

ФИЗИКА



УДК 532.517.2

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛАХ С ТРЕХЗАХОДНЫМИ ШНЕКОВЫМИ ВСТАВКАМИ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ ПЕКЛЕ

И.А. Коначина¹, Э. М. Хуснутдинова¹, А.И.Кадыров², Е.К.Вачагина²

¹Казанский федеральный университет, Казань, Россия

²ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

rr-088@mail.ru

Резюме: В работе представлены математическая модель и результаты численных исследований теплообмена при ламинарных течениях вязких жидкостей в каналах с трехзаходными шнековыми вставками, которые широко распространены на практике в качестве интенсификаторов конвективного теплообмена.

Ключевые слова: гидродинамика, теплообмен, шнековые вставки, винтовая система координат.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-161-169.

Для цитирования: Коначина И.А., Хуснутдинова Э.М., Кадыров А.И., Вачагина Е.К. Теплообмен при ламинарных течениях вязкой жидкости в каналах с трехзаходными шнековыми вставками при больших числах Пекле // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. Т. 20. № 11-12. С. 161-169. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-161-169.

HEAT TRANSFER FOR LAMINAR VISCOUS FLOWS IN A TUBE FITTED WITH TRIPLE TWISTED FINNS ON ROD UNDER LARGE PECLET NUMBERS

I.A. Konakhina¹, E.M. Khusnutdinova¹, A.I. Kadyirov², E.K. Vachagina²

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²FRC Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia

rr-088@mail.ru

Abstract: The mathematical model and the numerical results of the heat transfer in laminar viscous flows in a tube fitted with triple twisted fins on a rod is obtained. The tubes fitted with triple twisted fins on a rod are widely used for heat transfer enhancement.

Keywords: hydrodynamics, heat exchange, screw inserts, helical coordinate system.

For citation: I.A. Konakhina, E.M. Khusnutdinova, A.I. Kadyirov, E.K. Vachagina. Heat transfer for laminar viscous flows in a tube fitted with triple twisted fins on rod under large Peclet

Введение

Как известно, винтовая закрутка потока жидкости по всей длине канала является одним из пассивных методов интенсификации теплоотдачи при течении вязких жидкостей в каналах теплообменного оборудования [1–6]. В случаях, когда не допускается сильное повышение гидравлического сопротивления канала для интенсификации теплообмена, используется метод разрушения пристенных слоев жидкости с помощью нанесения винтовой накатки [3] или использование коротких закручивающих устройств [6]. Однако для высоковязких жидкостей, для которых характерен ламинарный режим течения, эффект от действия винтовой накатки или коротких закручивающих устройств невелик. В таких случаях и когда допускается увеличение гидравлического сопротивления каналов используется закрутка всего потока жидкости. В качестве устройств, обеспечивающих закрутку всего потока жидкости, а не только ее пристенных слоев, наиболее часто используются винтовые ленточные и шнековые вставки. Исследованию применения ленточных вставок для интенсификации теплообмена посвящено большое количество работ [5]. Однако очевидно, что процессы переноса тепла в каналах с ленточными вставками менее эффективны, чем в каналах со шнековыми вставками. Площадь поверхности теплообмена, приходящаяся на единицу длины канала, в первом случае меньше, чем во втором. Работ, посвященных процессам переноса тепла в каналах со шнековыми вставками, несколько меньше, причем почти все они рассматривают однозаходные шнековые вставки [1, 4, 6]. При этом очевидно, что влияние закручивания потока на процессы переноса тепла в каналах с однозаходной шнековой вставкой меньше, чем в каналах с двузаходной или трехзаходной вставками: чем больше число ходов, тем интенсивнее происходят процессы переноса тепла. С другой стороны, при увеличении числа ходов возрастает гидравлическое сопротивление каналов. Таким образом, в случаях, когда запасы мощности на прокачку жидкости достаточны для обеспечения повышенного гидравлического сопротивления канала, использование трехзаходной шнековой вставки позволит достичь большей эффективности по сравнению с однозаходной шнековой вставкой. Этот факт диктует целесообразность исследования процессов переноса тепла в каналах с трехзаходными шнековыми вставками.

Постановка задачи

Рассматривается теплоперенос при стационарном ламинарном течении вязкой ньютоновской жидкости в канале с трехзаходной шнековой вставкой (рис. 1). Исследуемый канал имеет три равнозначные области, в связи с чем в качестве расчетной области рассмотрена одна из них. В оставшихся двух областях распределения скоростей и температур будут идентичными.

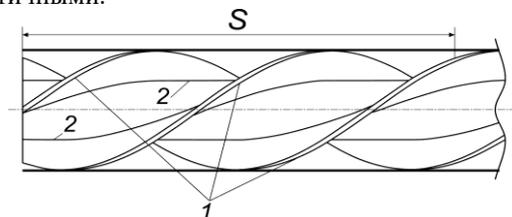


Рис. 1. Продольное сечение канала с трехзаходной шнековой вставкой: S – шаг винтового канала (длина части канала, соответствующая повороту ребер шнека на 360 градусов); 1 – ребра трехзаходной шнековой вставки; 2 – внутренняя труба

В качестве основных допущений при постановке задачи принято: теплофизические характеристики (плотность ρ_f , коэффициент теплопроводности λ_f , удельная теплоемкость c_f и динамическая вязкость μ_f) жидкости в рассматриваемом диапазоне температур меняются незначительно и могут быть приняты постоянными. Силы тяжести пренебрежимо малы, перенос тепла за счет теплопроводности в осевом направлении много меньше, чем в поперечных направлениях, и меньше конвективного переноса тепла как в осевом, так и в поперечных направлениях. На входе в канал задан сформировавшийся профиль скорости, на стенках канала принято условие прилипания жидкости. На границах канала поддерживается постоянное значение температуры.

Канал с трехзаходной шнековой вставкой обладает винтовой симметрией. Данное свойство позволяет ввести специальную винтовую систему координат [1–3], переменные которой η^1, η^2, η^3 связаны с переменными декартовой системы координат соотношениями

$$\begin{cases} x = R\eta^1 \cos(\eta^2 \pm \kappa\eta^3) \\ y = R\eta^1 \sin(\eta^2 \pm \kappa\eta^3) \\ z = R\eta^3 \end{cases} \quad (1)$$

где $\kappa = 2\pi R/S$, R – большой радиус канала с трехзаходной шнековой вставкой; S – шаг винтового канала; $z = R\eta^3$ – ось канала. В (1) знак "+" выбирается для канала, винтовые ребра которого закручены по часовой стрелке, а знак "-" – для канала, винтовые ребра которого закручены против часовой стрелки.

Система уравнений, описывающая процессы гидродинамики и теплообмена при сделанных допущениях принимает вид

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}_R \left(\frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^1}{\partial \eta^2} v^2 - \eta^1 v^2 v^2 \pm 2\kappa \eta^1 v^2 v^3 - \kappa^2 \eta^1 v^3 v^3 \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_1^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_1^2}{\partial \eta^2} - \frac{1}{\eta^1} s_2^2 \pm \frac{\kappa}{\eta^1} s_2^3 + \frac{1}{\eta^1} s_1^1, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}_R (\eta^1)^2 \left(\frac{\partial v^2}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} v^2 + \frac{2}{\eta^1} v^1 v^2 \right) + \\ \operatorname{Re}_R (\eta^1)^2 \left(\mp \frac{2\kappa}{\eta^1} v^1 v^3 \mp \kappa \left(\frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} v^2 \right) \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial \eta^2} + \frac{\partial s_2^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_2^2}{\partial \eta^2} + \eta^1 s_1^2 \mp \kappa \eta^1 s_1^3, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}_R \left(\mp \kappa (\eta^1)^2 \left(\frac{\partial v^2}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} v^2 + \frac{2}{\eta^1} v^1 v^2 \mp \frac{2\kappa}{\eta^1} v^1 v^3 \right) \right) + \\ + \operatorname{Re}_R \left(\left(1 + \kappa^2 (\eta^1)^2 \right) \left(\frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} v^2 \right) \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial \eta^3} + \frac{\partial s_3^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_3^2}{\partial \eta^2} \pm \frac{\kappa}{\eta^1} s_2^1 \mp \kappa \eta^1 s_1^2 + \kappa^2 \eta^1 s_1^3 + \frac{1}{\eta^1} s_3^1, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta^1} v^1 = 0,$$

$$\text{Re}_R \left(v^1 \frac{\partial \theta}{\partial \eta^1} + v^2 \frac{\partial \theta}{\partial \eta^2} + v^3 \frac{\partial \theta}{\partial \eta^3} \right) = \frac{\partial^2 \theta}{\partial (\eta^1)^2} + \frac{\partial}{\partial \eta^2} \left(\frac{1 + \kappa^2 (\eta^1)^2}{(\eta^1)^2} \frac{\partial \theta}{\partial \eta^2} \right) + \frac{1}{\eta^1} \frac{\partial \theta}{\partial \eta^1}, \quad (5)$$

где $\text{Re}_R = \rho_f V_a R / \mu_f$ – модифицированное число Рейнольдса, рассчитанное по среднерасходной скорости $V_a = Q / \Omega$ и радиусу канала: Q – объемный расход жидкости; Ω – площадь поперечного сечения; $v^i = V^i / V_a$ ($i = 1, 2, 3$) – безразмерные контравариантные компоненты безразмерной скорости; $\mathbf{v} = \mathbf{V} / V_a$; V^i ($i = 1, 2, 3$) – контравариантные компоненты скорости \mathbf{V} в винтовой системе координат; $p = PR / (\mu_f V_a)$ – безразмерное давление; P – давление; $\text{Pe}_R = \rho_f c_f V_a R / \lambda_f$ – модифицированное число Пекле; $\theta = (T - T_w) / (T_0 - T_w)$ – безразмерная температура; T – температура жидкости; T_w – температура стенок канала; T_0 – температура жидкости на входе в канал; $s_i^j = (\text{grad} \mathbf{v})_i^j$ – тензор.

В качестве условий однозначности взяты следующие условия:

$$v^i(\delta, \eta^2) = v^i(1, \eta^2) = 0, \quad (i = 1, 2, 3) \text{ при } -\pi/3 \leq \eta^2 \leq \pi/3,$$

$$v^i(\eta^1, \pm\pi/3) = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \text{ при } \delta \leq \eta^1 \leq 1,$$

$$\theta(\delta, \eta^2, \eta^3) = \theta(1, \eta^2, \eta^3) = 0, \quad -\pi/3 \leq \eta^2 \leq \pi/3, 0 \leq \eta^3 < \infty,$$

$$\theta(\eta^1, \pm\pi/3, \eta^3) = 0, \quad \delta \leq \eta^1 \leq 1, 0 \leq \eta^3 < \infty,$$

$$\theta(\eta^1, \eta^2, 0) = 1, \quad \delta \leq \eta^1 \leq 1, -\pi/3 \leq \eta^2 \leq \pi/3,$$

$$\theta(\eta^1, \eta^2, \eta^3 \rightarrow \infty) = 0, \quad \delta \leq \eta^1 \leq 1, -\pi/3 \leq \eta^2 \leq \pi/3, \quad (6)$$

где $\delta = r / R$; r – меньший радиус канала с трехзаходной шнековой вставкой.

Компоненты скорости зависят только от двух переменных η^1 и η^2 , а безразмерное давление может быть записано как $p = f_0 \eta^3 + f_{00}(\eta^1, \eta^2)$, где $\partial p / \partial \eta^3 = f_0 = \text{const}$.

При сделанных допущениях система уравнений переноса количества движения и неразрывности решается отдельно от уравнения переноса энергии, затем полученные гидродинамические поля используются для решения уравнения переноса энергии. Для решения поставленной задачи адаптирован программный пакет "COMSOL Multiphysics", использующий метод конечных элементов. Уравнения (2)–(5) записаны в винтовой системе координат. "COMSOL Multiphysics" позволяет ввести в общую форму уравнений движения и неразрывности необходимые функции для перехода к винтовой системе координат (1).

Апробация пакета на примере решения задачи о течении вязкой жидкости в канале с однозаходной шнековой вставкой представлена в работе [2].

При обработке полученных результатов использованы традиционные числа Рейнольдса $Re_h = \rho_f V_a D_h / \mu_f$ и Пекле $Pe_h = \rho_f c_f V_a D_h / \lambda_f$, где в качестве определяющих размеров взят гидравлический диаметр D_h . Его значение для каналов с трехзаходной шнековой вставкой определено как $D_h = 4V/\Sigma$, где объем V и площадь смоченной поверхности Σ одного хода канала и одного витка канала определены следующим образом:

$$V = \pi(1 - \delta^2)R^2S/3,$$

$$\Sigma = RS \left[\frac{2\pi(1 + \delta)}{3} + \left(\sqrt{\kappa^2 + 1} - \delta\sqrt{\kappa^2\delta^2 + 1} + \frac{\arcsin h(\kappa) - \arcsin h(\kappa\delta)}{\kappa} \right) \right].$$

Безразмерные среднерасходная θ_a и нормализованная $\vartheta(\eta^1, \eta^2, \eta^3)$ температуры вычислены по формулам:

$$\theta_a = \frac{R^2}{\Omega} \iint_{\Omega_0} \theta(\eta^1, \eta^2) u^3(\eta^1, \eta^2) \eta^1 d\eta^1 d\eta^2, \quad (8)$$

$$\vartheta(\eta^1, \eta^2, \eta^3) = \theta(\eta^1, \eta^2, \eta^3) / \theta_a(\eta^3), \quad (9)$$

где $\vartheta(\eta^1, \eta^2, \eta^3)$ с увеличением расстояния от входа в канал стремится к стабилизированному распределению $\vartheta_\infty(\eta^1, \eta^2) = \lim_{\eta^3 \rightarrow \infty} \vartheta(\eta^1, \eta^2, \eta^3)$.

Локальное Nu_h и среднее \overline{Nu}_h числа Нуссельта определены через среднерасходную температуру следующим образом:

$$Nu_h = Pe_h \frac{D_h}{4R} \frac{1}{\theta_a} \left| \frac{\partial \theta_a}{\partial \eta^3} \right|, \quad \overline{Nu}_h = Pe_h \frac{D_h}{4R} |\ln \theta_a|.$$

Результаты

Расчеты представлены для частного случая: геометрические размеры канала $\delta = r/R = 0,5$ и $S/D = 4$, где $D = 2R$ – большой диаметр канала с трехзаходной шнековой вставкой; для двух значений чисел Рейнольдса $Re_h = 100; 500$ и одного значения числа Пекле $Pe_h = 100$.

На рис. 2 показаны профили осевых физических составляющих вектора скорости. С ростом числа Рейнольдса картина распределения составляющих вектора скорости становится все более ассиметричной, при этом максимальные значения осевой составляющей смещаются по ходу закрутки потока.

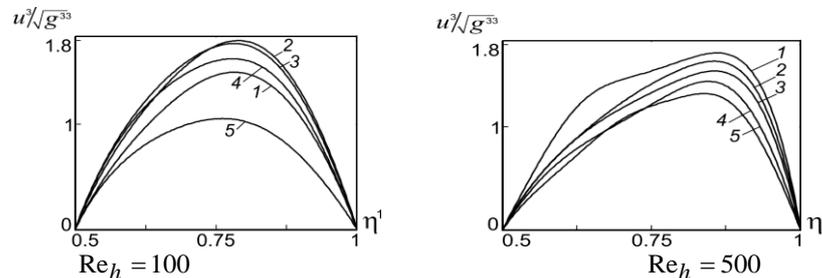


Рис.2. Профили осевых составляющих скорости вдоль прямых $\eta^2 = \text{const}$:

$$1 - \eta^2 = -\frac{4\pi}{15}; 2 - \eta^2 = -\frac{2\pi}{15}; 3 - \eta^2 = 0; 4 - \eta^2 = \frac{2\pi}{15}; 5 - \eta^2 = \frac{4\pi}{15}.$$

На рис. 3 показаны профили поперечных радиальной и тангенциальной физических составляющих вектора скорости для различных значений чисел Рейнольдса. Видно, что величины поперечных составляющих вектора скорости соизмеримы с величинами осевой составляющей, следовательно, существенно влияют на процессы переноса тепла в рассматриваемом канале.

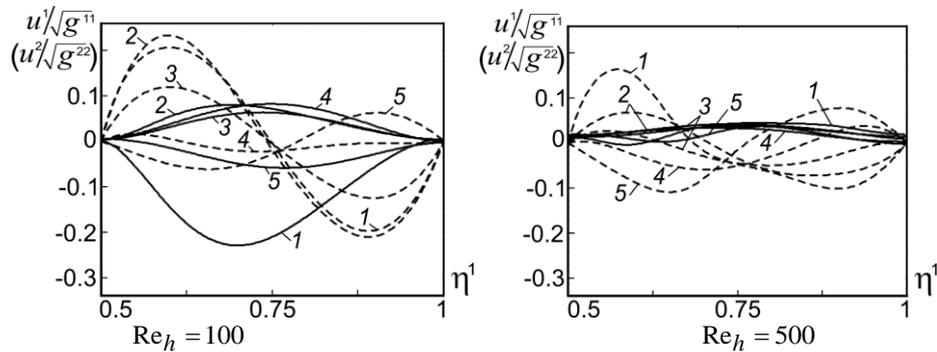


Рис. 3. Профили поперечных составляющих скорости вдоль прямых $\eta^2 = \text{const}$:

сплошная линия – радиальная составляющая $\left(u^1/\sqrt{g^{11}}\right)$; пунктирная линия –
– тангенциальная составляющая $\left(u^2/\sqrt{g^{22}}\right)$; обозначения согласно рис. 2

На рис. 4 показано распределение безразмерной среднерасходной температуры θ_a по длине канала. Видно, что с увеличением числа Рейнольдса температура жидкости приближается к температуре стенки канала на меньшем расстоянии: для $Re_h = 500$ это расстояние равно 12, а для $Re_h = 100$ равно 16.

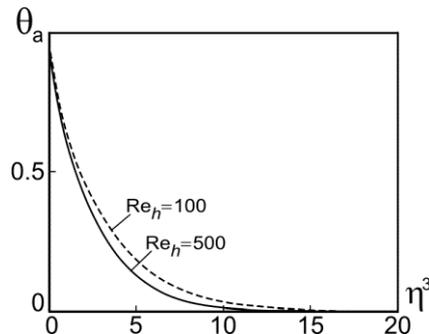


Рис.4. Распределение безразмерной среднерасходной температуры по длине канала

Распределения локальных и средних чисел Нуссельта по длине канала со шнековыми вставками характеризуются резким падением вблизи области, непосредственно прилегающей к входу в канал, затем ростом и стабилизацией (рис. 5), что качественно согласуется с результатами работы [7]. При этом локальные числа Нуссельта принимают наименьшие значения вблизи входной области канала $Nu_h = 5,51$ ($Re_h = 100$) и $Nu_h = 6,72$ ($Re_h = 500$). Увеличение числа Рейнольдса в 5 раз приводит к увеличению

стабилизированного числа Nu_h в 1,44 раза. Несмотря на характерный спад интенсивности теплообмена вблизи входной области, локальные и средние значения числа Нуссельта значительно превышают значения, соответствующие круглой трубе и плоской щели. Например, стабилизированное число Нуссельта в канале с трехзаходной шнековой вставкой при $Re_h = 500$ на 154,1% больше соответствующего значения в круглой трубе и на 23,2% больше соответствующего значения в плоской щели.

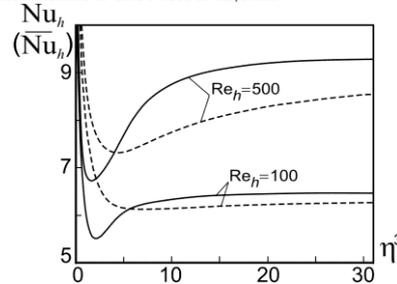


Рис.5. Распределение локального (сплошная линия) и среднего (пунктирная линия) чисел Нуссельта по длине канала

На рис 6 показаны профили безразмерной нормализованной температуры для различных чисел Рейнольдса. С ростом числа Рейнольдса область с максимальными значениями нормализованной температуры смещается к ребру шнека по ходу закрутки потока, в отличие от малых чисел Рейнольдса, где данное распределение более равномерно распределено по сечению канала. Здесь кривая 1 соответствует распределению нормализованной температуры в области, наиболее близко расположенной к ребру шнека по ходу закрутки ($\eta^2 = -(4\pi/15)$).

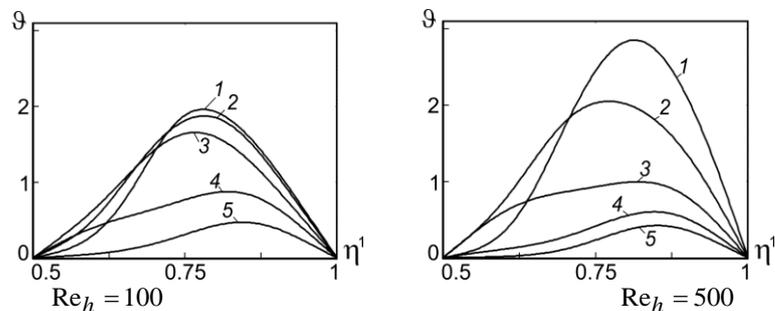


Рис.6. Профили безразмерной нормализованной температуры: обозначения согласно рис.1

Заключение

Разработана математическая модель теплопереноса при ламинарном течении вязкой жидкости в канале с трехзаходной шнековой вставкой, для записи которой использовалась винтовая система координат. Результаты численных исследований показали, что поперечные потоки существенно влияют на процессы теплопереноса в исследуемом канале. Стабилизированное число Нуссельта в канале с трехзаходной шнековой вставкой при $Re_h = 500$ на 154,1% больше соответствующего значения в круглой трубе и на 23,2% больше соответствующего значения в плоской щели. Таким образом, использование трехзаходной шнековой вставки в каналах теплообменного оборудования, использующего в качестве рабочих сред вязкие жидкости, приводит к значительному увеличению интенсивности теплообмена.

Литература

1. Назмеев Ю.Г. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков реологически сложных жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1996. 304с. <http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:19035/Source:default#>.
2. Vachagina E.K., Kadyirov A.I. The use of helical coordinate systems // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2014. Vol. 67, № 4. P.553–566. DOI: 10.1093/qjmam/hbu017 <https://elibrary.ru/item.asp?id=24064796>.
3. Назмеев Ю.Г., Конахина И.А. Исследование процесса интенсификации теплообмена при ламинарном течении вязких жидкостей в трубах с винтовой накаткой // Теплоэнергетика. 1993. №11. С.59–62.
4. Кадыйров А.И., Халитова Г.Р., Вачагина Е.К. Гидродинамическая структура потока вязкой жидкости в каналах с интенсификаторами в виде шнековой вставки // Труды Академэнерго. 2016. №3. С. 7–16. <http://elibrary.ru/item.asp?id=26743777>.
5. Bergles A.E., Jensen M.K., Somerscales E.F.C. and Manglik R.M. Literature Review of Heat Transfer Enhancement Technology for Heat Exchanges in Gas-Fired Applications, Report GRI 91-0146, Gas Research Institute, Chicago. 1991.
6. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах с завихрителями (Аналитический обзор) // ТВТ. 2003. Т. 41, №4. С.587–633. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17294932>.
7. Kadyirov A.I., Abaydullin B.R., Vachagina E.K. Hydrodynamic characteristics of viscous fluid flow in screw channels formed by two ribs // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 980 (2018) 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/980/1/012011.
8. Mulugeta T. Sisay, Shimelis A. Emire, Hosahalli S. Ramaswamy, Tilahun S. Workneh Residence time distribution and flow pattern of reduced-gluten wheat-based formulations in a twine-screw extruder // LWT - Food Science and Technology. 2017. №79. P. 213–222. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.01.015.
9. Shyy Woei Chang, Wei Ling Cai, Ruo Sin Syu. Heat transfer and pressure drop measurements for tubes fitted with twin and four twisted fins on rod // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. № 74. P. 220–234. DOI: 10.1016/j.exptthermflusci.2016.01.001.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1975. 488 с.

Авторы публикации

Конахина Ирина Александровна – д-р техн. наук, заместитель директора комплексного центра обучения в сфере энергоэффективности Казанского (Приволжского) федерального университета. E-mail: agronom_1958@mail.ru

Хуснутдинова Эльвира Мусавировна – аспирант Казанского (Приволжского) федерального университета. E-mail: gr-088@mail.ru.

Кадыйров Айдар Ильдусович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Теплофизика и волновые технологии» Казанского научного центра Российской академии наук. E-mail: aidarik@rambler.ru.

Вачагина Екатерина Константиновна – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизика и волновые технологии» Казанского научного центра Российской академии наук. E-mail: vachaginae@mail.ru.

References

1. Nazmeev Yu.G. Hydrodynamics and heat exchange of swirled flows of rheologically complex media. M. Energoatomizdat, 1996. 304 p. <http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:19035/Source:default#>.
2. Vachagina E.K., Kadyirov A.I. The use of helical coordinate systems // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2014. Vol. 67, № 4. P. 553–566. DOI: 10.1093/qjmam/hbu017 <https://elibrary.ru/item.asp?id=24064796>.
3. Nazmeev Yu.G., Konakhina I.A. Investigation of heat transfer enhancement for laminar viscous flow in pipes with helical rolling // Teploenergretika. 1993. №11. P.59–62.
4. Kadyirov A.I., Khalitova G.R., Vachagina E.K. Hydrodynamic structures of viscous flow in a coaxial channel with screw inserts // Transactions of Academenergo. 2016. №3. P. 7–16. <http://elibrary.ru/item.asp?id=26743777>.
5. Bergles A.E., Jensen M.K., Somerscales E.F.C. and Manglik R.M. Literature Review of Heat Transfer Enhancement Technology for Heat Exchanges in Gas-Fired Applications, Report GRI 91-0146, Gas Research Institute, Chicago. 1991.
6. Mitrofanova O.V. Hydrodynamics and heat transfer in swirling flows in channels with swirlers (analytical review) // High temperature. 2003. Vol. 41, №4. P. 518–559. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13435839>.
7. Kadyirov A.I., Abaydullin B.R., Vachagina E.K. Hydrodynamic characteristics of viscous fluid flow in screw channels formed by two ribs // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 980 (2018) 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/980/1/012011.
8. Mulugeta T. Sisay, Shimelis A. Emire, Hosahalli S. Ramaswamy, Tilahun S. Workneh Residence time distribution and flow pattern of reduced-gluten wheat-based formulations in a twine-screw extruder // LWT - Food Science and Technology. 2017. №79. P. 213–222. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.01.015.
9. Shyy Woei Chang, Wei Ling Cai, Ruo Sin Syu. Heat transfer and pressure drop measurements for tubes fitted with twin and four twisted fins on rod // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. № 74. P. 220–234. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.001.
10. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. Handbook for high schools, 3rd edition, publisher. M., «Enegriya», 1975. P. 488.

Authors of the publication

Irina A. Konakhina – Grand PhD in Engineering sciences Kazan Federal University, Kazan, Russia. E-mail: agronom_1958@mail.ru.

Elvira M. Khusnutdinova – PhD student Kazan Federal University, Kazan, Russia. E-mail: rr-088@mail.ru.

Aidar I. Kadyirov – PhD in Engineering sciences Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia. E-mail: aidarik@rambler.ru.

Ekaterina K. Vachagina – Grand PhD in Engineering sciences, leading researcher Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia. E-mail: vachaginae@mail.ru.

Поступила в редакцию

11 октября 2018 г.