УДК 532.5:621.694

О.А. Басова, А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов

Казанский государственный энергетический университет, Россия

СОПРЯЖЕННАЯ ЗАДАЧА ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ ТИПА «КОНФУЗОР-ДИФФУЗОР»

АННОТАЦИЯ

Предложена математическая модель сопряженной задачи конвективного теплообмена течения вязкой жидкости во вращающемся криволинейном канале типа “конфузор-диффузор”.

1. ВВЕДЕНИЕ

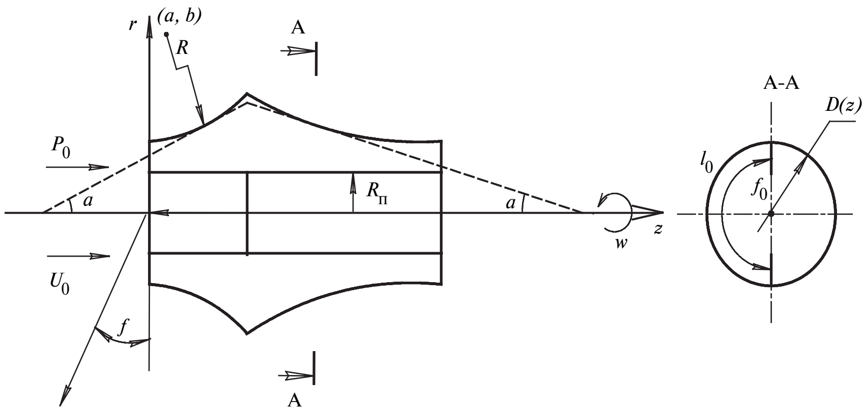
Важнейшей задачей современной теплоэнергетики является создание малогабаритной аппаратуры большой единичной мощности с интенсивными процессами теплопереноса. В связи с этим проблема интенсификации конвективного теплообмена является одной из актуальнейших. На сегодняшний день накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал по методам интенсификации конвективного теплообмена, однако, и по настоящее время остались недостаточно разработанными вопросы, касающиеся эффективных методов интенсификации теплообмена при ламинарных режимах течения, например методов, основанных на применении вращающихся осесимметричных каналов типа «конфузор-диффузор».

Известно, что при течении вязкой жидкости в неподвижных каналах типа «конфузор-диффузор» число Нуссельта увеличивается в 1,5 раза, а во вращающихся цилиндрических каналах при ламинарном режиме течения может возрасти в 3…5 раз. Кроме того, в центробежных аппаратах с вращающимся каналом типа «конфузор-диффузор» в условиях движения насыщенного водяного пара на внешней стенке может быть обеспечен непрерывный сброс пленки конденсата с поверхности вращающейся трубы, что способствует уменьшению термического сопротивления внешней теплоотдачи в 3…10 раз.

Ранее в работах [1, 2] были исследованы гидродинамика и теплообмен во вращающейся трубе типа «конфузор-диффузор». Было установлено, что тепловая эффективность во вращающихся волнистых трубах возрастает в 1,9, а теплогидродинамическая — в 1,17 раза по отношению к вращающимся гладким трубам.

С целью дальнейшего увеличения эффективности теплообмена нами предлагается выполнить контур конфузорно-диффузорных элементов вращающейся трубы в виде криволинейных каналов, очерченных по дуге окружности [3].

Расчеты показали, что каналы, очерченные по дуге окружности, позволяют увеличить поверхность теплообмена в среднем на 30% по сравнению с конфузорно-диффузорными элементами с прямыми стенками [2], что указывает на перспективность применения таких каналов в современной теплообменной аппаратуре гравитационного [4] и центробежного типов [1, 2].



Фрагмент криволинейного элемента типа «конфузор-диффузор»

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИКИ И КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Рассмотрим математическую модель ламинарного течения вязкой жидкости во вращающемся криволинейном конфузорно-диффузорном канале с оребренной проточной частью.

Учитывая геометрию объекта, течение вязкой жидкости во вращающейся волнистой трубе рассматриваем в цилиндрической системе координат (r, φ, z), где нулевое значение радиальной координаты r совпадает с осью трубы, координаты — z — с входным сечением, а угловой координаты φ — с вертикальным сечением трубы. Тогда уравнения движения, неразрывности, энергии, теплопроводности и передачи тепла через ребра с учетом центробежной силы запишутся в виде [5, 6]:

$$\begin{cases} v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{v_\varphi}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \varphi}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}-\frac{v_\varphi^2}{r}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r}+\nu\left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}-\frac{v_r}{r^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi}\right)+\omega^2 r;\\ v_r\frac{\partial v_\varphi}{\partial r}+\frac{v_\varphi}{r}\frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi}+v_z\frac{\partial v_\varphi}{\partial z}+\frac{v_r v_\varphi}{r}=-\frac{1}{\rho r}\frac{\partial p}{\partial \varphi}+\nu\left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial v_\varphi}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2}+\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_r}{\partial \varphi}-\frac{v_\varphi}{r^2}\right);\\ v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+\frac{v_\varphi}{r}\frac{\partial v_z}{\partial \varphi}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial v_z}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right);\\ \frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{\partial v_z}{\partial z}+\frac{v_r}{r}+\frac{1}{r}\frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi}=0;\\ v_r\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{v_\varphi}{r}\frac{\partial T}{\partial \varphi}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right);\\ \frac{\partial^2 T_\text{с}}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T_\text{с}}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T_\text{с}}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 T_\text{с}}{\partial z^2}=0;\\ \frac{d^2 T_\text{р}}{dr^2}-\frac{2\alpha L}{\lambda\delta l}(T-T_\text{р})=0 \end{cases} \tag{1}$$

с граничными условиями:

$z=0: v_z=u_0; v_r=0; v_\varphi=0; p=p_0; T=T_0;$

$\frac{\partial p}{\partial z}=0; \frac{\partial v_r}{\partial z}=0; \frac{\partial v_\varphi}{\partial z}=0; \frac{\partial T}{\partial z}=0; \frac{\partial T_c}{\partial z}=0;$

$z=L:\ \frac{\partial \text{T}_\text{с}}{\partial z}=0;$

$r=0:\ v_r=0;\ v_\varphi=0; \frac{\partial p}{\partial r}=0; \frac{\partial v_z}{\partial r}=0; \frac{\partial T}{\partial r}=0;$

$r=R(z):\ v_z=0;\ v_r=0;\ v_\varphi=\omega R(z);$

$T=T_\text{с};\ \lambda_\text{ж}\frac{\partial T}{\partial r}=\lambda_\text{с}\frac{\partial T_\text{с}}{\partial r};$

$-\lambda\frac{\partial \text{T}_\text{р}}{\partial r}=\alpha(T-T_\text{р});$

$r=R_\text{р}:\quad v_z=0;\ v_r=0;\ v_\varphi=\omega R_\text{р};$

$-\lambda\frac{\partial \text{T}_\text{р}}{\partial r}=\alpha(T-T_\text{р});$

$r=R(z)+h:\ \lambda_c\frac{\partial T_c}{\partial r}=-\alpha(T_\text{с}-T_\text{п});$

$\varphi_0/2=\pi/2:\ v_z=0; v_r=0; v_\varphi=\omega R_\text{р};$

$\varphi_0/2=-\pi/2:\ v_z=0; v_r=0; v_\varphi=\omega R_\text{р},$

где $R(z)=-\sqrt{R^2-(z-a)^2}+b$ — текущий радиус трубы; (a, b) — координаты центра окружности, δ — толщина ребра, $l=\int_{z_1}^{z_2}\frac{R}{\sqrt{R^2-(z-a)^2}}dz$ — длина дуги $R(z)$.

Решение системы (1) будем искать в виде [1,2]:

$v_r=u_0 f(z,r,\varphi)$, $v_\varphi=\omega r G(z,r,\varphi)$,

$v_z=u_0 H(z,r,\varphi)$,

$p=\rho u_0^2 F(z,r,\varphi)+p_0$, $T=T_0 t(z,r,\varphi)$,

$T_\text{с}=T_0\theta(z,r,\varphi)$, $T_\text{р}=T_0\vartheta(z,r,\varphi)$.

Отобразим физическую область течения с криволинейными границами в прямоугольную, используя преобразование координат. Для этого введем замену переменных в уравнениях движения, неразрывности, энергии и теплопроводности:

$\overline{R}=R(z)/L;\ \tilde{R}=d_э/R(z);\ \overline{r}=r/R(z);\ \tilde{r}=r/R_\text{р};$

$\overline{z}=z/L;\ \overline{a}=a/L;\ \overline{b}=b/L;\ \overline{c}=R/L;\ \overline{H}=h/R(z);$

$\overline{\varphi}=(l_1R(z))/(l_0 r);\ \varphi_0=l_0/R(z);\ \varphi=l_1/r;$

$\overline{l}=l_1/l_0;\ \overline{\delta}=\text{R(z)}/\delta;\ \tilde{z}=z/l; K_\lambda=\lambda_\text{с}/\lambda_\text{ж}; \theta_\text{п}=T_\text{п}/T_0,$

где l_0 — длина дуги, соответствующая углу φ_0, l_1 —длина дуги, соответствующая углу φ, $\mathrm{Re}=u_0 d_э/\nu$ — число Рейнольдса, $N=\omega r/u_0$ — число закрутки, $\mathrm{Pe}=u_0 d_э/a$ — число Пекле, $\mathrm{Bi}=\alpha d_э/\lambda$ — число Био.

Тогда краевая задача для безразмерных составляющих скорости, давлений и температур будет иметь вид:

$$f\frac{\partial f}{\partial \bar r}+\frac{NG}{\bar r\varphi_0}\frac{\partial f}{\partial\varphi}-H\left(\frac{\bar r(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial f}{\partial\bar r}-\bar R\frac{\partial f}{\partial\bar z}-\frac{\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial f}{\partial\varphi}\right)-\frac{N^2G^2}{\bar r}=-\frac{\partial F}{\partial\bar r}+\frac{\tilde R}{\mathrm{Re}}(\frac{\partial^2 f}{\partial\bar r^2}+\frac{1}{\bar r}\frac{\partial f}{\partial\bar r}+$$

$$+\frac{1}{\bar r^2\varphi_0^2}\frac{\partial^2 f}{\partial\varphi^2}+\frac{\bar r^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2 f}{\partial\bar r^2}+\bar R^2\frac{\partial^2 f}{\partial\bar z^2}+\frac{\bar l^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar r^2(\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2)}\frac{\partial^2 f}{\partial\varphi^2}-\frac{2\bar r\bar R(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2 f}{\partial\bar r\partial\bar z}-$$

$$-\frac{2\bar l(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2 f}{\partial\bar r\partial\varphi}+\frac{2\bar R\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2 f}{\partial\varphi\partial\bar z}-\frac{f}{\bar r^2}-\frac{2N}{\bar r^2\varphi_0}\frac{\partial G}{\partial\varphi})+\frac{N^2}{\bar r};$$

$$f\frac{\partial G}{\partial \bar r}+\frac{NG}{\bar r\varphi_0}\frac{\partial G}{\partial\varphi}-H\left(\frac{\bar r(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial G}{\partial\bar r}-\bar R\frac{\partial G}{\partial\bar z}-\frac{\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial G}{\partial\varphi}\right)+\frac{FG}{\bar r}=$$

$$=-\frac{1}{N\bar r\varphi_0}\frac{\partial F}{\partial\varphi}+\frac{\tilde R}{\mathrm{Re}}(\frac{\partial^2 G}{\partial\bar r^2}+\frac{1}{\bar r}\frac{\partial G}{\partial\bar r}+\frac{1}{\bar r^2\varphi_0^2}\frac{\partial^2 G}{\partial\varphi^2}+\frac{\bar r^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2 G}{\partial\bar r^2}+\bar R^2\frac{\partial^2 G}{\partial\bar z^2}+$$

$$+\frac{\bar l^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar r^2(\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2)}\frac{\partial^2 G}{\partial\varphi^2}-\frac{2\bar r\bar R(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2 G}{\partial\bar r\partial\bar z}-\frac{2\bar l(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2 G}{\partial\bar r\partial\varphi}+$$

$$+\frac{2\bar R\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2 G}{\partial\varphi\partial\bar z}-\frac{G}{\bar r^2})+\frac{2\tilde R}{N\,\mathrm{Re}\,\bar r^2\varphi_0}\frac{\partial f}{\partial\varphi};$$

$$f\frac{\partial H}{\partial \bar r}+\frac{NG}{\bar r\varphi_0}\frac{\partial H}{\partial\varphi}-H\left(\frac{\bar r(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial H}{\partial\bar r}-\bar R\frac{\partial H}{\partial\bar z}-\frac{\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial H}{\partial\varphi}\right)=\frac{\bar r(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial F}{\partial\bar r}-$$

$$-\bar R\frac{\partial F}{\partial\bar z}-\frac{\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial F}{\partial\varphi}+\frac{\tilde R}{\mathrm{Re}}(\frac{\partial^2 H}{\partial\bar r^2}+\frac{1}{\bar r}\frac{\partial H}{\partial\bar r}+\frac{1}{\bar r^2\varphi_0^2}\frac{\partial^2 H}{\partial\varphi^2}+\frac{\bar r^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2 f}{\partial\bar r^2}+\bar R^2\frac{\partial^2 f}{\partial\bar z^2}+$$

$$+\frac{\bar l^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar r^2(\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2)}\frac{\partial^2 f}{\partial\varphi^2}-\frac{2\bar r\bar R(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2 f}{\partial\bar r\partial\bar z}-\frac{2\bar l(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2 f}{\partial\bar r\partial\varphi}+\frac{2\bar R\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2 f}{\partial\varphi\partial\bar z});$$

$$\frac{\partial f}{\partial\bar r}-\frac{\bar r(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial H}{\partial\bar r}+\bar R\frac{\partial H}{\partial\bar z}+\frac{\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial H}{\partial\varphi}+\frac{f}{\bar r}+\frac{N}{\bar r\varphi_0}\frac{\partial G}{\partial\varphi}=0;$$

$$f\frac{\partial t}{\partial \bar r}+\frac{NG}{\bar r\varphi_0}\frac{\partial t}{\partial\varphi}-H\left(\frac{\bar r(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial t}{\partial\bar r}-\bar R\frac{\partial t}{\partial\bar z}-\frac{\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial t}{\partial\varphi}\right)=\frac{\tilde R}{Pe}(\frac{\partial^2 t}{\partial\bar r^2}+\frac{1}{\bar r}\frac{\partial t}{\partial\bar r}+\frac{1}{\bar r^2\varphi_0^2}\frac{\partial^2 t}{\partial\varphi^2}+$$

$$+\frac{\bar r^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2 t}{\partial\bar r^2}+\bar R^2\frac{\partial^2 t}{\partial\bar z^2}+\frac{\bar l^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar r^2(\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2)}\frac{\partial^2 t}{\partial\varphi^2}-\frac{2\bar r\bar R(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2 t}{\partial\bar r\partial\bar z}-\frac{2\bar l(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2 t}{\partial\bar r\partial\varphi}+\frac{2\bar R\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2 t}{\partial\varphi\partial\bar z});$$

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar r^2}+\frac{1}{\bar r}\frac{\partial\theta}{\partial\bar r}+\frac{1}{\bar r^2\varphi_0^2}\frac{\partial^2\theta}{\partial\varphi^2}+\frac{\bar r^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar r^2}+\bar R^2\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar z^2}+\frac{\bar l^2(\bar z-\bar a)^2}{\bar r^2(\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2)}\frac{\partial^2\theta}{\partial\varphi^2}-\frac{2\bar r\bar R(\bar z-\bar a)}{\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar r\partial\bar z}-$$

$$-\frac{2\bar l(\bar z-\bar a)^2}{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar r\partial\varphi}+\frac{2\bar R\bar l(\bar z-\bar a)}{\bar r\sqrt{\bar c^2-(\bar z-\bar a)^2}}\frac{\partial^2\theta}{\partial\varphi\partial\bar z}=0;$$

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \bar{r}^2} - \frac{2\bar{\delta}\tilde{z}Bi}{\bar{z}\tilde{R}}(t-\vartheta) = 0 \; ;$$

с граничными условиями:

$\bar{z} = 0;\ \ f = 0;$ G=0; $H = 1;\ \ F = 0;$ t=1;

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{z}} = 0; \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = 0; \frac{\partial G}{\partial \bar{z}} = 0; \frac{\partial t}{\partial \bar{z}} = 0; \frac{\partial \theta}{\partial \bar{z}} = 0;$$

$$\bar{z} = \bar{L}: \ \frac{\partial \theta}{\partial \bar{z}} = 0;$$

$\bar{r} = 1;\ f = 0;\ G = 1;\ H = 0;\ t = \theta;$

$$\frac{\partial t}{\partial \bar{r}} = K_\lambda \frac{\partial \theta}{\partial \bar{r}}; \ \frac{\partial \vartheta}{\partial \bar{r}} = -\frac{Bi}{\tilde{R}}(t-\vartheta);$$

$$\bar{r} = 0; f = 0;\ G = 0;\ \frac{\partial H}{\partial \bar{r}} = 0;\ \frac{\partial F}{\partial \bar{r}} = 0; \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} = 0;$$

$$\tilde{r} = 1: \ \ H = 0; f = 0;\ G = 1;\ \frac{\partial \vartheta}{\partial \bar{r}} = -\frac{Bi}{\tilde{R}}(t-\vartheta);$$

$$\bar{r} = 1 + \bar{H}: \ \frac{\partial \theta}{\partial \bar{r}} = -\frac{Bi}{\tilde{R}}(\theta - \theta_n);$$

$\varphi_0/2 = \pi/2: \ H = 0; f = 0;\ G = 1\,;$

$\varphi_0/2 = -\pi/2: \ H = 0; f = 0;\ G = 1\,.$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численная реализация математической модели позволит определить значения параметров скоростей, давления и температур в проточной части канала в зависимости от чисел Re, закрутки N и значений чисел Pe.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

R_p — расстояние от оси трубы до ребра, м;

h — толщина стенки канала, м;

L — общая длина канала типа «конфузор-диффузор», м;

T, $T_с$, $T_п$, $T_р$ — температуры жидкости, стенки канала, пара и ребра соответственно, К;

v_r, v_φ, v_z — радиальная, окружная, осевая составляющие скорости течения, м/с;

α — среднее арифметическое значение коэффициента теплоотдачи, Вт/(м^2·с);

$\lambda_ж$, $\lambda_с$ — коэффициенты теплопроводности жидкости и стенки канала соответственно, Вт/(м·с);

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горская Т.Ю.** Гидродинамика ламинарного течения вязкой жидкости в теплообменных устройствах с вращающейся поверхностью типа «конфузор-диффузор»: Дисс. …канд. техн. наук. Казань, 2004. 110 с.
2. **Пантелеева Л.Р.** Теплообмен при ламинарном течении вязкой жидкости в теплообменных устройствах типа «труба в трубе» с вращающейся поверхностью «конфузор-диффузор»: Дисс. …канд. техн. наук. Казань, 2005. 116 с.
3. **Басова О.А., Золотоносов А.Я., Золотоносов Я.Д.** Построение профиля криволинейных элементов теплообменного аппарата конфузорно-диффузорного типа // Известия вузов. Проблемы энергетики. Казань: Изд-во КГЭУ. 2005. №11-12. С. 111—116.
4. **Мигай В.К.** Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия, 1980. 144 с.
5. **Лойцянский Л.И.** Механика жидкости и газа. — 4-е изд. М.: Наука, 1973. 840 с.
6. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.