

ТЕПЛООБМЕН В ВИТЫХ ТРУБАХ ОВАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ В УСЛОВИЯХ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ

Б.В. Дзюбенко, А.С. Мякочин

Московский авиационный институт, Россия

Экспериментально исследован процесс теплообмена при течении внутри витых труб воды с большим содержанием солей временной жесткости методом теплообменника типа «труба в трубе». Обнаружено, что при закрутке потока витыми трубами и его турбулизации значительно уменьшается термическое сопротивление слоя загрязнений на поверхностях этих труб, толщина которого асимптотически стремится с течением времени к постоянному значению, что позволяет обеспечить работоспособность теплообменных аппаратов с витыми трубами в течение длительного периода их эксплуатации без очистки поверхности от загрязнений, что невозможно для аппаратов с гладкими круглыми трубами. Получены обобщающие зависимости для расчета термического сопротивления слоя загрязнений в широком диапазоне изменения режимных и геометрических параметров для витых труб и труб с кольцевой накаткой, рассмотрено влияние этих параметров на коэффициенты теплопередачи и гидравлическое сопротивление труб.

Ключевые слова

Витые трубы, солеотложения, теплообмен, расчет.

Условные обозначения

C – карбонатная жесткость воды, мг.экв/литр; C_w – концентрация солей на поверхности раздела фаз, мг.экв/литр; d – максимальный размер овального профиля витой трубы и диаметр кольцевой диафрагмы, м; d_{eq} – эквивалентный диаметр, м; D – внутренний диаметр трубы, м; D_n – наружный диаметр трубы, м; K_D – коэффициент массообмена на поверхности раздела фаз, м³/с; K_l – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(мК); K_p – коэффициент массопереноса соли в воде, м³/с; K_R – постоянная химической реакции поглощения соли поверхностью, м³/с; l – длина теплообменника, м; m – величина отложений на единице поверхности, кг/м²; p – давление, Па; Q – тепловой поток, Вт; R_{foul} – термическое сопротивление слоя отложения, м²К/Вт; $R_{l,foul}$ – линейное термическое сопротивление слоя отложения мК/Вт; Re – число Рейнольдса, $\rho w d_{eq}/\mu$; s – шаг закрутки витых труб, м; t – шаг турбулизаторов, м; t_c – температура холодной воды, °С; t_w – температура стенки, °С; w – среднерасходная скорость, м/с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); δ_{foul} – толщина отложений, м; Δp – перепад давлений, Па; ΔT – перепад температур, °С; Θ_{dep} – скорость отложения осадков, кг/с; Θ_{car} – скорость выноса осадков, кг/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/мК; μ – коэффициент динамической вязкости, Пас; ξ – коэффициент трения, $\tau_w/(\rho w^2)$; ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с или ч; τ_w – касательное напряжение трения на стенке, Па; Индексы: *foul* – загрязнение; *r* – радиальная; *sm* – гладкий; *w* – стенка; *t* – тангенциальная; ∞ – бесконечность; *v* – внутренний, *n* – наружный.

Введение

Теплообменники с витыми трубами и с дискретными турбулизаторами потока находят в настоящее время широкое применение в различных областях техники. Так, использование таких теплообменных аппаратов в составе атомной электростанции с реакторами ВВЭР-1000 позволяет сэкономить около 37 тонн дорогостоящего металла за счет интенсификации теплообмена витыми трубами [1]. При использовании в трубах охлаждающей воды, которая содержит соли временной жесткости и температура которой растет в направлении потока, на поверхностях теплообмена образуются отложения солей, и возникает необходимость либо предотвратить, либо уменьшить интенсивность роста загрязнений на теплообменных поверхностях [2-7]. При этом большой интерес проявляется к проблеме уменьшения солеотложений на поверхностях теплообмена путем искусственной турбулизации потока [2]. Уменьшение солеотложений в каналах с закруткой потока витыми трубами (рис. 1) обусловлено интенсивным обменом порциями жидкости между пристенным слоем и ядром потока в этих каналах, что согласуется с современными концепциями механизма солеотложений на гладких поверхностях.

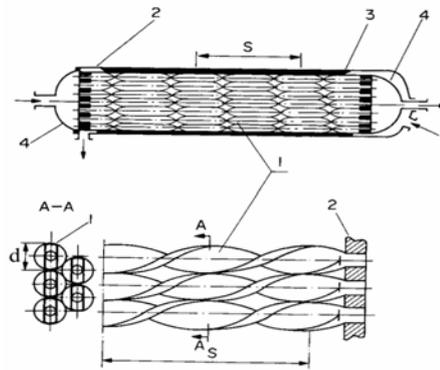


Рис. 1. Схема теплообменного аппарата с витыми трубами: 1) витые трубы; 2) трубные доски; 3) кожух; 4) патрубки

Современные концепции механизма солеотложений на гладких поверхностях [3-7] могут быть использованы при построении качественной модели, описывающей процесс солеотложения на поверхностях с искусственной турбулизацией потока и позволяющей получить структурную форму для эмпирических зависимостей, которые учитывают наиболее полно влияние различных факторов на процесс теплообмена и солеотложения и хорошо обобщают опытные данные. Толщина слоя загрязнений на теплообменной поверхности зависит от геометрических параметров канала, времени, температуры потока теплоносителя и стенки, скорости течения, давления и концентрации присадок в охлаждающей воде (ее жесткости). Так рост скорости потока препятствует образованию слоя загрязнений на стенке трубы.

Целью работы является исследование теплообмена, влияния закрутки потока на рост термического сопротивления слоя отложений на поверхностях витых труб и закономерностей протекания этого процесса, в том числе и экспоненциальной зависимости, согласно которой после достижения некоторой величины термическое сопротивление во времени не изменяется:

$$R_{\text{foul}} = R_{\text{foul}\infty} [1 - \exp(-\beta\tau)], \quad (1)$$

и которую необходимо обосновать экспериментально.

1. Постановка задачи

При отложениях происходят два одновременных процесса: солеотложение и вынос из пристенного слоя осадков, образовавшихся на границе раздела фаз и не осевших на стенке:

$$\frac{dm}{d\tau} = \rho_{foul} \lambda_{foul} \frac{dR_{foul}}{d\tau} = \Theta_{dep} - \Theta_{car}. \quad (2)$$

Скорость отложений Θ_{dep} пропорциональна концентрации солей C в потоке жидкости [5, 7]:

$$\Theta_{dep} = \rho_{foul} \lambda_{foul} K_I \left(\frac{\tilde{N}}{1/K_p + 1/K_R} \right) - K_D C_W, \quad (3)$$

где K_I , K_p , K_R , K_D - коэффициенты, зависящие от скорости течения, температуры и геометрических параметров канала. Процесс выпадения осадков определяется процессом массообмена из-за разности концентрации солей в ядре потока и на стенке и процессом протекания химических реакций на границе раздела фаз.

Скорость выноса солеотложений с поверхности раздела фаз определяется поверхностной силой, с которой поток воздействует на слой отложений и которая возрастает с увеличением толщины слоя отложений, т.е. с ростом R_{foul} . В трубах с кольцевыми диафрагмами и витых трубах (рис. 1 и 2) при одной и той же скорости течения касательные напряжения больше чем в гладких круглых трубах и скорость выноса солеотложений также более существенна:

$$\Theta_{car} = K_2 \tau_w R_{foul} = K_3 \xi w^2 R_{foul}, \quad (4)$$

где $\xi = 8\tau_w / \rho w^2$ - коэффициент гидравлического сопротивления K_2 и K_3 - коэффициенты.

Подставляя в (2) значения θ_{dep} и θ_{car} из выражений (3) и (4), можно получить путем интегрирования уравнения (2) с граничными условиями: при $\tau = 0$. $R_{foul} = 0$ и при $\tau \rightarrow \infty$ $R_{foul} = R_{foul\infty}$, уравнение (1). Тогда зависимость для расчета термического сопротивления слоя отложений можно представить в виде (5, 7):

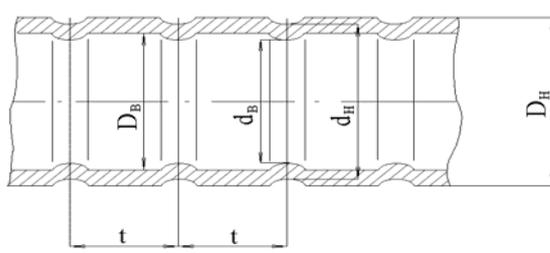


Рис. 2. Труба с дискретными турбулизаторами потока

$$R_{foul} = \frac{K_1 C}{K_3 (1/K_p + 1/K_R)} \frac{l}{\xi w^2} [1 - \exp(-K_3 \xi w^2 \tau)] \quad (5)$$

Уравнение (5) отражает влияние скорости течения, концентрации присадки в охлаждающую воду и параметров закрутки и турбулизации потока на термическое сопротивление отложений. В уравнении (5) коэффициент K_3 зависит от скорости и геометрических параметров турбулизаторов на поверхности трубы и закрутки потока. Тогда обобщение опытных данных по теплопередаче и термическому сопротивлению слоя отложений для витых труб следует искать в виде функциональных связей от следующих параметров:

$$K_1 = \varphi(\text{Re}, C, \tau / \tau_\infty, s / d);$$

$$R_{foul} = f(\text{Re}, C, \tau / \tau_\infty, s / d), \quad (6)$$

а для труб с кольцевыми диафрагмами в виде зависимости [5]:

$$K_1 = \varphi(\text{Re}, C, \tau / \tau_\infty, d/D, t/D)$$

$$R_{foul} = f(\text{Re}, C, \tau / \tau_\infty, d/D, t/D). \quad (7)$$

2. Эксперимент

Схема экспериментальной установки для изучения процесса солеотложений внутри витой трубы с относительными шагами $s/d=6,2$ и $12,2$ была аналогична схеме установки для изучения солеотложений снаружи труб с кольцевой накаткой (рис.3) [2]. Отличие состояло только в том, что греющий теплоноситель – хлопковое масло подавалось в кольцевой канал теплообменника типа «труба в трубе», а нагреваемая соленая вода протекала внутри витой трубы овального профиля и труб с кольцевыми диафрагмами. Теплообменник работал по противоточной схеме. Хлопковое масло предварительно нагревалось до температуры, равной $110-115^{\circ}\text{C}$. Холодная вода с заданным солесодержанием обладала карбонатной жесткостью до 20мг.экв/литр . В природных водах обычно содержится бикарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, который образуется при взаимодействии растворенного в воде углекислого газа CO_2 с нормальным карбонатом CaCO_3 : $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

При проведении экспериментов заданная жесткость воды (концентрация бикарбоната кальция - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) поддерживалась путем добавления в циркулирующую холодную воду порций воды с более высокой жесткостью из специального резервуара, так как при нагревании воды бикарбонат разрушается, а карбонат CaCO_3 оседает на стенке в виде накипи. В опытах измерялись температуры на входе и выходе из теплообменника для греющего и холодного теплоносителей, а также их расходы. При заданных параметрах жидкостей на входе в теплообменник опыты продолжались до момента времени, когда прекращалось временное изменение термического сопротивления солеотложений. Этот момент времени зависел от скорости течения w , температуры, концентрации примесей и геометрических параметров, определяющих эффект интенсификации тепломассообмена в исследуемых каналах. Исследуемые трубы имели внешний диаметр $D_{out}=10,4\text{мм}$ (исходный диаметр витой трубы) и внутренний диаметр $D=10\text{мм}$. Трубы были изготовлены из нержавеющей стали.

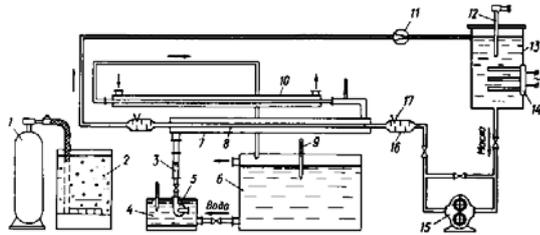


Рис.3. Схема установки для изучения процесса солеотложения в каналах с интенсификацией теплообмена [2]: 1- баллон с CO_2 ; 2 – бак с соленой водой; 3 – ротаметр; 4 – расходный бак; 5, 15 – насосы; 6 – резервуар с водой, содержащей соли заданной концентрации; 7, 8 – теплообменник типа «труба в трубе»; 9, 12 – термометры; 10 – холодильник; 11 – расходомер; 13 – бак для хлопкового масла; 14 – электронагреватель; 16 – смесительная камера; 17 – термопара.

Внутренний диаметр внешней трубы теплообменника типа «труба в трубе» составлял 26мм, а ширина кольцевого канала – 5мм. При этом эквивалентный диаметр кольцевого канала был равен $d_{eq}=10$ мм. Длина теплообменника составляла $l=2,5$ м.

Методика эксперимента позволяла определять изменения термического сопротивления в зависимости от роста слоя солеотложений. По результатам определения линейных коэффициентов теплопередачи в начальный и конечный моменты времени:

$$K_{l_0} = Q_0 / (\pi l \Delta T_0), \quad (8)$$

$$K_{l_\tau} = Q / (\pi l \Delta T) \quad (9)$$

определялся линейный термический коэффициент слоя солеотложений:

$$R_{lfoul} = \frac{l}{K_{l_\tau}} - \frac{l}{K_{l_0}} = \frac{\delta_{foul}}{\lambda_{foul} D}, \quad (10)$$

в предположении, что процесс солеотложений не влияет на коэффициенты теплоотдачи снаружи и внутри исследуемой трубы. Термическое сопротивление внутри трубы составляет:

$$R_{foul} = R_{lfoul} \cdot D, \quad (11)$$

где R_{lfoul} определяется по уравнению (10). Необходимо заметить, что эта методика определения R_{foul} исключает необходимость измерять температуру стенки трубы, значительно упрощая эксперимент. Знание коэффициентов теплоотдачи на горячей стороне позволяет выполнить надежные расчеты этой температуры. Помимо двух витых труб овального профиля с относительным шагом закрутки $s/d=6,2$ и $12,2$, были исследованы гладкие круглые трубы и трубы с кольцевыми диафрагмами со следующими параметрами турбулизации потока d/D и t/D , равными 0,91 и 0,5; 0,91 и 0,25; 0,885 и 0,5. Исследования проводились в следующем

диапазоне параметров: температура холодной воды на входе в теплообменник $t'_c = 20 \div 30^0 C$; скорость воды $w=0.05 \div 1.82 \text{ м/с}$; число Рейнольдса $Re = (3 \div 25) \cdot 10^3$; температура стенки $t_w = 70 \div 100^0 C$; карбонатная жесткость воды $C=5, 10$ и 20 мг.экв/литр ; время непрерывного проведения исследования до 360 час.

3. Результаты исследования

Результаты экспериментального исследования теплообмена и процесса солеотложения в витых трубах, гладких круглых трубах и трубах с кольцевыми диафрагмами представлены на рис. 4 - 7. Из рис.(4) видно, что для гладких круглых труб коэффициент теплопередачи уменьшается в течение 280 часов приблизительно в 2,5 раза при концентрации соли (карбонатной жесткости воды) $C=10 \text{ мг.экв/литр}$ и в 3-4 раза при $C=20 \text{ мг.экв/литр}$. В этом случае термическое сопротивление слоя солеотложений не достигает асимптотического значения. Для витых труб и труб с кольцевыми диафрагмами при $C=10 \text{ мг.экв/литр}$ и $Re=4 \cdot 10^3$ за 200-240 часов работы коэффициент теплопередачи уменьшается только на 25%, а термическое сопротивление выходит на свое асимптотическое значение. При концентрации $C=20 \text{ мг.экв/литр}$ коэффициент теплопередачи для труб с интенсификацией уменьшается на 40-50%, что значительно меньше, чем для гладких круглых труб. Таким образом, коэффициент теплопередачи в витых трубах и трубах с кольцевыми диафрагмами при солеотложении превышает значения этого коэффициента в гладких трубах в начальный момент времени, когда отложения отсутствуют.

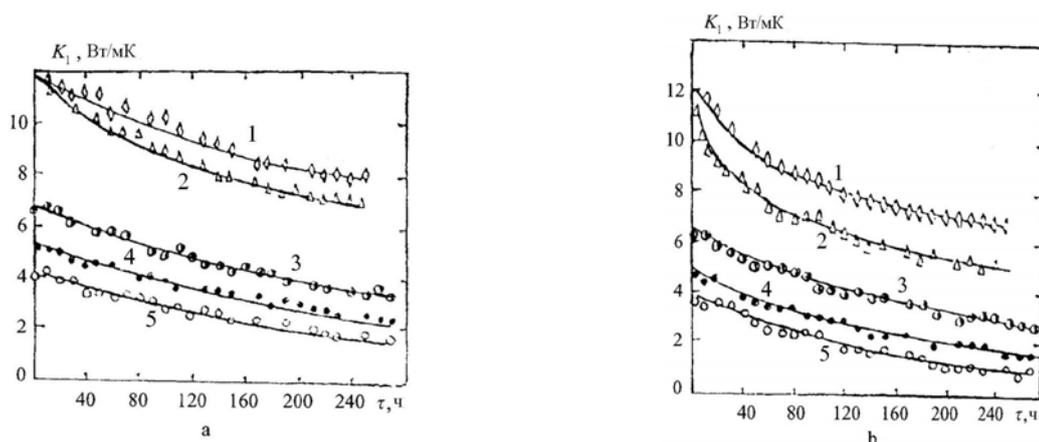


Рис.4. Измерение коэффициента теплопередачи во времени: а) $C=10 \text{ мг.экв/литр}$, в) $C=20 \text{ мг.экв/литр}$; 1 – труба с кольцевыми диафрагмами при $Re=4 \cdot 10^3$, $d/D=0,91$ и $t/D=0,5$; 2 – витая труба с $s/d=6,2$ при $Re=4 \cdot 10^3$; 3-5 – гладкая круглая труба при $Re=16 \cdot 10^3$; $14 \cdot 10^3$ и $3,2 \cdot 10^3$ соответственно.

Эффективность труб с интенсификаторами и закруткой потока при солеотложении увеличивается по сравнению с эффективностью гладких круглых труб. Это видно из рассмотрения рис.5. Если в начальный момент процесса солеотложения ($\tau = 0$) отношение коэффициента теплопередачи труб с кольцевыми диафрагмами и витых труб к коэффициенту теплопередачи гладких труб составляет $K_1/K_{lsm} = 2.5 \div 3$ то при $\tau/\tau_\infty = 1$ отношение $K_1/K_{lsm} = 3.5 \div 5$.

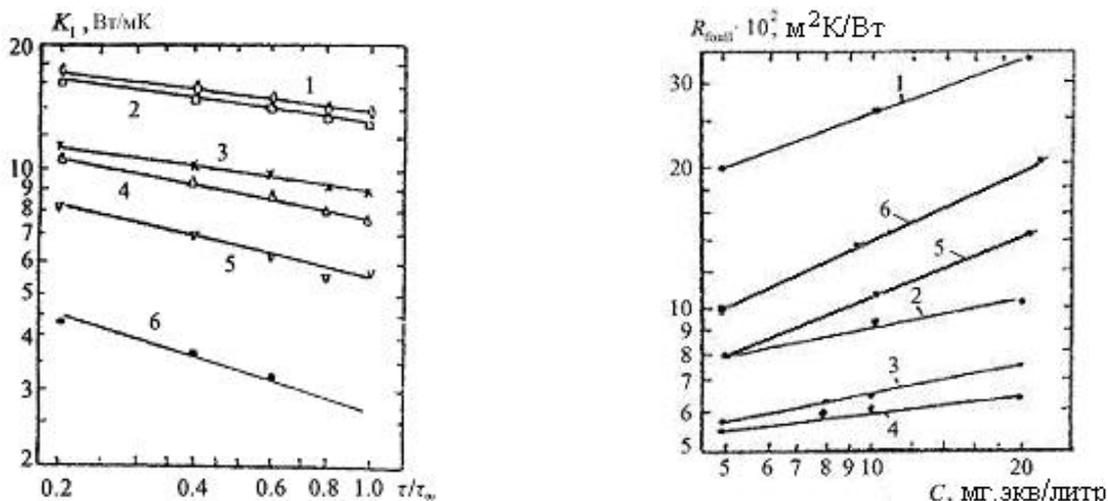


Рис.5. Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от безразмерного времени τ/τ_∞ при $C=10$ мг.экв/литр и $Re=10^4$ ($\tau_\infty=250$ час): 1-3 – трубы с кольцевыми диафрагмами при $d/D=0.91$ и $t/D=0,5$; $d/D=0.91$ и $t/D=0,25$; $d/D=0.935$ и $t/D=0,5$ соответственно; 4, 5 – витые трубы при $s/d=6,2$ и $s/d=12,2$ соответственно; 6 – гладкая круглая труба.

Рис. 6. Термическое сопротивление слоя отложений от концентрации солей в холодной воде при $Re=14 \cdot 10^3$: 1 – гладкая труба; 2-4 – трубы с кольцевой накаткой при $d/D=0.935$ и $t/D=0.5$; при $d/D=0.91$ и $t/D=0.25$; $d/D=0.91$ и $t/D=0.5$; 5, 6 – витые трубы при $s/d=6.2$ и $s/d=12.2$ соответственно.

4. Обсуждение результатов

Из рис.6 видно, что с ростом концентрации соли термическое сопротивление слоя солеотложения растет для труб с кольцевыми диафрагмами и витых труб и что с увеличением высоты диафрагм величина R_{foul} уменьшается, так же как и с уменьшением относительного шага закрутки витых труб. Для витых труб с $s/d=6.2$ R_{foul} в 2,5 раза меньше, чем для круглых труб, а для труб с кольцевой накаткой при $d/D=0.91$ и $t/D=0.5$ термическое сопротивление слоя солеотложений в 4-5,3 раз меньше, чем в гладкой трубе. Влияние числа Рейнольдса и шага закрутки витых труб на процесс солеотложения показан на рис. 7. Видно, что с ростом числа Рейнольдса термическое сопротивление слоя солеотложений уменьшается.

Такой характер зависимостей коэффициента теплопередачи и процесса осадкообразования (рис. 4-7) от определяющих параметров связан со структурой потока в витых трубах овального профиля (рис. 8 и 9). Из рис. 8 и 9 видно, что вихревой характер течения в витых трубах существенно расширяет область течения в ядре потока (рис.9) и усиливает обменные процессы между пристенным слоем и ядром потока, что способствует выносу образующихся в области реакции нормального карбоната кальция из пристенного слоя в поток, а не осаждению на стенке витой трубы. Результаты исследования процесса солеотложения в витых трубах и трубах с кольцевыми диафрагмами хорошо обобщаются зависимостями вида (6) и (7) для расчета термического сопротивления слоя солеотложений. Так для витых труб установлена эмпирическая зависимость, учитывающая влияние числа Рейнольдса потока, концентрации солей в воде, шага закрутки витых труб и времени процесса:

$$R_{foul} = 0.204 Re^{-0.227} C^{0.36} \left(\frac{\tau}{\tau_\infty} \right)^{0.236} \cdot \left(\frac{s}{d} \right)^{0.447}, \quad (12)$$

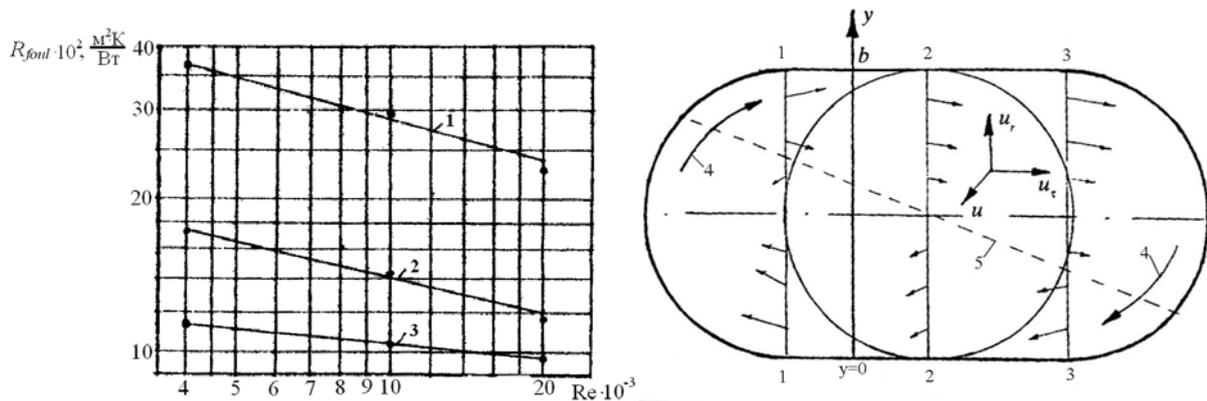


Рис.7. Влияние числа Рейнольдса и шага закрутки витых труб на термическое сопротивление слоя отложений при $C=10$ мг.экв/литр: 1 – гладкая труба; 2, 3 – витые трубы с $s/d=12.2$ и 6.2 , соответственно.

Рис. 8. Поле суммарной скорости $\sqrt{u_t^2 + u_r^2}$ при $s/d=9,7$ внутри витой трубы: (1-1), (2-2), (3-3) – сечения трубы, где проводились измерения; 4 – направление закрутки потока; 5 – ось симметрии вихря в поперечном сечении трубы

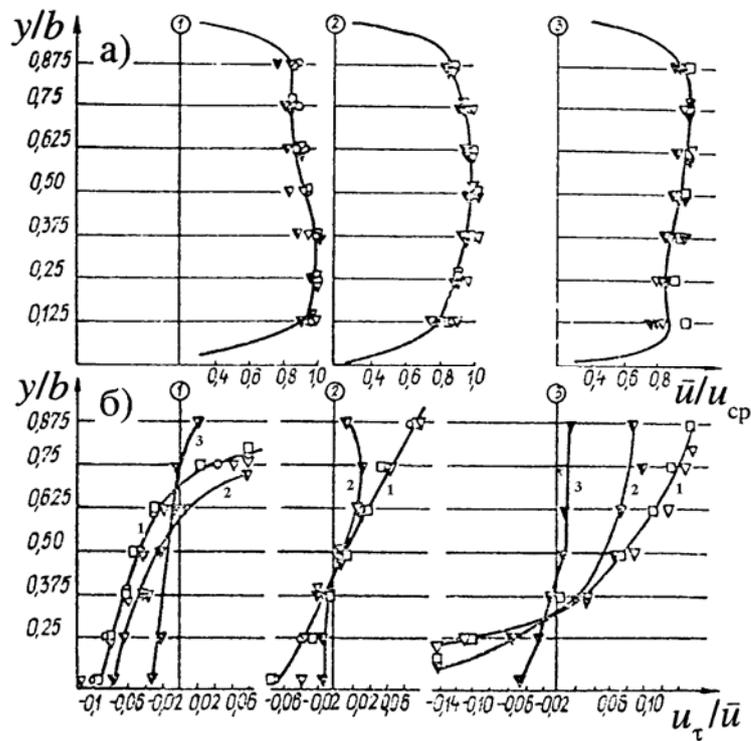


Рис. 9. Профили продольной составляющей скорости внутри витой трубы (а) и тангенциальной скорости (б) для сечений 1, 2, 3: ∇ , \square , \circ - для шага закрутки 10,8 и $Re=7800$, 49000 и 83000 – (1б); ψ - для $s/d=12,8$ и $Re=78000$ - (2б); \blacktriangledown - для $s/d=25.6$ и $Re=78000$ – (3б)

Зависимость (12) справедлива для диапазона изменения параметров: $s/d=6.2-12.2$, $Re=(3.2-25) \cdot 10^3$, $C=5-20$ мг.экв/литр при $\tau_{\infty} = 250$ час.

Для труб с кольцевыми диафрагмами экспериментальные данные хорошо описываются эмпирической зависимостью:

$$R_{foul} = 11.81 Re^{-0.29} C^{0.214} \left(\frac{\tau}{\tau_{\infty}} \right)^{0.129} \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{0.701} (0.062 + 1.2 \cdot 10^{-3} \frac{t}{D}), \quad (13)$$

которая справедлива для $\tau_{\infty} = 250$ час и следующего диапазона изменения параметров: $d/D=0.91-0.94$, $t/D=0.25-0.5$, $Re=(4-25) \cdot 10^3$, $C=5-20$ мг.экв/литр.

В результате экспериментального исследования процесса солеотложения было показано, что искусственная турбулизация потока внутри витых труб и труб с кольцевыми диафрагмами позволяет существенно уменьшить солеотложения на их внутренних поверхностях (рис.6 и 7). Влияние солеотложений на линейный коэффициент теплопередачи предлагается учитывать путем введения величины линейного термического сопротивления солеотложений в формулу для цилиндрической стенки:

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{\alpha_1 D} + \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{D_i}{D} + R_{foul} + \frac{1}{\alpha_2 D_i} \quad (14)$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты теплоотдачи внутри и снаружи трубы; R_{foul} - линейное термическое сопротивление слоя солеотложений на внутренней поверхности трубы.

При постоянном расходе холодной воды в исследованных каналах рост солеотложений во времени приводит к увеличению гидравлического сопротивления (рис.10). Из рис.10 видно, что за 240 часов относительный прирост во времени гидравлического сопротивления из-за солеотложений при различных числах Рейнольдса составляет примерно 100% для гладких круглых труб и 30-50% для витых труб и труб с кольцевыми диафрагмами.

В то же время абсолютный прирост перепада давления Δp за 240 часов в трубах с кольцевыми диафрагмами в два раза превышает абсолютный прирост перепада давления в витых трубах и гладких круглых трубах при одинаковых значениях числа Рейнольдса. Это объясняется тем, что в трубах с кольцевыми диафрагмами потери давления можно разделить на потери на трение и местные гидравлические потери на диафрагмах.

При этом из-за отрывных течений на диафрагмах толщина солеотложений различна по длине канала на гладких участках трубы в направлении течения, и это различие увеличивается с течением времени, приводя к росту перепада давлений на местных сопротивлениях в суммарном значении перепада давлений.

В витых трубах имеет место только линейное гидравлическое сопротивление и толщина солеотложений распределена по поверхности трубы достаточно равномерно, что и приводит к меньшему абсолютному приросту перепада давлений в витых трубах, а интенсивный вынос отложений с границы раздела фаз в поток существенно уменьшает и относительный прирост перепада давлений по сравнению с гладкими круглыми каналами.

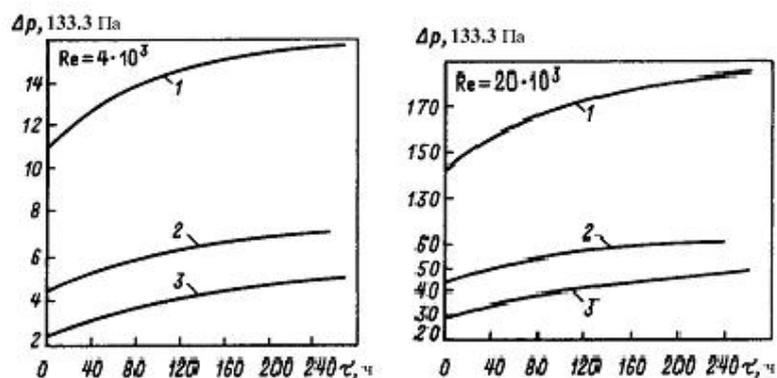


Рис.10. Изменение во времени гидравлического сопротивления труб при различных числах Рейнольдса и солеотложениях с жесткостью холодной воды $C=20$ мг.экв/литр: 1 – труба с кольцевыми диафрагмами с $d/D=0.91$ и $t/D=0,5$; 2 – витая труба с $s/d=6,2$; 3 – гладкая круглая труба.

Выводы

Обнаружено, что закрутка потока внутри витых овальных труб позволяет значительно интенсифицировать теплообмен и уменьшить солеотложения на внутренних поверхностях. С течением времени термическое сопротивление слоя солеотложений внутри этих труб асимптотически приближается к своему постоянному значению, что не наблюдается на внутренних поверхностях гладких круглых труб. Замена гладких круглых труб витыми трубами позволяет продлить работу трубчатых теплообменных аппаратов без специальной очистки их поверхностей от солеотложений.

Данная работа осуществлена при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 07-08-00249) и при поддержке Президентом РФ ведущих научных школ России (Грант НШ -2574. 2006.8).

Список литературы

- [1] Dzyubenko B.V., Myakochin A.S., Urbonas P. (2007) Enhancement of Heat Transfer in Twisted Tube Heat Exchangers. Proc. Of 5th BHTC, September 19-21, 2007. Saint Petersburg, Russia. CD-Proceedings. 9p.
- [2] Dreitser, G.A., Dubrovskiy, Ye.V., Dzyubenko, B.V. et al. (1990) Heat transfer: Soviet reviews, Vol.2. Enhancement of heat transfer, Hemisphere Publishing, New York.
- [3] Chan, S.H. (1992) Heat and mass transfer in fouling, in Annular Review of Heat Transfer. Hemisphere Publishing, New York, 1992, Vol.4, pp.363-402.
- [4] Müller-Steinhagen, H. (1993) Fouling: The ultimate challenge for heat exchanger design, Transport Phenomena in Thermal Engineering. Begell House, Inc. Publishers, New York, 1993. Vol.2. pp.811-823.
- [5] Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С. (1998) Эффективные поверхности теплообмена. Энергоатомиздат, Москва.
- [6] Kim, M.-H. and Webb, R.L. (1990) Particulate fouling inside tubes having a re-shaped two-dimensioned roughness by a flowing suspension of aluminium oxide in water. Proc. 9th Int. Heat Transfer Conference 1990, Hemisphere, New York, 1990, Vol.5, pp.139-144.
- [7] Pinhero, J.(1981) Fouling of heat transfer surfaces, In Heat Exchangers-Thermal Hydraulic Fundamentals and Design, eds. S. Kakas, A.E. Bergles, and F. Meinger, McGraw-Hill, New York, 1981, pp.1013-1035.