

УДК 532.5:621.694

Хайруллин М.Р. – аспирантE-mail: marat.khairullin@gmail.com**Золотосов Я.Д.** – доктор технических наук, профессорE-mail: zolotonosov@mail.ru**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Сопряженная задача теплообмена при течении степенной жидкости во вращающемся канале «конфузор-диффузор» овального сечения**Аннотация**

В работе рассмотрены особенности реодинамики и теплообмена при течении аномально-вязкой жидкости во вращающемся канале «конфузор-диффузор» овального сечения аппарата типа «труба в трубе». Построена математическая модель сопряженной задачи теплообмена на базе полных уравнений движения, энергии, неразрывности и теплопроводности стенок канала с учетом начальных распределений скорости, давления, температуры на входе в канал и на выходе из него, и граничных условий на стенках канала.

Ключевые слова: реодинамика, сопряженная задача теплообмена, аномально-вязкая жидкость, канал овального сечения.

Вопросам исследования течения вязкой жидкости (ньютоновских сред) жидкости во вращающихся круглых каналах посвящено значительное число работ [1]. Однако в настоящее время в литературе отсутствуют работы, касающиеся исследования процесса течения аномально-вязкой жидкости во вращающихся вокруг своей оси каналах типа «конфузор-диффузор» овального сечения, позволяющих обеспечивать интенсивные процессы теплообмена.

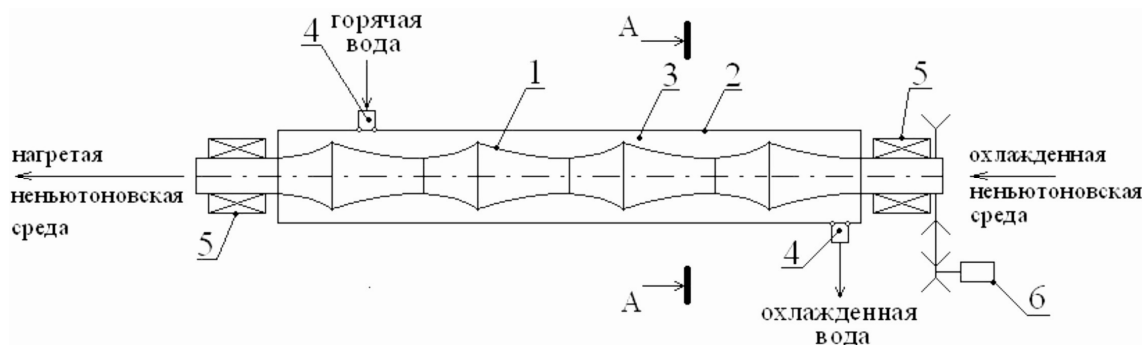


Рис. 1. Аппарат для проведения процесса теплообмена:

- 1 – вращающийся канал; 2 – неподвижный канал; 3 – межтрубное пространство; 4 – патрубки; 5 – подшипники; 6 – электродвигатель

В качестве модельной среды нами рассмотрены водные растворы карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), кривые течения которых хорошо описываются в широком диапазоне изменения температур «степенным» законом Освальда-де-Вилла $\phi = k\tau^n$, реологические константы и теплофизические характеристики которых представлены в таблице 1 [2, 3].

Структура потока при течении аномально-вязкой среды в круглой трубе, вращающейся вокруг своей оси, имеет ряд специфических особенностей. После входа среды во вращающуюся трубу стенки сообщают закрутку только периферийным частицам среды. Но в связи с высокой консистенцией вращательное движение быстро распространяется на частицы, расположенные ближе к оси. И на незначительном удалении от входа весь поток вращается вместе с трубой по закону твердого тела. В этом случае циркуляция жидкости в

поперечном сечении круглой трубы «подавляется», а процесс теплообмена от стенки к жидкости и далее в ядро потока осуществляется в основном теплопроводностью.

Таблица 1

Реологические константы и теплофизические характеристики раствора КМЦ

Концентрация Na-КМЦ, % масс.	T, К	n	k, Па·с	Ср, Дж/кг·К	λ, Вт/м·К	$\alpha \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$
4	293	4,66	4,42	4082,13	0,461	1,115
	313	0,510	2,63	4090,08	0,511	1,242
	333	5,54	1,77	4081,76	0,522	1,276
	353	0,601	1,19	4111,44	0,415	1,017
8	293	0,344	3,244	3916,33	0,456	1,086
	313	0,364	2,829	3935,59	0,493	1,180
	333	0,384	2,379	3945,22	0,474	1,149
	353	0,404	1,423	3969,51	0,336	0,820
11	293	0,335	8,316	3840,27	0,486	1,134
	313	0,354	5,374	3858,55	0,527	1,232
	333	0,374	5,291	3874,05	0,515	1,209
	353	0,394	5,009	3900,84	0,378	0,892
15	293	0,325	38,367	3775,24	0,496	1,134
	313	0,344	26,971	3784,87	0,531	1,232
	333	0,364	17,118	3792,82	0,539	1,209
	353	0,384	14,854	3814,59	0,380	0,892
25	293	0,213	96,352	3709,09	0,505	1,085
	313	0,231	46,719	3722,07	0,544	1,175
	333	0,268	40,81	3735,46	0,522	1,134
	353	0,287	27,226	3776,49	0,368	0,800

В связи с этим для интенсификации процесса теплообмена в канале нами предложено проточную часть конфузorno-диффузорной трубы выполнить в форме овала (рис. 2) [4], что при вращении создает градиент центробежного давления на осях овала, поддерживая вихревую структуру течения и интенсифицируя теплообмен.

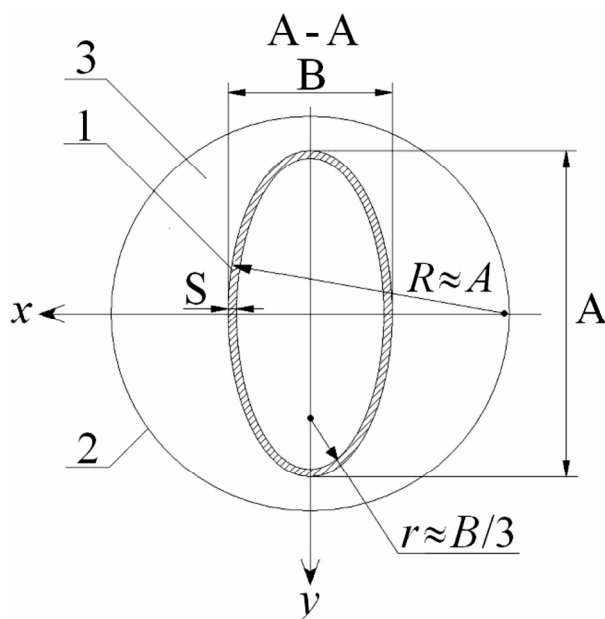


Рис. 2. Радиальное сечение трубы:

1 – вращающийся канал; 2 – неподвижный канал; 3 – межтрубное пространство

Для сравнения рассмотрим геометрические размеры труб овального сечения (рис. 2), представленные в таблице 2 [3]:

Функцию, определяющую овальный профиль сечения трубы, с большой осью A , малой осью B , можно представить в виде геометрического места точек 4 дуг окружностей с центрами в точках $(0; A-B/2)$, $(0; B/2-A)$, $(x_B; 0)$, $(-x_B; 0)$ и радиусами A , A , $A/2-x_B$, $A/2-x_B$ соответственно:

$$F_{\text{сnp}}(x) = \begin{cases} \pm \left(\sqrt{A^2 - x^2} - (A - B/2) \right), & |x| < x_{\text{сnp}} \\ \pm \sqrt{(A/2 - x_B)^2 - (x + x_B)^2}, & x \leq -x_{\text{сnp}} \\ \pm \sqrt{(A/2 - x_B)^2 - (x - x_B)^2}, & x \geq x_{\text{сnp}} \end{cases} \quad (1)$$

где $x_{\text{сnp}}$ ($x_{\text{сnp}} > 0$) – точка сопряжения кривых y_A и y_B ; x_B ($x_B > 0$) – абсцисса центра дуги окружности y_B .

Таблица 2

Размеры труб и справочные величины

Размеры, мм [5]		Расчетные коэффициенты уравнения (2), мм		Площадь сечения, см ²	
A	B	K ₁	K ₂	Справочные значения	Расчетные значения
6	3	2.1060	0.9813	0,1453	0,1454
8	4	1.1846	0.9813	0,2583	0,2585
10	5	0.7582	0.9813	0,4035	0,4040
12	4	-0.6638	0.9966	0,3540	0,3532
	6	0.5265	0.9813	0,5811	0,5817
14	7	0.3868	0.9813	0,7909	0,7918
15	5	-0.4248	0.9966	0.5532	0.5519
18	6	-0.2950	0.9966	0.7965	0.7947
	8	0.1474	0.9798	1.1412	1.1418
	9	0.2340	0.9813	1.3074	1.3088

Неизвестные $x_{\text{сnp}}$ и x_B находим, как решения системы уравнений:

$$\begin{cases} y_A(x_{\text{сnp}}) = y_B(x_{\text{сnp}}), \\ (y_A)'_x \Big|_{x_{\text{сnp}}} = (y_B)'_x \Big|_{x_{\text{сnp}}}, \end{cases}$$

где $y_A = \sqrt{A^2 - x^2} - (A - B/2)$, $y_B = \sqrt{(A/2 - x_B)^2 - (x - x_B)^2}$.

Выведем математическое выражения для уравнения овала, как уравнение эллипса, с корректирующим коэффициентом в виде многочлена $K_1x^2+K_2$, где K_1 и K_2 – коэффициенты, характеризующие сжатие и вытягивание овала:

$$F_{pac}(x) = \pm(K_1x^2 + K_2)\sqrt{(B/2)^2 - (B/A)^2x^2}. \tag{2}$$

Ввиду симметричности формы овала (рис. 2), достаточно рассмотреть отрезок $[0; A/2]$ для нахождения неизвестных коэффициентов K_1 и K_2 . Зададим сетку разбиения отрезка $[0; A/2]$ с шагом $h=A/(2(n-1))$:

$$x_i = \frac{A(i-1)}{2(n-1)}, \tag{3}$$

где n – число точек разбиения отрезка.

Последовательно подставляя точки $(x_i; F_{cnp}(x_i))$ в уравнение (2), получим систему уравнений для нахождения неизвестных коэффициентов K_1 и K_2 :

$$\begin{cases} K_1x_1^2 + K_2 = \frac{F_{cnp}(x_1)}{G(x_1)}; \\ \mathbf{KK} \\ K_1x_i^2 + K_2 = \frac{F_{cnp}(x_i)}{G(x_i)}; \\ \mathbf{KK} \\ K_1x_n^2 + K_2 = \frac{F_{cnp}(x_n)}{G(x_n)}, \end{cases} \tag{4}$$

где $G(x) = \sqrt{(B/2)^2 + (B/A)^2x^2}$.

При $n=2$ коэффициенты определяются единственным образом. При $n>2$ система (4) становится переопределенной, и ее решение находится методом наименьших квадратов.

Используя справочные значения из таблицы 2, в общем каноническом виде уравнение осевого сечения трубы (рис. 3) можно записать следующим образом:

$$\frac{x^2}{\bar{A}^2} + \frac{y^2}{\bar{B}^2} = 1, \tag{5}$$

где $\bar{A}=A/2$; $\bar{B}=B/2 \cdot (K_1x^2 + K_2)$; $K_2 \neq 0$.

В частном случае, при $K_1=0$ и $K_2=1$, уравнение (5) становится уравнением эллипса с большой осью A и малой – B .

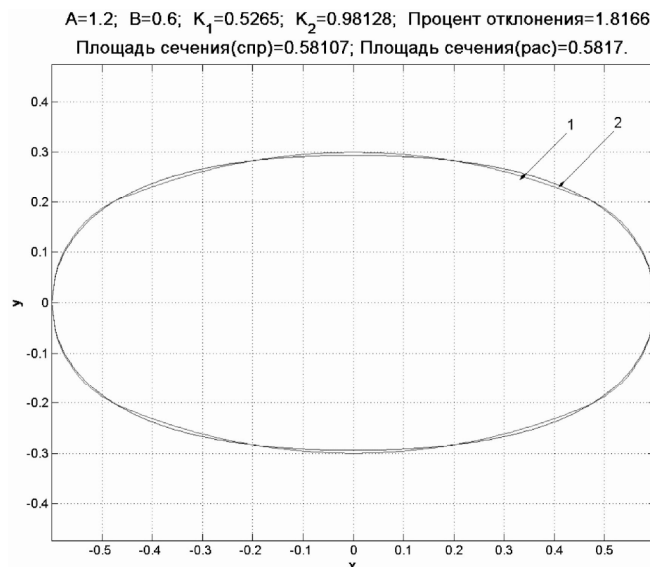


Рис. 3. Графики функций: 1 – $F_{pac}(x)$, 2 – $F_{cnp}(x)$

Из данных таблицы 2 и рис. 3 следует, что расчетные значения, полученные из уравнения (2), имеют максимальный процент отклонения от справочных значений менее 2 %, а уравнение (5) является математическим описанием овала с допустимой погрешностью менее 2 %.

Развитие течения степенной жидкости во вращающейся трубе овального сечения будем рассматривать в цилиндрической системе координат (r, φ, z) , где нулевое значение радиальной координаты совпадает с осью трубы, координаты z – с входным сечением, а угловой координаты φ – с радиальным сечением трубы. Тогда уравнения движения, неразрывности и теплопроводности для течения аномально-вязкой жидкости в трубе запишутся в виде [6-9].

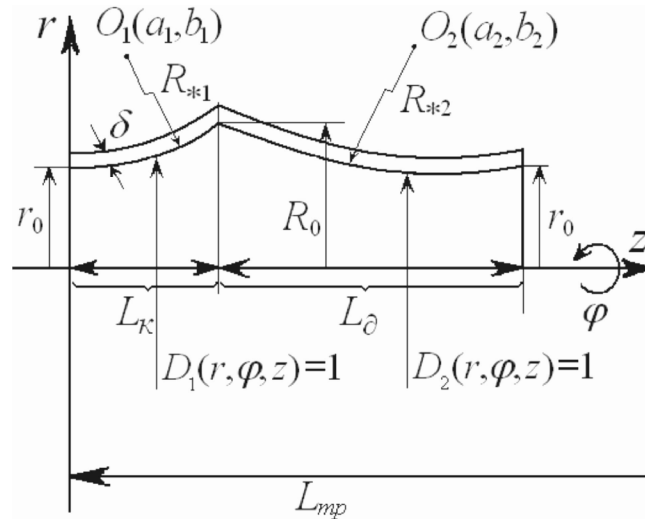


Рис. 4. Фрагмент системы диффузор-конфузор в цилиндрической системе координат

$$\left\{ \begin{aligned}
 &V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_j^2}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{k}{r} \left[A^{n-1} \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} \right) + 2 \frac{\partial V_r}{\partial r} \cdot \frac{\partial A^{n-1}}{\partial r} + \right. \\
 &\left. + \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \cdot \frac{\partial A^{n-1}}{\partial z} \right]; \\
 &V_r \frac{\partial V_j}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_j}{\partial z} - \frac{V_r V_j}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial j} + \frac{k}{r} \left[A^{n-1} \left(\frac{\partial^2 V_j}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_j}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_j}{\partial r} - \frac{V_j}{r^2} \right) + \right. \\
 &\left. + \left(\frac{\partial V_j}{\partial r} - \frac{V_j}{r} \right) \cdot \frac{\partial A^{n-1}}{\partial r} + \frac{\partial V_j}{\partial z} \cdot \frac{\partial A^{n-1}}{\partial z} \right]; \\
 &V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{V_j^2}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{k}{r} \left[A^{n-1} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + 2 \frac{\partial V_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial A^{n-1}}{\partial z} + \right. \\
 &\left. + \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \cdot \frac{\partial A^{n-1}}{\partial r} \right]; \\
 &\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \\
 &V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{rc} A^{n+1}; \\
 &\frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_c}{\partial r} = 0;
 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Условия однозначности системы (6) заданы начальным распределением скорости, давления, температуры на входе в канал и на выходе из него, и граничными условиями на стенках канала.

• Условия на входе в канал $z=0$:

для скорости: $V_r=0$; $V_{\varphi}=0$; $V_z=u_0$; для температуры жидкости $T=T_0$; для температуры стенки $T_c=T_0$;

• Условия на выходе из канала $z=L_{mp}$:

для скорости: $V_r=0$; $V_j=0$; $V_z=u_m \frac{(3n+1)}{(n+1)}(1-x^2-h^2)$, где $x=\frac{r \cos j}{\bar{A}}$, $h=\frac{r \sin j}{\bar{B}}$,

$\bar{B}=B/2 \cdot (K_1(r \cos j)^2 + K_2)$, $\bar{A}=A/2$, $u_m=\frac{Q}{S_{сеч}}$; для температуры жидкости $\frac{\partial T}{\partial z}=0$;

для температуры стенки $\frac{\partial T_c}{\partial z}=0$.

• Граничные условия при $0 < z < L_{mp}$:

– Условие на границе жидкости и внутренней стенки $D_i(r, j, z) = 1$:

Для скорости: $V_r=0$; $V_j=wr$; $V_z=0$;

Для температуры четвертого рода: $T=T_c$; $l \frac{\partial T}{\partial r} = l_c \frac{\partial T_c}{\partial r}$

– Условие на границе внешней стенки и жидкости третьего рода $D_i(r, j, z) = 1 (A := A + 2d; B := B + 2d; i = 1, 2)$:

$$l_c \frac{\partial T_c}{\partial r} = a_{ж} (T_{ж} - T_c),$$

где $D_i(r, j, z) := \left(\frac{r \cos j}{R_i(z)} \right)^2 + \left(\frac{r \sin j}{B/A \cdot R_i(z) (K_1 r^2 \cos^2 j + K_2)} \right)^2 = 1$ – уравнение боковой

поверхности трубы (рис. 2), $R_i(z) = -\sqrt{R_{*i}^2 - (z - a_i)^2} + b_i$, R_{*i} – радиус дуги окружности, (a_i, b_i) – координаты центра дуги окружности, по которой построен профиль твердой стенки канала, $i = 1$ – для диффузора, $i = 2$ – для конфузора; u_0 – начальная скорость; p_0 – начальное давление; ω – угловая скорость вращения трубы; V_r, V_{φ}, V_z – радиальная, окружная, осевая составляющие скорости; a – коэффициент температуропроводности среды, T – температура жидкости; T_c – температура стенки канала; c – удельная теплоемкость; T_B – температура горячей воды; ρ – плотность среды; k – характеристика консистенности среды; n – индекс течения, A – интенсивность скоростей деформации:

$$A = \left[2 \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_j}{\partial r} - \frac{v_j}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_j}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Решение системы (6) будем искать в виде:

$$\begin{aligned} v_r &= u_0 f(r, j, z); & v_j &= wr G(r, j, z); & V_z &= u_0 H(r, j, z); \\ p &= \rho u_0^2 P(r, j, z) + p_0; & t &= T_0 \cdot T(r, j, z); & q &= T_0 \cdot T_c(r, j, z); \end{aligned} \quad (8)$$

Введем в уравнения движения, энергии и теплопроводности стенок канала безразмерные переменные и параметры:

$$\bar{z} = z/L_{mp}; \quad \bar{r} = r/R_0; \quad \bar{R} = R_0/L_{mp}; \quad \bar{\rho} = d_3/R_0; \quad \bar{u} = \frac{u_m}{u_0}; \quad \bar{A} = \frac{\bar{A}}{R_0}; \quad \bar{B} = \frac{\bar{B}}{R_0}; \quad (9)$$

где L_{mp} – длина трубы; R_0 – входной радиус конфузора; d_3 – эквивалентный диаметр трубы.

Тогда краевая задача для безразмерных составляющих скорости, давления, температуры среды и стенок канала примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & f \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} + \bar{R} H \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} - \left(\frac{N}{\bar{R}^0} \right)^2 \bar{r} G^2 + \frac{N}{\bar{R}^0} G \frac{\partial f}{\partial j} = - \frac{\partial P}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{R}^0}{\text{Re}} \left[\bar{A}_0^{n-1} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial \bar{r}^2} + \bar{R}^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \bar{z}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} - \frac{f}{\bar{r}^2} \right) + \right. \\ & \left. + 2 \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} \frac{\partial \bar{A}_0^{n-1}}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial \bar{A}_0^{n-1}}{\partial \bar{z}} \left(\frac{\partial H}{\partial \bar{r}} + \bar{R} \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} \right) \right]; \\ & f \left(2G + \bar{r} \frac{\partial G}{\partial \bar{r}} \right) + \bar{r} \bar{R} H \frac{\partial G}{\partial \bar{z}} = - \frac{1}{\bar{r}} \frac{\bar{R}^0}{N} \frac{\partial P}{\partial j} + \frac{\bar{R}^0}{\text{Re}} \left[\bar{A}_0^{n-1} \left(3 \frac{\partial G}{\partial \bar{r}} + \bar{r} \frac{\partial^2 G}{\partial \bar{r}^2} + \bar{r} \bar{R} \frac{\partial^2 G}{\partial \bar{z}^2} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial \bar{A}_0^{n-1}}{\partial \bar{r}} \frac{\partial G}{\partial \bar{r}} + \bar{r} \bar{R} \frac{\partial \bar{A}_0^{n-1}}{\partial \bar{z}} \frac{\partial G}{\partial \bar{z}} \right]; \\ & \frac{\partial f}{\partial \bar{r}} + \frac{f}{\bar{r}} + \bar{R} \frac{\partial H}{\partial \bar{z}} = 0; \\ & f \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} + \bar{R} H \frac{\partial t}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \bar{z}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 t}{\partial \bar{r}^2} \right) + \frac{\bar{R}^0 \bar{T}}{\text{Re}} \bar{A}_0^{n+1}; \\ & \frac{\partial^2 q}{\partial \bar{r}^2} + \bar{R}^2 \frac{\partial^2 q}{\partial \bar{z}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial q}{\partial \bar{r}} = 0, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} \bar{z} = 0: & \quad f = 0; \quad G = 0; \quad H = 1; \quad t = 1; \quad q = 1; \\ \bar{z} = 1: & \quad f = 0; \quad G = 0; \quad H = \bar{u} \frac{(3n+1)}{(n+1)} (1 - \bar{x}^2 - \bar{h}^2), \\ & \quad \text{где } \bar{x} = \frac{\bar{r} \cos j}{\bar{R}^0}, \quad \bar{h} = \frac{\bar{r} \sin j}{\bar{B}^0}; \quad \frac{\partial t}{\partial \bar{z}} = 0; \quad \frac{\partial q}{\partial \bar{z}} = 1; \\ 0 < \bar{z} < 1: & \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{g} \quad D_i(R_0 \bar{r}, j, L_{mp} \bar{z}) = 1: & \quad f = 0; \quad G = 1; \quad H = 0; \quad t = q; \quad I \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} = I_c \frac{\partial q}{\partial \bar{r}}; \\ \mathbf{g} \quad D_i(R_0 \bar{r}, j, L_{mp} \bar{z}) = 1 \quad (A = A + 2d; \quad B = B + 2d; \quad i = 1, 2): & \quad \frac{\partial q}{\partial \bar{r}} = -Bi(q_{жс} - q_c), \end{aligned}$$

где

$$\bar{A}_0^{n-1} = \left[2 \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{r}} \right)^2 + 2 \left(\frac{f}{\bar{r}} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial H}{\partial \bar{r}} \right)^2 + \left(\frac{N}{\bar{R}^0} \frac{\partial G}{\partial \bar{z}} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \bar{r}} + \bar{R} \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} \right)^2 \right]^{(n-1)/2};$$

$$\text{Re} = \frac{r u_0^{2-n} d^n}{k} \quad - \quad \text{число Рейнольдса}; \quad N = \frac{w d_2}{u_0} \quad - \quad \text{число закрутки};$$

$$Pe = \frac{u_0 R_0}{a} \quad - \quad \text{число Пекле}; \quad Bi = \frac{a R_0}{I_c} \quad - \quad \text{число Био}.$$

Заключение

Разработана сопряженная задача теплообмена при течении аномально-вязкой жидкости типа Освальда-де-Вилля во вращающемся канале «конфузор-диффузор» овального сечения.

Численная реализация полученной математической модели позволит определить поле скоростей, давления и температур при течении неньютоновских сред в каналах конфузорно-диффузорного типа и уточнить методику инженерного расчета теплообменного оборудования для нагрева сред с широкими реологическими свойствами.

Список обозначений

A – интенсивность скоростей деформации; a – коэффициент температуропроводности, м^2 ; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; δ – толщина стенки канала, м; k – характеристика консистенции среды, $\text{Па}\cdot\text{с}$; L_{mp} – общая длина канала типа «конфузор-диффузор», м; L_k – длина элемента типа конфузор, м; L_o – длина элемента типа диффузор, м; R_{*i} – радиус дуги окружности диффузора ($i=1$), конфузора ($i=2$), м; r_o , R_o – наименьший и наибольший радиусы канала типа «конфузор-диффузор», м; d_3 – эквивалентный диаметр трубы, м; N – число закрутки; n – индекс течения; p – статистическое давление, Па; Pe – число Пекле; Re – критерий Рейнольдса; T – температура нагреваемой среды, К; T_c – температура стенки канала, К; $T_{ж}$ – температура жидкости, К; V_r , V_y , V_z – радиальная, окружная, осевая составляющие скорости течения, м/с; $b_{жс}$ – коэффициент теплоотдачи жидкости, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; l – коэффициент теплопроводности среды, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; l_c – коэффициент теплопроводности стенки, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; ω – угловая скорость вращения, с^{-1} .

Список литературы

1. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. – М.: Машиностроение, 1970. – 240 с.
2. Бахаева Т.Н., Золотонос А.Я. Экспериментальные исследования температуропроводности водных растворов карбоксиметилцеллюлозы // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2008, № 3-4. – С. 131-133.
3. Бахаева Т.Н., Золотонос Я.Д., Золотонос А.Я. Экспериментальные исследования реологических свойств карбоксиметилцеллюлозы методом ротационной вискозиметрии // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2006, № 7-8. – С. 111-114.
4. Золотонос А.Я. Патент на полезную модель РФ №90887 МПК F28D 7/00; 11/04 Аппарат для проведения процесса теплообмена №2009138855/22; заявл. 20.10.09; опубл. 10.03.10. Бюл. № 7.
5. Явнилович Е.А. Трубы стальные, чугунные и баллоны. – М.: Металлургия, 1966. – 371 с.
6. Золотонос Я.Д. // Известия вузов. Химия и химическая технология, 2002, т. 45, вып. 5. – С. 3-16.
7. Шульман З.П., Зальцгендлер Э.А., Глеб В.К. Сопряженная задача конвективного теплопереноса в рекуперативных теплообменниках с неньютоновским теплоносителем // Сборник «Теплообмен», 1978. – С. 464-475.
8. Миддлман С. Течение полимеров. – М.: Мир, 1971. – 259 с.
9. Смольский Б.М., Шульман З.П., Гориславич В.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов. – Минск: Наука и техника, 1972.

Khairullin M.R. – post-graduate student

E-mail: marat.khairullin@gmail.com

Zolotonosov Ya.D. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaiya st., 1

**Conjugate heat transfer problem in the flow of power-law fluid
in the rotating «confuser-diffuser» channel with oval section**

Resume

In this work we considered features of the reodynamics in the flow of abnormal-viscous fluid in the rotating «confuser-diffuser» channel with oval section of the apparatus of the type

«pipe in pipe». On the basis of the complete equations of motion, continuity, energy and thermal conductivity of the channel walls was built mathematical model of conjugate heat transfer problem with the initial distributions of velocity, pressure, temperature at the channel entrance and exit, and the boundary conditions on the channel walls. The subsequent development of a mathematical model of conjugate heat transfer in rotating confuser-diffuser channels oval cross section and its numerical implementation will determine the values of velocities and pressures in the flow part of the channel. Also it will be possible to outline the main directions in the development of engineering methods for calculating heat transfer equipment for the heating of non-Newtonian environment.

Keywords: reodynamics, conjugate heat transfer problem, abnormal-viscous fluid, channel with oval section.

References

1. Shchukin. Heat transfer and hydrodynamics of internal flows in the field of mass forces. – M: Mechanical Engineering, 1970. – 240 p.
2. Bahaeva T.N., Zolotonosov A.Ya. Experimental studies of thermal diffusivity of aqueous solutions of carboxymethyl cellulose // News of high schools. Problems of energy, 2008, № 3-4. – P. 131-133.
3. Bahaeva T.N., Zolotonosov Ya.D., Zolotonosov A.Ya. Experimental studies of the rheological properties of carboxymethyl cellulose by rotational viscometry // News of high schools. Problems of energy, 2006. № 7-8. – P. 111-114.
4. Zolotonosov A.Ya. Patent for useful model RF №90887 MPK F28D 7/00; 11/04 Apparatus for leading heat transfer process №2009138855/22; declar.20.10.09; publish. 10.03.10. Bul. № 7.
5. Yavnilovich E. Steel pipes, iron and cylinders. – M.: Metallurgy, 1966. – 371 p.
6. Zolotonosov Ya.D. // News of high schools. Chemistry and chemical technology, 2002, v. 45, iss. 5. – P. 3-16.
7. Shulman Z.P., Zaltsgendler E.A., Gleb V.K. The conjugate problem of convective heat transfer in a recuperative heat exchangers with Newtonian heat-transfer agent // Collection of heat transfer, 1978. – P. 464-475.
8. Midlman C. The flow of polymers. – M.: Mir, 1971. – 259 p.
9. Smolsky B.M., Shulman Z.P., Gorislavich V.M. Reodynamics and heat transfer of non-linear viscoplastic materials. – Minsk: Science and technology, 1972.