchanger fouling through retrofits based on thermo-hydraulic fouling models. – Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design. – 2004. – Vol. 82(A1). – p. 53–71. **18.** Young A., Venditti S., Berruoco C., Yang M., Waters A., Davies H., Hill S., Millan M. & Crittenden B. Characterization of Crude Oils and Their Fouling Deposits Using a Batch Stirred Cell System. – Heat Transfer Engineering. – 2011. – Vol. 32 (3-4). – p. 216–227. **19.** Yang M., Crittenden B. Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts. – Applied Energy. – 2011. – doi:10.1016/j.apenergy.2011.01.038