

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ СРЕДЫ В ПРИЗМАТИЧЕСКИХ КАНАЛАХ ПРИ УСЛОВИИ РАВЕНСТВА ПЕРИМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

© 2010 А.И. Кадыйров

Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН

Поступила в редакцию 14.10.2010

Исследуется гидродинамическая структура потока неньютоновской жидкости при ламинарном течении в призматическом канале. В качестве конкретной жидкости взят 0,65% раствор Na-КМЦ. В статье представлены зависимости коэффициента сопротивления трению от числа Re для различных геометрических размеров исследуемых образцов при одинаковых значениях периметров. Представлены распределения вязкости и второго инварианта тензора скоростей деформации в сечении исследуемых каналов. Проведено сравнение полученных данных с результатами для круглой трубы и экспериментальными данными при течении 0,65% раствор Na-КМЦ в круглой трубе. В ходе работы получено, что коэффициент сопротивления трению увеличивается с увеличением отношения ширины канала к высоте.

Ключевые слова: жидкость, ламинарное течение, коэффициент сопротивления трению, геометрические размеры, вязкость

ВВЕДЕНИЕ

При решении задачи теплопереноса при небольших разностях температуры уравнения переноса количества движения и неразрывности можно решать независимо от уравнения теплопроводности при условии, что теплофизические характеристики процесса меняются незначительно. Кроме того, очевидно, что гидродинамическая структура потока оказывает сильное влияние на характер процесса теплообмена, и в большинстве случаев получение решения гидродинамической задачи, а именно в случае неньютоновских сред, представляет наибольшую трудность, поэтому данная работа посвящена решению этой проблемы. Одной из основных характеристик теплообмена является площадь поверхности теплообмена, вследствие чего, решение гидродинамической задачи наиболее целесообразно проводить при равных площадях поверхности теплообмена.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель ламинарного течения неньютоновской жидкости в призматическом канале (рис. 1) построена при следующих допущениях:

1) течение жидкости изотермическое, стационарное, ламинарное, со сформировавшимся профилем скорости на входе в канал; 2) жидкость несжимаема; 3) физические свойства жид-

кости постоянны; 4) массовые силы пренебрежимо малы; 5) реологическое поведение среды, характеризуется наличием нелинейно-вязких свойств.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial y} \right). \quad (1)$$

В качестве граничных условий приняты условия прилипания жидкости на стенках канала

$$y=0, y=h: \vec{v} = 0, \quad (2)$$

$$x=0, x=b: \vec{v} = 0. \quad (3)$$

На входе в канал задается ньютоновский профиль скорости.

Для описания реологических свойств 0,65% раствора Na карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) использовалась модель дифференциального типа [1]. В качестве конкретной зависимости взята модель Кутателадзе-Хабахпашевой [2, 3]. Экспериментальные данные при течении 0,65% раствора Na-КМЦ в круглой трубе [5]. Для диапазона $I_2 < 500$ согласно [2, 3] построена регрессионная модель вязкости при $T_0 = 293$ (К),

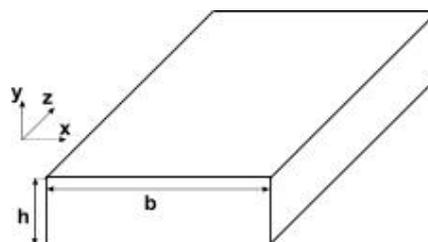


Рис. 1. Призматический канал прямоугольного сечения

Айдар Ильдусович Кадыйров, кандидат технических наук, научный сотрудник исследовательского центра проблем энергетики. E-mail: aidarik@rambler.ru

$$\begin{aligned} \mu(I_2) = & 0,0756312 - 9,03685 \cdot 10^{-6} I_2 + \\ & + \frac{0,492196(1,0561 + 0,019904 I_2)}{50 + I_2} - \\ & - 0,000339989 \cdot 293 + 2,38648 \cdot 10^{-8} \cdot 293 I_2 + \\ & + 4,02062 \cdot 10^{-7} \cdot 293^2 - 3,26264 \cdot 10^{-10} I_2^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Погрешность между регрессионной формулой и аналитической моделью Кутателдазе-Хабашевой составляет менее 0,5%. Исходное уравнение (1) с граничными условиями (2)-(3) решалось методом конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проводились при $\rho = 1014$ (кг/м³), $c_p = 3591$ (Дж/(кг*К)), $\lambda = 0,5618$ (Вт/(м*К)). В работе размеры сечения призматического канала выбирались из условия равенства периметров $p=0,2392$ (м):

- а) ($h=0,0598$; $b=0,0598$ соответствует $b/h=1$),
- б) ($h=0,0398$; $b=0,0798$ соответствует $b/h=2$),

- в) ($h=0,0299$; $b=0,0897$ соответствует $b/h=3$), г) ($h=0,0199$; $b=0,0997$ соответствует $b/h=5$).

В ходе выполнения численных расчетов получены следующие распределения I_2 и μ по сечению канала на промежуточной границе (рис. 2, 3). Как видно из рис. 2, для жидкости 0,65% раствора Na-КМЦ в пристеночной области наблюдается максимальное увеличение второго инварианта тензора скоростей деформации, поэтому жидкость у границ канала менее вязкая. Данное явление является характерной чертой для всех псевдопластичных жидкостей [1].

Влияние геометрии канала, в данном случае соотношения b/h , связано с тем, что с увеличением b/h увеличивается значение I_2 , а именно $b/h=1$ ($I_{2,max}=19$ (1/с²)), $b/h=5$ ($I_{2,max}=275$ (1/с²)). При этом значение вязкости, наоборот, уменьшается с $\mu_{min} = 0,0207$ (Па*сек) для: $b/h=1$ до $\mu_{min} = 0,0199$ (Па*сек) для $b/h=5$.

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента сопротивления трению C_f и отношения μ/μ_0 (μ_0 вязкость при $T=293$ (К) $I_2=0$ (1/с²)) от числа Рейнольдса для ламинарного течения 0,65% раствора Na-КМЦ [5].

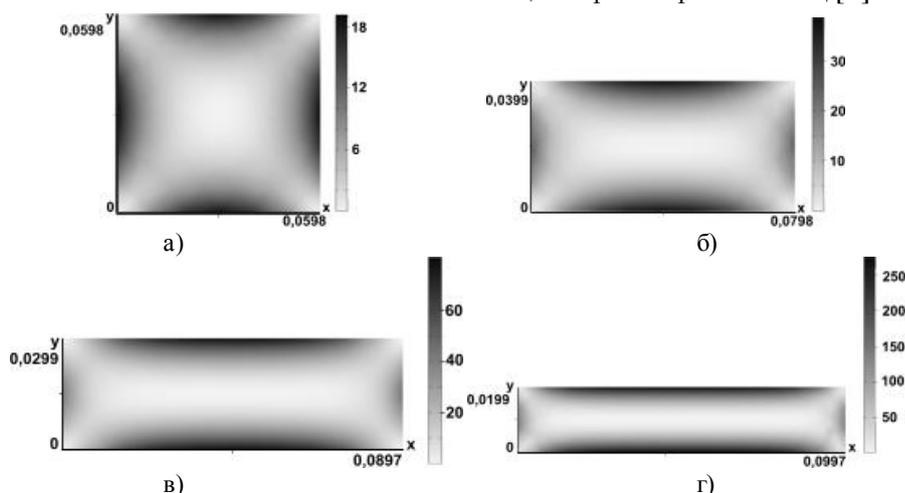


Рис. 2. Распределение второго инварианта тензора скоростей деформации (I_2) по сечению канала, $Re=80$

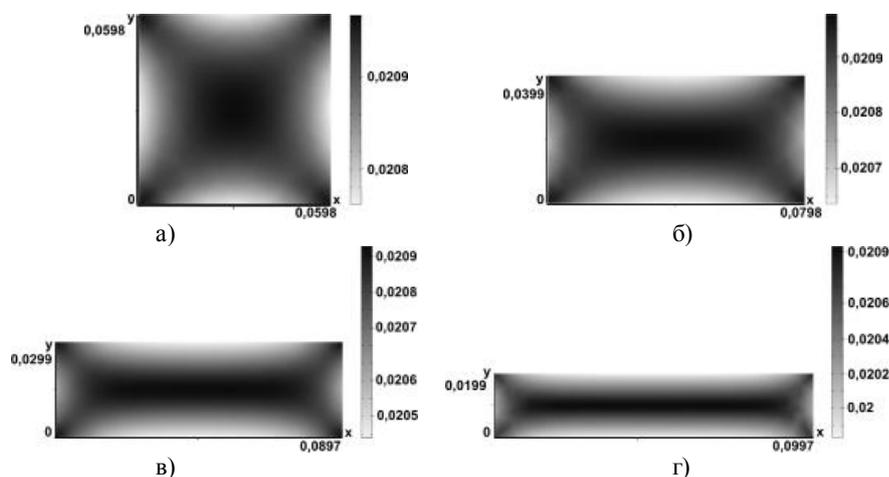


Рис. 3. Распределение вязкости по сечению канала, $Re=80$

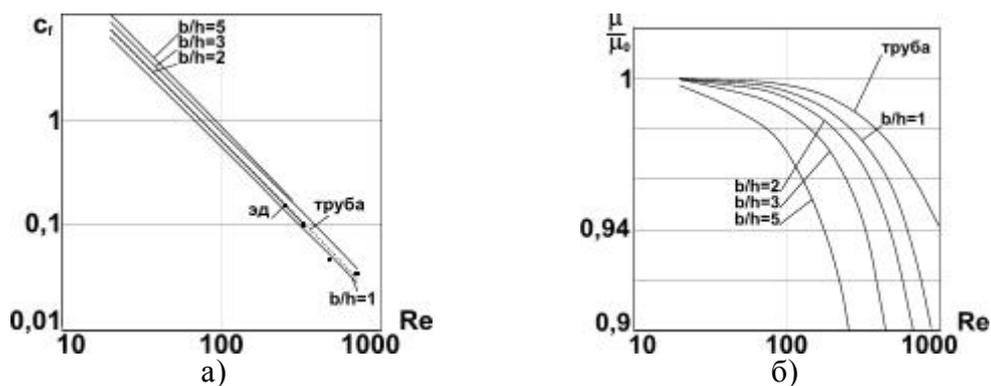


Рис. 4. а) зависимость коэффициента сопротивления трению от числа Рейнольдса для ламинарного течения 0,65% раствора Na-КМЦ, эд – экспериментальные данные по круглой трубе, $L=1$; б) зависимость отношения текущей вязкости к начальной $\mu_0 = \mu(0,293)$ в (6)

$$C_f = \frac{D_9 \Delta P / 4L}{\rho u_m^2 / 2},$$

D_9 – эквивалентный диаметр канала, ΔP – разность давления в исследуемом участке, ρ – плотность жидкости, u_m – средняя скорость течения.

ВЫВОДЫ

В ходе исследования ламинарного течения 0.65% раствора Na-КМЦ в призматических каналах одинакового периметра было получено, что коэффициент сопротивления трению увеличивается с увеличением отношения ширины канала к высоте, при этом вязкость наоборот уменьшается. Максимальное среднеквадратичное отклонение между численными результатами в круглой трубе и экспериментальными данными (эд) составляет менее 10 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 - 2013 годы”, государственный контракт № П1212

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астарита Дж., Маруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, пер. с англ. 1978. 303 с.
2. Кутателадзе С.С., Попов В.И., Хабахпашева Е.М. К гидродинамике жидкостей с переменной вязкостью // ПМТФ. 1966. № 1. С.45-49.
3. Назмеев Ю.Г., Халитова Г.Р., Ананьев Д.В., Кадыйров А.И. Определение областей неоднозначности решений уравнения энергии при ламинарных течениях вязкой и неньютоновских жидкостей при диссипативном тепловыделении // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 2. С. 32-37.
4. Назмеев Ю.Г. Тепломассоперенос в трубчатых реакторах гомофазной полимеризации. Дисс... докт. техн. наук. МЭИ, Казанский филиал. Казань. 1986. 349 с.
5. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. М.: Мир, пер. с англ. Шульман З.П. 1964. 217 с.

INFLUENCE OF RATE OF GEOMETRIC DIMENSIONS TO HYDRODYNAMIC RESISTANCE DURING THE CURRENT OF NON-NEWTON MEDIUM IN PRISMATIC CHANNELS FOR THE CONDITION OF EQUALITY OF PERIMETERS OF CROSS SECTION

© 2010 A.I. Kadyirov

Research Center of the Problems of Energetic of Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science

The hydrodynamic structure of the flow of non-Newtonian fluids in laminar flow in prismatic channel are investigated. For example, 0.65% fluid of Na-CMC is taken. Influence of frictional factor resistance on the number Re for various geometrical dimensions of the samples at the same values of the perimeters are presented in this article. The distribution of viscosity and the second invariant of the rate of deformation tensor are presented. The numerical results presented here study and compare with results for a circular tube and the experimental data for flow of 0.65% fluid of Na-CMC in a circular tube. In this work are received, that the frictional factor resistance increases with increasing ratio of the channel width to height. Key words: liquid, laminar flow, frictional factor resistance, geometrical dimensions, viscosity