

УДК 621.57-59; 536.1

Морозюк Т.В.<sup>1</sup>,  
Морозюк Л.И.<sup>2</sup>, Соколовская В.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>Морская Академии Щецина, Польша<sup>2</sup>Одесская государственная академия холодаОСАЖДЕНИЕ В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ:  
НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ

У статті розглянуто теоретичні основи, математичну модель та чисельні результати щодо аналізу дослідження шару осаду на зовнішній поверхні теплообмінних апаратів.

В статье представлены теоретические основы, математическая модель и численные результаты исследования слоя осаждения на внутренней поверхности теплообменных аппаратов.

We present the theoretical foundations, mathematical model, and numerical results for the analysis of a fouling layer on the internal surface of heat exchangers.

$B_r^*$  – модифицированное число Бринкмана;  
 $Da$  – число Дарси;  
 $K$  – проницаемость пористого слоя;  
 $f$  – коэффициент трения в пористой структуре;  
 $K_r$  – отношение коэффициентов теплоотдачи пористого слоя к жидкости;  
 $q$  – тепловой поток;  
 $\vec{q}$  – вектор теплового потока;  
 $p$  – давление;  
 $r$  – внутренний радиус трубопровода;  
 $s$  – удельная энтропия;

$s_{gen}$  – производство энтропии;  
 $T$  – температура;  
 $u$  – внутренняя энергия;  
 $v$  – удельный объем, (ур. (4));  
 $v$  – скорость;  
 $\vec{v}$  – вектор скорости;  
 $w$  – удельная работа;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\mu$  – вязкость;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\tau$  – время.

Осаждение водяного камня на теплообменной поверхности аппаратов с водяным охлаждением, рост слоев пыли, краски, масла и ржавчины на теплообменной поверхности аппаратов с воздушным охлаждением, изменение теплофизических свойств тепло- и пароизоляции трубопроводов, выпадение инея на теплообменной поверхности низкотемпературных аппаратов – воздухоохладителей, осаждение твердых частиц основного технологического процесса на теплообменной поверхности приборов охлаждения (например, сахара, масла, красителей при производстве мороженого) – это далеко не полный список проблем, возникающих в процессе эксплуатации энергетических и холодильных систем. Очевидно, что изменение эксплуатационных характеристик оборудования во времени должно быть учтено при выполнении проекта. Это позволит более корректно определить сроки

ремонтных работ (включая очистку теплообменной поверхности, удаление инея, замену изоляции и т.д.), учитывая конкретные условия эксплуатации оборудования по сравнению со среднестатистическими данными приведенными, например в [1]. В конечном итоге полученная информация способствует более точному определению стоимости работ по обслуживанию и ремонту оборудования, а следовательно, стоимости полезного эффекта системы в течение анализируемого срока эксплуатации оборудования.

Описание динамики изменения характеристик теплообменных аппаратов вследствие образования и роста различных видов осадений стало возможным, благодаря обобщению большого числа экспериментальных данных. При выборе метода экспериментальных исследований следует учитывать соотношение между затратами на проведение исследований и ценностью получае-

мой информации. Для подобных исследований возможно использовать метод аналогий в сочетании с интегральными характеристиками исследуемого элемента системы, полученными при натуральных испытаниях. Такой подход можно признать корректным только при условии, что удается подобрать процесс, который изучен достаточно подробно во времени и наиболее близко соответствует изучаемому процессу.

Для изучения динамики формирования слоя водяного камня на теплообменной поверхности теплообменных аппаратов авторы выдвинули две гипотезы:

◆ *гипотеза 1:* слой камня является пористой структурой, подчиняющейся закону Дарси. В этом случае в качестве аналогии можно принять динамику формирования слоя инея на поверхности воздухоохладителей. Правомочность такой аналогии доказана в [2]. При использовании интегральных данных по натурным испытаниям [3] были выделены основные стадии формирования слоя накипи [4]: заполнение шероховатостей в материале трубы, формирование “камней”, срыв “пиков” водяного камня и опадание их в виде мелких частиц на внутреннюю поверхность трубы, с уплотнением слоя осаждения, повторный процесс формирования камней с последующим уплотнением вплоть до образования однородного слоя, когда осаждение перестает быть пористой структурой.

◆ *гипотеза 2:* слой камня представляет сплошной слой и не является пористой структурой. Для этой гипотезы используется предположение постепенного уменьшения во времени проходного сечения трубопровода за счет роста слоя водяного камня, теплофизические свойства которого остаются неизменными во времени. Теплотехнические расчеты теплообменных аппаратов подразумевают именно такой подход учета влияния слоя осадений, например [3,5].

Для подтверждения или опровержения выдвинутых авторами гипотез был использован численный метод математического моделирования (подробно описанный в [6]), в основе которого лежат следующие уравнения:

◆ закон сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -\rho \nabla \vec{v} ; \quad (1)$$

◆ первый закон термодинамики

$$\rho \frac{\partial u}{\partial \tau} = -\nabla \vec{q} - p \nabla \vec{v} - w ; \quad (2)$$

◆ второй закон термодинамики

$$s_{gen} = \rho \frac{ds}{d\tau} + \nabla \left( \frac{\vec{q}}{T} \right) \geq 0 . \quad (3)$$

Используя выражение для определения изменения внутренней энергии

$$du = Tds - pdv = Tds - pd \frac{1}{\rho} , \quad (4)$$

или

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = T \frac{\partial s}{\partial \tau} + \frac{p}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} , \quad (5)$$

выразим величину  $s_{gen}$  в виде

$$s_{gen} = -\frac{1}{T^2} \vec{q} \nabla T - \frac{w}{T} \geq 0 . \quad (6)$$

Величина теплового потока в соответствии с законом Фурье

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T . \quad (7)$$

При разделении величины производства энтропии на термическую и механическую части [2,7] первый член в ур. (6) представляет термическую составляющую роста энтропии  $s_{gen}^T$ , вызванную наличием разности температур для обеспечения процесса теплопередачи в теплообменном аппарате, второй член в ур. (6) описывает рост энтропии, вызванный наличием трения, т.е. представляет механическую составляющую роста энтропии  $s_{gen}^M$ .

Система уравнений (1–7) с различными модификациями была использована многими авторами (подробный анализ литературных источников представлен в [6]) для исследования особенностей процесса теплопередачи в пористых структурах. Применение теории роста энтропии в пористой структуре к анализу осадений на теплообменной поверхности впервые предложено и рассмотрено в [2].

Величина  $s_{gen}^M = \frac{w}{T}$  (где  $w$  – удельная работа, произведенная системой) для потока несжимае-

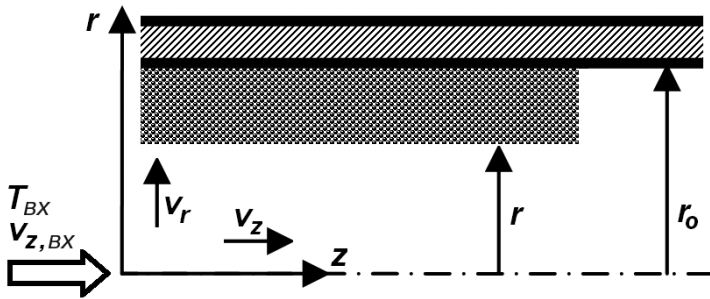


Рис. 1. Фрагмент цилиндрической теплообменной поверхности с внутренним осаждением.

мой жидкости должна быть выражена через величины динамической вязкости рабочего вещества  $\mu$ , функцию диссипации вязкости потока  $\Phi$  и фактора  $f$ , описывающего наличие ( $f \neq 0$ ) или отсутствие ( $f = 0$ ) пористой структуры.

Для цилиндрической поверхности, частично заполненной внутри пористой структурой, ур. (6) имеет вид [6]:

$$s_{gen} = s_{gen}^T + s_{gen}^M = \frac{\lambda}{T^2} [\nabla T^2] + (1-f) \frac{\mu \Phi}{T} + f \frac{\mu}{KT} [\bar{v}]^2. \quad (8)$$

На рис. 1 представлен фрагмент теплообменной поверхности цилиндрической трубы с внутренним осаждением, представленным в виде пористой структуры. Пористая структура имитируется моделью твердых шаров, в которой диаметр шаров в соединении с расстоянием между ними описывается числом Дарси. При математическом моделировании принято: некоторая часть рабочего вещества, проходящего внутри трубы, движется ламинарно (с постоянными теплофизическими свойствами) в пористом слое; толщина пористого слоя растет во времени ( $\bar{r} \neq const$ ); поток рабочего вещества однородный по скорости и температуре на входе в трубу; температура стенки трубы  $T_{ст}$  выше, чем температура входящего потока  $T_m$ ; поток рабочего вещества через пористый слой двумерный; эффект плавучести пористого слоя незначителен.

Ур. (8) для вышеперечисленных условий должно быть усложнено рассмотрением в двух направлениях: радиальном (ось  $r$ ) и продольном

(ось  $z$ ), в связи с чем выражение для определения  $\Phi$  также должно быть рассмотрено по двум координатам:

$$\Phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[ \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right]^2. \quad (9)$$

Численный метод математического моделирования позволяет рассмотреть поставленную задачу в обобщенном случае, абстрагируясь от некоторых реальных условий эксплуатации теплообменного аппарата, таких как массовые расходы основного рабочего вещества энергопреобразующей системы и воды (охлаждающей среды), теплофизических свойств этих веществ; геометрии и материала трубы, а также других теплофизических характеристик, используемых в теплотехнических расчетах теплообменных аппаратов. Для этого представим (8) в безразмерном виде, которое и будет использовано для математического моделирования численным методом

$$\bar{s}_{gen} = \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} \right)^2 + Br^* \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \bar{r}} \right)^2 + \left( \frac{\bar{v}_r}{\bar{r}} \right)^2 + \left( \frac{\bar{v}_r}{\bar{r}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{z}} \right)^2 \right] + \left[ \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{r}} \right]^2 \right\} + f \frac{Br^*}{Da} [\bar{v}_r]^2, \quad (10)$$

где  $\bar{T} = \frac{T - T_{BX}}{T_m - T_{BX}}$  – приведенная температура;

$\bar{r} = \frac{r}{r_o}$  – приведенный радиус;  $\bar{v}_z = \frac{v_z}{v_{BX}}$  – приве-

денная скорость по длине трубы;  $\bar{v}_r = \frac{v_r}{v_{BX}}$  – приведенная скорость в радиальном направлении;

$\bar{z} = \frac{z}{r_o}$  – приведенная длина трубы. Нижний

символ “о” описывает условия, при которых слой пористой структуры отсутствует.

В математической модели применены модификации Бринкмана в уравнении Дарси для анализа пористых структур [7] со следующими осесимметричными граничными условиями: при

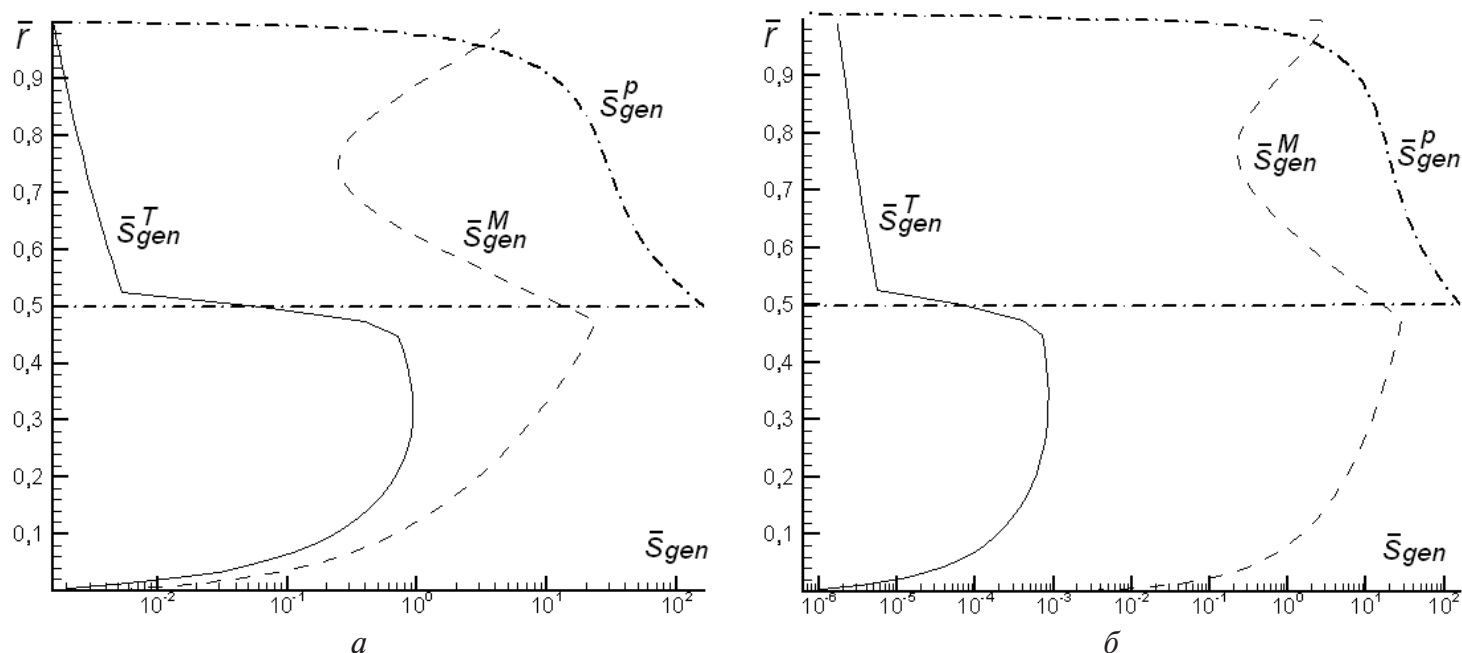


Рис. 2. Рост энтропии при  $Da=10^{-2}$ : а) входное сечение; б) выходное сечение.

$r = 0$  ( $v_r = 0$ ) градиенты скорости и температуры в радиальном направлении равны нулю. Скорость  $v_r = 0$ , если  $v_z = v_{z^2_{BX}}$  и  $T = T_{BX}$  при  $z = 0$ . Для  $z = L$  градиенты переменных в осевом направлении также приравниваются нулю. Для  $r = r_{BX}$  и  $0 < z < L$  дополнительные условия отсутствуют, т.е.  $v_z = v_r = 0$  и  $T = T_{CT}$ . Предполагалось, что существует локальное тепловое равновесие между твердым скелетом пористой структуры (твердыми шарами) и жидкостью, проходящей внутри пористой структуры.

В статье рассмотрен рост энтропии в цилиндрической трубе, длина которой в 25 раз превышает диаметр. Рост энтропии, вызванный наличием внутреннего осаждения, рассмотрен в двух сечениях трубы: входном и выходном, что дает возможность сопоставить результаты моделирования и результаты натурных испытаний, так как визуальный контроль и замеры слоя осаждения в середине трубы невозможны. Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3.

Аналізу были подвергнуты два структурных варианта пористого слоя. Первый, характеризуемый числом Дарси  $Da=10^{-2}$ , использовался авторами для имитации накипи, выпадающей из охлаждающей воды, не прошедшей предварительной деминерализации. Такой случай является распростра-

ненным для водяных конденсаторов, переохлаждающих и промежуточных охладителей (в многоступенчатых) холодильных машинах.

Второй вариант, с числом Дарси  $Da = 10^{-6}$ , имитировал накипь, выпадаемую из воды, прошедшей предварительную очистку. Этот случай соответствует теплообменным аппаратам, охлаждаемым водой, энергетических систем.

На рис.2 и 3 приведены результаты моделирования величин  $s_{gen}^T$  и  $s_{gen}^M$  для всего потока, а также  $s_{gen}^p$  для части потока, циркулирующей внутри пористого слоя.

Результаты расчетов для случая  $Da = 10^{-2}$  показывают, что величина  $s_{gen}^M$  существенно превышает  $s_{gen}^T$  в зоне пористой структуры, а аномалии, возникающие с  $s_{gen}^M$  при  $\bar{r} = 0,75$ , подтверждают первую стадию формирования слоя накипи [4]. Профиль распределения  $s_{gen}^T$  и  $s_{gen}^M$  вне зоны пористой структуры качественно соответствует данным, приведенным в [7]. Естественно, что рост  $s_{gen}^T$  в зоне осаждения и  $s_{gen}^p$  при  $Da = \text{const}$  протекает без аномалий. Величины  $s_{gen}^M$  и  $s_{gen}^p$  при  $Da = \text{const}$  сохраняются практически неизменными для входного и выходного сечений трубы, в то время как величина  $s_{gen}^T$  уменьшается более, чем на два порядка для выходного сечения,

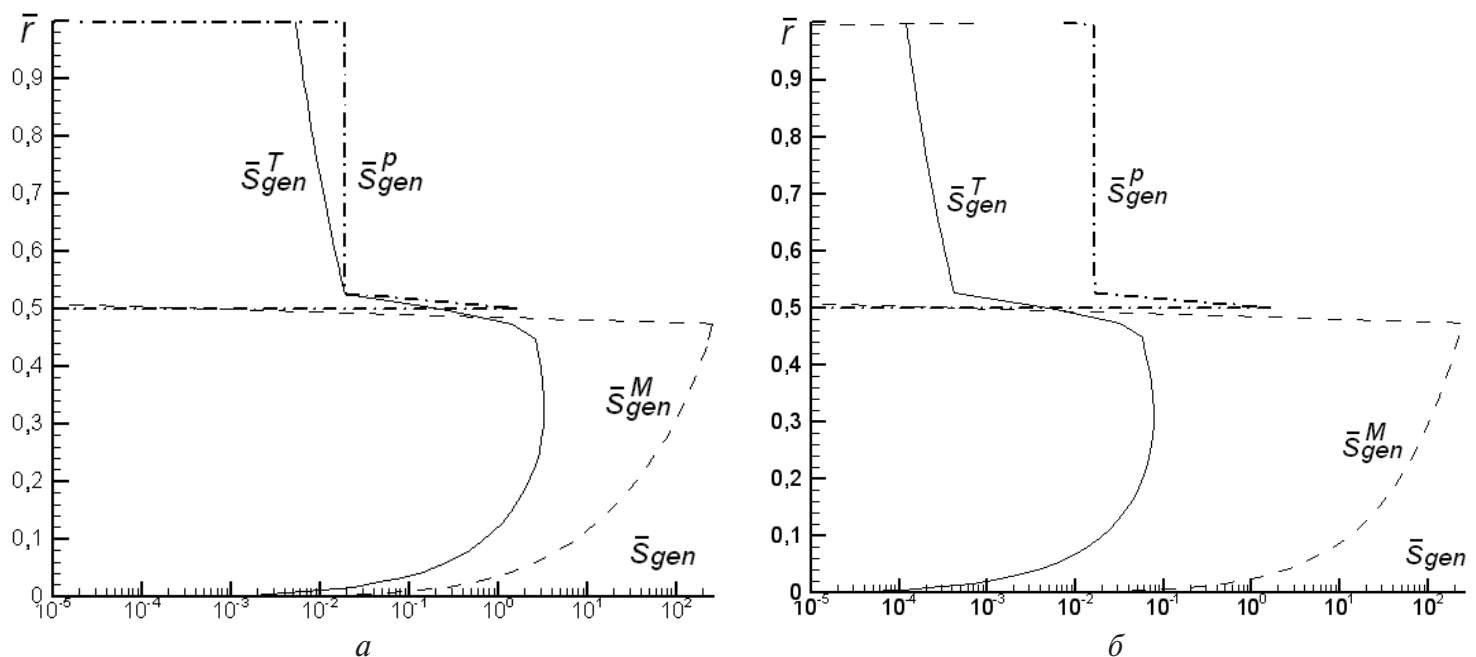


Рис. 3. Рост энтропии при  $Da = 10^{-6}$ : а) входное сечение; б) выходное сечение.

что демонстрирует сближение температур стенки трубы и потока на выходе из теплообменного аппарата. Результаты моделирования подтверждают адекватность математической модели и полученных результатов, так как качественно совпадают с интегральными характеристиками осадений накипи, полученными при натурных испытаниях [3].

Результаты расчетов для случая  $Da = 10^{-6}$  показывают, что величина  $s_{gen}^M$  в зоне пористой структуры настолько мала (на рис. 3 отсутствует, так как проходит в непосредственной близости от оси  $\bar{r}$ ), что не оказывает влияния на характер протекания процессов внутри пористой структуры, а профиль изменения  $s_{gen}^M$  вне зоны пористой структуры повторяет характер изменения этой величины для случая  $Da = 10^{-2}$ . В этом случае для упрощения анализа можно отказаться от использования теории пористых структур при описании слоя осадений на внутренней теплообменной цилиндрической поверхности, приравнивая слой осадения к дополнительному сплошному слою.

Определению профилей распределения величин  $s_{gen}^T$ ,  $s_{gen}^M$  и  $s_{gen}^P$  в осевом направлении будет посвящена отдельная публикация.

Исследования, проведенные в работе, доказали справедливость обеих гипотез, выдвинутых авторами относительно микроструктуры накипи. Таким образом, степень минерализованности охлаждающей воды является основным фактором, который должен быть учтен при анализе структуры накипи, выпадающей на теплообменной поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эксплуатация холодильников. Энциклопедический справочник "Холодильная техника". — М.: Пищевая промышленность, 1977. — 207 с.
2. Morosuk T. Porous media theory as basis for model of fouling layers formation in heat exchangers. Condenser and evaporator of refrigeration machines and heat pumps / In: Emerging Technologies and Techniques in Porous Media, Eds. Ingham, D.B. et al. — Kluwer Chapter 32. — Academic Published. — 2003. — 491–507.
3. Розенфельд Л.М., Ткачев А.Г. Холодильные машины и аппараты. — М.: Госторгиздат, 1960.
4. Морозюк Л.И., Соколовская В.В., Клименко А.А. Анализ отложений на теплообменной по-



верхности проточных конденсаторов // Холодильная техника и технология. – 2003. – № 3. – С. 25–29.

5. *Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. – М.: Энергия, 1969. – 424 с.

6. *Morosuk T.* Entropy generation in conduits filled with porous medium totally and partially // Int.

J. Heat and Mass Transfer. – Vol. 48. – 2005. – P. 2548–2560.

7. *Bejan A.* Advanced Engineering Thermodynamics. – New York: Wiley, 1988.

*Получено 20.05.2008 г.*