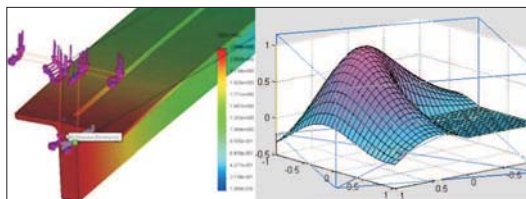


## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 697.442.8.001.24

А.Г. БАГОУТДИНОВА

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ДИАМЕТРА ТРУБНОГО И МЕЖТРУБНОГО ПРОСТРАНСТВА В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ С ПРУЖИННО-ВИТЫМ КАНАЛОМ

Результаты экспериментов по теплообмену обобщаются критериальными уравнениями, в которых в качестве характерного размера используется эквивалентный диаметр. Приведена методика определения эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в теплообменном аппарате типа «труба в трубе» с пружинно-витым каналом. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании и расчетах перспективных теплообменников с интенсифицированной теплоотдачей.

Ключевые слова: эквивалентный диаметр, теплообменный аппарат, пружинно-витой канал, тор, винтовая линия, объем, поверхность.

DOI 10.32683/ 0536-1052-2019-721-1-72-81

**Введение.** Для повышения эффективности теплообменников трубчатого типа авторами [1, 2] предлагается использовать в качестве теплообменных элементов пружинно-витые каналы и винтовые трубы.

Для определения коэффициентов теплоотдачи в предложенных теплообменных элементах и подтверждения их эффективности в котельной г. Елабуга (Республика Татарстан) смонтирована специальная экспериментальная установка, основным узлом которой является теплообменник типа «труба в трубе». Внутренний теплообменный элемент аппарата в первой серии эксперимента был выполнен из нержавеющей стали в виде винтовой трубы, во второй – в виде пружинно-витого канала.

Разработана методика экспериментальных исследований, а результаты эксперимента [3–6] обобщаются критериальными уравнениями, в которых в качестве определяющего геометрического размера используется эквивалентный диаметр.

В связи с этим возникла необходимость разработки алгоритма вычисления эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате типа «труба в трубе» с пружинно-витым каналом и винтовой трубой.

© Багоутдинова А.Г., 2019

Методика вычисления эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате типа «труба в трубе» с винтовым теплообменным элементом рассмотрена в [7].

Цель данной статьи – разработка алгоритма определения эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате типа «труба в трубе» с пружинно-витым каналом.

**1. Эквивалентный диаметр трубного пространства.** Эквивалентный диаметр трубы – величина, равная отношению учетверенной площади поперечного сечения  $S$  к периметру потока  $P$ :

$$d_{\text{eqv}} = \frac{4S}{P},$$

широко используется для расчета теплообменных аппаратов, а также для определения гидравлического радиуса элементов и насадок массообменной аппаратуры [8, 9].

Часто эквивалентный диаметр определяют как отношение учетверенного объема трубного пространства  $V$  к площади смоченной поверхности  $F$ :

$$d_{\text{eqv}} = \frac{4V}{F}.$$

Теплообменная поверхность пружинно-витого канала образуется движением окружности радиуса  $c$  вдоль винтовой линии, расположенной на круговом цилиндре радиуса  $r_0$  (рис. 1).

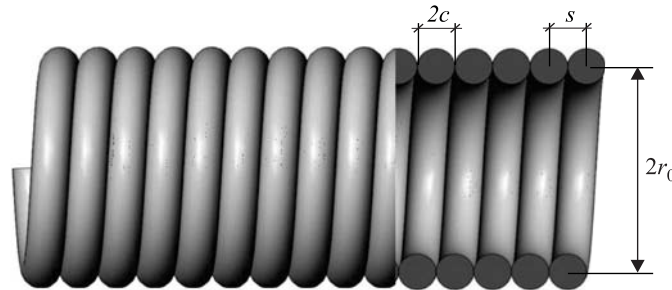


Рис. 1. Пружинно-витой канал

Поверхность пружинно-витого канала описывается уравнением [10]:

$$\vec{r}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_0 \sin t \\ bt \end{pmatrix} - c \cos \varphi \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{c \sin \varphi}{\sqrt{r_0^2 + b^2}} \begin{pmatrix} b \sin t \\ -b \cos t \\ r_0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $s = \frac{2\pi c r_0}{\sqrt{\pi^2 r_0^2 - c^2}}$  – шаг винтовой линии;

$b = \frac{c r_0}{\sqrt{\pi^2 r_0^2 - c^2}}$  – параметр винтовой линии;

$n$  – число витков винтовой линии,  $0 \leq t \leq 2\pi n$ ,  $\pi/2 \leq \varphi \leq 5\pi/2$ .

При  $3\pi/2 \leq \varphi \leq 5\pi/2$  уравнение (1) описывает внутреннюю стенку канала, а при  $\pi/2 \leq \varphi \leq 3\pi/2$  – внешнюю.

Проточную часть пружинно-витого канала можно записать в виде:

$$x = (r - c \cos \varphi) \cos t + \frac{bc \sin \varphi \sin t}{\sqrt{r^2 + b^2}};$$

$$y = (r - c \cos \varphi) \sin t - \frac{bc \sin \varphi \cos t}{\sqrt{r^2 + b^2}}; \quad z = bt + \frac{cr \sin \varphi}{\sqrt{r^2 + b^2}},$$

где  $0 \leq r \leq r_0$ ,  $0 \leq t \leq 2\pi n$ ,  $3\pi/2 \leq \varphi \leq 5\pi/2$ .

Вычислим геометрические характеристики трубы, ограниченной внутренней поверхностью одного витка пружинно-витого канала.

Для определения объема тела воспользуемся формулой [11]:

$$V = \iiint_V dx dy dz.$$

Запишем якобиан матрицы преобразования декартовых координат  $x, y, z$  в криволинейные  $r, \varphi, t$ :

$$|J| = \frac{c(r^2 \cos \varphi - cr \cos^2 \varphi + b^2 \cos \varphi)}{\sqrt{r^2 + b^2}}.$$

Тогда

$$V_{\text{int}} = \iiint_V |J| dr d\varphi dt = c \int_0^{2\pi} dt \int_{3\pi/2}^{5\pi/2} d\varphi \int_0^{r_0} \frac{r^2 \cos \varphi - cr \cos^2 \varphi + b^2 \cos \varphi}{\sqrt{r^2 + b^2}} dr =$$

$$= \pi c \left( 2b^2 \ln \left| \frac{r_0}{b} + \sqrt{\left(\frac{r_0}{b}\right)^2 + 1} \right| + (2r_0 - \pi c) \sqrt{r_0^2 + b^2} + \pi bc \right).$$

Для вычисления площади поверхности, заданной параметрическими уравнениями  $x = x(\varphi, t)$ ,  $y = y(\varphi, t)$ ,  $z = z(\varphi, t)$ , применим формулу [11]:

$$F = \iint_D \sqrt{EH - G^2} d\varphi dt,$$

где

$$E = \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi}\right)^2, \quad H = \left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)^2,$$

$$G = \frac{\partial x}{\partial \varphi} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial \varphi} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial \varphi} \frac{\partial z}{\partial t}.$$

Имеем

$$H = \frac{r_0^4 - 2cc \cos \varphi \cdot r_0^3 + (c^2 \cos^2 \varphi + 2b^2)r_0^2 - 2b^2 c \cos \varphi \cdot r_0 + b^2 c^2 + b^4}{r_0^2 + b^2};$$

$$E = c^2; \quad G = \frac{bc^2}{\sqrt{r_0^2 + b^2}}; \quad EH - G^2 = \frac{c^2(r_0^2 - c \cos \varphi \cdot r_0 + b^2)^2}{r_0^2 + b^2}.$$

$$F_{\text{int}} = \frac{c}{\sqrt{r_0^2 + b^2}} \int_0^{2\pi} dt \int_{3\pi/2}^{5\pi/2} (r_0^2 - c \cos \varphi \cdot r_0 + b^2) d\varphi = \frac{2\pi c(\pi r_0^2 + \pi b^2 - 2\tilde{n}r_0)}{\sqrt{r_0^2 + b^2}}.$$

Тогда эквивалентный диаметр трубного пространства:

$$d_{\text{int}} = \frac{4V_{\text{int}}}{F_{\text{int}}} = \frac{2 \left( 2b^2 \ln \left| \frac{r_0}{b} + \sqrt{\left( \frac{r_0}{b} \right)^2 + 1} \right| + (2r_0 - \pi c) \sqrt{r_0^2 + b^2} + \pi b c \right) \sqrt{r_0^2 + b^2}}{\pi r_0^2 + \pi b^2 - 2\tilde{n}r_0}. \quad (2)$$

**2. Эквивалентный диаметр межтрубного пространства.** Вычислим геометрические характеристики трубы, ограниченной внешней поверхностью одного витка пружинно-витого канала.

Объем тела, ограниченного внешней поверхностью пружинно-витого канала:

$$V_{\text{ext}} = \iiint_V |J| dr d\varphi dt = c \int_0^{2\pi} dt \int_{\pi/2}^{3\pi/2} d\varphi \int_0^{r_0} \frac{r^2 \cos \varphi - cr \cos^2 \varphi + b^2 \cos \varphi}{\sqrt{r^2 + b^2}} dr =$$

$$= \pi c \left( 2b^2 \ln \left| \frac{r_0}{b} + \sqrt{\left( \frac{r_0}{b} \right)^2 + 1} \right| + (2r_0 + \pi c) \sqrt{r_0^2 + b^2} - \pi b c \right).$$

Объем соответствующего межтрубного пространства:

$$V = V_0 - V_{\text{ext}} =$$

$$= \pi R^2 s - \pi c \left( 2b^2 \ln \left| \frac{r_0}{b} + \sqrt{\left( \frac{r_0}{b} \right)^2 + 1} \right| + (2r_0 + \pi c) \sqrt{r_0^2 + b^2} - \pi b c \right).$$

Площадь внешней поверхности пружинно-витого канала:

$$F_{\text{ext}} = \frac{c}{\sqrt{r_0^2 + b^2}} \int_0^{2\pi} dt \int_{\pi/2}^{3\pi/2} (r_0^2 - c \cos \varphi \cdot r_0 + b^2) d\varphi = \frac{2\pi c(\pi r_0^2 + \pi b^2 + 2\tilde{n}r_0)}{\sqrt{r_0^2 + b^2}}.$$

Площадь смоченной поверхности:

$$F = F_0 + F_{\text{ext}} = 2\pi R_0 s + \frac{2\pi c(\pi r_0^2 + \pi b^2 + 2\tilde{n}r_0)}{\sqrt{r_0^2 + b^2}}.$$

Здесь  $R_0, V_0, F_0$  – соответственно радиус, объем и площадь поверхности внешней (гладкой) трубы.

Тогда эквивалентный диаметр межтрубного пространства может быть вычислен по формуле:

$$d_{\text{ext}} = \frac{2c\sqrt{r_0^2 + b^2} \left( \frac{R_0^2 s}{\tilde{n}} - 2b^2 \ln \left| \frac{r_0}{b} + \sqrt{\left(\frac{r_0}{b}\right)^2 + 1} \right| - (2r_0 + \pi c)\sqrt{r_0^2 + b^2} + \pi bc \right)}{R_0 s \sqrt{r_0^2 + b^2} + c(\pi r_0^2 + \pi b^2 + 2\tilde{n}r_0)}. \quad (3)$$

**3. Расчет эквивалентных диаметров в теплообменном аппарате типа «труба в трубе» с пружинно-витым каналом.** Геометрические размеры теплообменника типа «труба в трубе», представленного на рис. 1: радиус внешней трубы  $R_0 = 0,032$  м, радиус подложки пружинно-витого канала  $r_0 = 0,0115$  м, радиус проволоки  $c = 0,001$ .

Вычислим шаг винтовой линии  $s = 2,000767 \cdot 10^{-3}$  м, параметр винтовой линии  $b = 3,18594 \cdot 10^{-4}$  м.

Тогда объем проточной части канала

$$V_{\text{int}} = \pi c \left( 2b^2 \ln \left| \frac{r_0}{b} + \sqrt{\left(\frac{r_0}{b}\right)^2 + 1} \right| + (2r_0 - \pi c)\sqrt{r_0^2 + b^2} + \pi bc \right) = 7,23289 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3,$$

объем межтрубного пространства

$$V = \pi R_0^2 s - \pi c \left( 2b^2 \ln \left| \frac{r_0}{b} + \sqrt{\left(\frac{r_0}{b}\right)^2 + 1} \right| + (2r_0 + \pi c)\sqrt{r_0^2 + b^2} - \pi bc \right) = 5,48932 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

площадь внутренней поверхности пружинно-витого канала

$$F_{\text{int}} = \frac{2\pi c(\pi r_0^2 + \pi b^2 - 2\tilde{n}r_0)}{\sqrt{r_0^2 + b^2}} = 2,14303 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

площадь смоченной поверхности в межтрубном пространстве

$$F = 2\pi R_0 s + \frac{2\pi c(\pi r_0^2 + \pi b^2 + 2\tilde{n}r_0)}{\sqrt{r_0^2 + b^2}} = 6,41487 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

эквивалентный диаметр трубного пространства

$$d_{\text{int}} = \frac{4V_{\text{int}}}{F_{\text{int}}} = 0,01349 \text{ м},$$

эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$d_{\text{ext}} = \frac{4V}{F} = 0,03423 \text{ м}.$$

**4. Геометрические характеристики канала, составленного из плотно примыкающих друг к другу торов.** Определим эквивалентный диаметр канала, составленного из плотно примыкающих друг к другу торов (рис. 2).

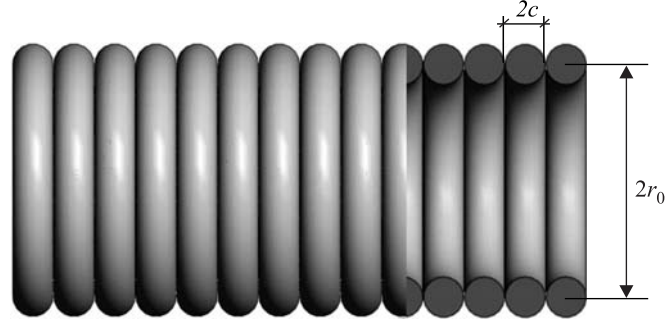


Рис. 2. Канал, составленный из торов

Площадь внутренней поверхности тора можно вычислить как площадь поверхности, образованной вращением графика функции  $y(x) = r_0 - \sqrt{c^2 - x^2}$  вокруг оси  $x$  по формуле

$$F = 2\pi \int_{-c}^c y(x) \sqrt{1 + (y')^2} dx. \quad (4)$$

Объем, ограниченный внутренней поверхностью тора, можно вычислить как объем фигуры, образованной вращением графика функции  $y(x) = r_0 - \sqrt{c^2 - x^2}$  вокруг оси  $x$  по формуле

$$V = \pi \int_{-c}^c y^2(x) dx. \quad (5)$$

Вычислим

$$F_{\text{tor\_int}} = 2\pi c \int_{-c}^c \left( \frac{r_0}{\sqrt{c^2 - x^2}} - 1 \right) dx = 2\pi c (\pi r_0 - 2c);$$

$$V_{\text{tor\_int}} = \pi \int_{-c}^c \left( r_0 - \sqrt{c^2 - x^2} \right)^2 dx = \pi \tilde{n} \left( 2r_0^2 - \pi \tilde{n} r_0 + \frac{4}{3} c^2 \right).$$

Эквивалентный диаметр трубного пространства:

$$d_{\text{tor\_int}} = \frac{4V_{\text{tor\_int}}}{F_{\text{tor\_int}}} = \frac{2(6r_0^2 - 3\pi \tilde{n} r_0 + 4c^2)}{3(\pi r_0 - 2c)}. \quad (6)$$

Площадь внешней поверхности тора вычислим по формуле (4), объем, ограниченный внешней поверхностью тора, – по формуле (5), где  $y(x) = r_0 + \sqrt{c^2 - x^2}$ :

$$F_{\text{tor\_ext}} = 2\pi c \int_{-c}^c \left( \frac{r_0}{\sqrt{c^2 - x^2}} + 1 \right) dx = 2\pi c (\pi r_0 + 2c);$$

$$V_{\text{tor\_ext}} = \pi \int_{-c}^c \left( r_0 + \sqrt{c^2 - x^2} \right)^2 dx = \pi \tilde{n} \left( 2r_0^2 + \pi \tilde{n} r_0 + \frac{4}{3} c^2 \right).$$

Тогда площадь смоченной поверхности в межтрубном пространстве

$$F = 4\pi R_0 c + F_{\text{tor\_ext}} = 2\pi c(\pi r_0 + 2c + 2R_0),$$

объем межтрубного пространства

$$V = 2\pi R_0^2 c - V_{\text{tor\_ext}} = \pi \tilde{n} \left( 2R_0^2 - 2r_0^2 + \pi \tilde{n} r_0 + \frac{4}{3} c^2 \right).$$

Эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$d_{\text{tor\_ext}} = \frac{4V}{F} = \frac{2(6R_0^2 - 6r_0^2 + 3\pi \tilde{n} r_0 + 4c^2)}{3(\pi r_0 + 2c + 2R_0)}. \quad (7)$$

Вычислим эквивалентные диаметры для теплообменника типа «труба в трубе» с внутренним каналом, составленным из плотно примыкающих друг к другу торов.

Имеем  $R_0 = 0,032$  м,  $r_0 = 0,0115$  м,  $c = 0,001$ . Тогда эквивалентный диаметр трубного пространства равен

$$d_{\text{tor\_int}} = \frac{2(6r_0^2 - 3\pi \tilde{n} r_0 + 4c^2)}{3(\pi r_0 - 2c)} = 0,01346 \text{ м,}$$

а эквивалентный диаметр межтрубного пространства равен

$$d_{\text{tor\_ext}} = \frac{2(6R_0^2 - 6r_0^2 + 3\pi \tilde{n} r_0 + 4c^2)}{3(\pi r_0 + 2c + 2R_0)} = 0,03567 \text{ м.}$$

**4. Сравнение эквивалентных диаметров пружинно-витого канала и канала, составленного из плотно примыкающих друг к другу торов.** Запишем формулы для вычисления эквивалентных диаметров (2), (3), (6), (7) в безразмерном виде.

Для пружинно-витого канала:

$$\frac{d_{\text{int}}}{2r_0} = \frac{\pi \tau \left( 2\tau \ln \left| \sqrt{\pi^2 \tau^2 - 1} + \pi \tau \right| + \pi \tau (2\tau - \pi) \sqrt{\pi^2 \tau^2 - 1} + \pi \sqrt{\pi^2 \tau^2 - 1} \right)}{\sqrt{\pi^2 \tau^2 - 1} (\pi^3 \tau^2 - 2\pi^2 \tau^2 + 2)}; \quad (8)$$

$$\frac{d_{\text{ext}}}{2r_0} = \frac{\pi \tau \left( 2\pi T^2 - \frac{2\tau}{\sqrt{\pi^2 \tau^2 - 1}} \ln \left| \sqrt{\pi^2 \tau^2 - 1} + \pi \tau \right| + \pi (1 - 2\tau^2 - \pi \tau) \right)}{\pi^2 \tau^2 (2T + \pi \tau) + 2(\pi^2 \tau^2 - 1)}. \quad (9)$$

Для канала, составленного из плотно примыкающих друг к другу торов:

$$\frac{d_{\text{tor\_int}}}{2r_0} = \frac{6\tau^2 - 3\pi\tau + 4}{3\tau(\pi\tau - 2)}; \quad (10)$$

$$\frac{d_{\text{tor\_ext}}}{2r_0} = \frac{6(T^2 - \tau^2) + 3\pi\tau + 4}{3\pi\tau^2 + 6\tau(T + 1)}. \quad (11)$$

Здесь  $\tau = \frac{r_0}{c}$ ,  $T = \frac{R_0}{c}$ .

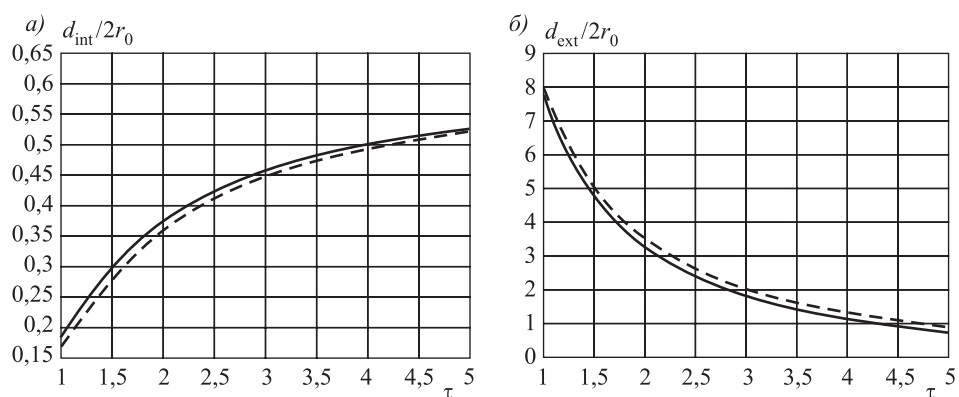


Рис. 3. Зависимость эквивалентных диаметров трубного (а) и межтрубного (б) пространства от параметра  $\tau$

На рис. 3, а представлены графики зависимостей эквивалентных диаметров трубного пространства от параметра  $\tau$ , рассчитанных по формуле (8) для пружинно-витого канала, по формуле (10) для канала, составленного из плотно примыкающих друг к другу торов.

На рис. 3, б представлены графики зависимостей эквивалентных диаметров межтрубного пространства от параметра  $\tau$ , рассчитанных по формуле (9) для пружинно-витого канала, по формуле (11) для канала, составленного из плотно примыкающих друг к другу торов.

Как видно из результатов исследования эквивалентные диаметры пружинно-витых каналов и каналов, составленных из плотно примыкающих друг к другу торов, отличаются не более чем на 5 %.

Следовательно, для инженерных расчетов основных характеристик пружинно-витых каналов можно использовать вместо формул (2), (3) более простые формулы (6), (7).

**Выводы.** На базе интегрального исчисления получены формулы для вычисления эквивалентных диаметров трубного и межтрубного пространства в теплообменном аппарате типа «труба в трубе» с пружинно-витым каналом и каналом, составленным из плотно примыкающих друг к другу торов. Показано, что эквивалентные диаметры рассмотренных каналов отличаются не более чем на 5 %.

Для инженерных расчетов эквивалентных диаметров трубного и межтрубного пространства в аппаратах типа «труба в трубе» с пружинно-витым каналом рекомендовано использовать вместо формул (2), (3) более простые формулы (6), (7).

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании и расчетах нового интенсифицированного теплообменного оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 62694 Российская Федерация. Теплообменный элемент / А.Я. Золотонос, Я.Д. Золотонос, И.А. Конахина; заявитель и патентообладатель КГАСУ. № 2006143517/23; заявл. 7.12.06; опубл. 27.04.07. Бюл. № 12.



2. Пат. 119452 Российская Федерация. Теплообменный элемент / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова, И.И. Осыка; заявитель и патентообладатель КГАСУ. № 2012109355/06; заявл. 12.03.12; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.
3. Rennie T.J., Raghavan V.G.S. Experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005. No. 29. P. 919–924.
4. Kumar V. Numerical studies of a tube-in-tube helically coiled heat exchanger // *Chemical Engineering and Processing*. 2008. No. 47. P. 2287–2295.
5. Siddique M., Alhazmy M. Experimental study of turbulent single-phase flow and heat transfer inside a micro-finned tube // *International journal of Refrigeration*. 2008. No. 31. P. 234–341.
6. Swamee P.K., Aggarwal N., Aggarwal V. Optimum design of double pipe heat exchanger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. No. 51. P. 2260–2266.
7. Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д. Определение эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате с винтовым теплообменным элементом // *Изв. вузов. Строительство*. 2018. № 2. С. 77–85.
8. Фраас А., Оцисик М. Расчет и конструирование теплообменников. М.: Атомиздат, 1971.
9. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. М.: Альянс, 2014. 752 с.
10. Багоутдинова А.Г., Вачагина Е.К., Золотоносов Я.Д. Математическое моделирование поверхностей теплообмена пружинно-витых каналов // *Изв. КГАСУ*. 2017. № 3 (41). С. 146–157.
11. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3-х т. 8-е изд. М.: Физматлит, 2003. 864 с.

**Багоутдинова Альфия Гиззетдиновна**, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Получено после доработки 14.12.18

**Bagoutdinova Al'fiya Gizzetdinovna**, PhD, Ass. Professor;

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Kazan (Volga region) Federal University (KFU), Russia

## **DETERMINATION OF THE EQUIVALENT DIAMETER OF THE TUBE AND INTER-TUBE SPACE IN A HEAT EXCHANGE EQUIPMENT WITH A SPRING CHANNEL**

The results of experiments on heat transfer, as is well known, are generalized by criterial equations, in which the equivalent diameter is used as the characteristic size. The paper presents a method for determining the equivalent diameter of the tube and annular space in a heat exchanger apparatus of the type «pipe in pipe» with a spring-twisted channel. The results of this work can be used in the design and calculations of promising heat exchangers with intensified heat transfer.

**Key words:** equivalent diameter, heat exchanger, spring channel, torus, helix, volume, surface.

REFERENCES

1. Pat. 62694 Russian Federation. Teploobmennyy element [The heat exchange element]. A.Ya. Zolotonosov, Ya.D. Zolotonosov, I.A. Konakhina; applicant and patentee of KSUAE. No. 2006143517/23; appl. 7.12.06; publ. 27.04.07, Bull. No. 12. (in Russian)
2. Pat. 119452 Russian Federation. Teploobmennyy element [The heat exchange element]. A.Ya. Zolotonosov, Ya.D. Zolotonosov, A.G. Bagoutdinova, I.I. Osyka; applicant and patentee of KSUAE. No. 2012109355/06; appl. 12.03.12, publ. 20.08.2012, Bull. No. 23. (in Russian)
3. Rennie T.J., Raghavan V.G.S. Experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2005. No. 29. Pp. 919–924.
4. Kumar V. Numerical studies of a tube-in-tube helically coiled heat exchanger. *Chemical Engineering and Processing*. 2008. No. 47. Pp. 2287–2295.
5. Siddique M., Alhazmy M. Experimental study of turbulent single-phase flow and heat transfer inside a micro-finned tube. *International journal of Refrigeration*. 2008. No. 31. Pp. 234–341.
6. Swamee P.K., Aggarwal N., Aggarwal V. Optimum design of double pipe heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. No. 51. Pp. 2260–2266.
7. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D. Opredeleniye ekvivalentnogo diametra trubnogo i mezhtrubnogo prostranstva v apparate s vintovym teploobmennym elementom [Determination of the equivalent diameter of the tube and tube space in the apparatus with a screw heat exchanger]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018. No. 2. Pp. 77–85. (in Russian)
8. Fraas A., Otsisik M. Raschet i konstruirovaniye teploobmennikov [Calculation and design of heat exchangers]. Moscow, Atomizdat, 1971. (in Russian)
9. Kasatkin A.G. Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii: uchebnik dlya vuzov [Basic processes and apparatus of chemical technology: textbook for universities]. Moscow, Al'yans, 2014. 752 p. (in Russian)
10. Bagoutdinova A.G., Vachagina E.K., Zolotonosov Ya.D. Matematicheskoye modelirovaniye poverkhnostey teploobmena pruzhinno-vitykh kanalov [Mathematical modeling of heat transfer surfaces of spring-twisted channels]. *Izvestiya KGASU* [News of KSUAE]. 2017. No. 3 (41). Pp. 146–157. (in Russian)
11. Fikhtengol'ts G.M. Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya [Course of differential and integral calculus]. Moscow, Fizmatlit, 2003. 864 p. (in Russian)