



## Влияние геометрии канала и параметров теплообмена на течение жидкости в коническом диффузоре<sup>1</sup>

Галеева Д.Р.\*, Киреев В.Н.\*,\*\*

\*Уфимский университет науки и технологий, Уфа

\*\*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

В данной работе с помощью численного моделирования рассматривается влияние угла раскрытия диффузора на скорость и вязкость жидкости, а также исследуется температурное воздействие на течение несжимаемой термовязкой жидкости. В диффузоре длины  $L$  под действием перепада давления  $\Delta p$  происходит течение несжимаемой термовязкой жидкости.  $R_1, R_2$  — радиусы входного и выходного сечений. Жидкость втекает при постоянной температуре  $T_{in}$ , на стенках диффузора происходит конвективный теплообмен с окружающей средой, температура которой равна  $T_\infty < T_{in}$ .

Уравнения математической модели в цилиндрической системе координат имеют вид [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{u_r}{r} &= 0, \\ \rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \\ + \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu(T) \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu(T) \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) &+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + \mu(T) \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right), \\ \rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \\ \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu(T) \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu(T) \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu(T) \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} &= \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \end{aligned}$$

где  $u_r$  и  $u_z$  — радиальная и осевая компоненты скорости,  $p$  — давление,  $T$  — температура,  $\rho$  и  $\alpha$  — плотность и коэффициент температуропроводности жидкости,  $\mu = \mu(T)$  — зависимость вязкости жидкости от температуры.

На стенке диффузора задается конвективный теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона–Рихмана:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{wall} = h(T - T_\infty),$$

где  $k$  — коэффициент теплопроводности жидкости,  $h$  — коэффициент теплоотдачи.

В работе рассматривается два вида функциональной зависимости вязкости от температуры:

– монотонная зависимость вязкости от температуры вида (рис. 1(a))

$$\mu(T) = \mu_{\max} e^{-B(T-T_\infty)};$$

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-21-00915.

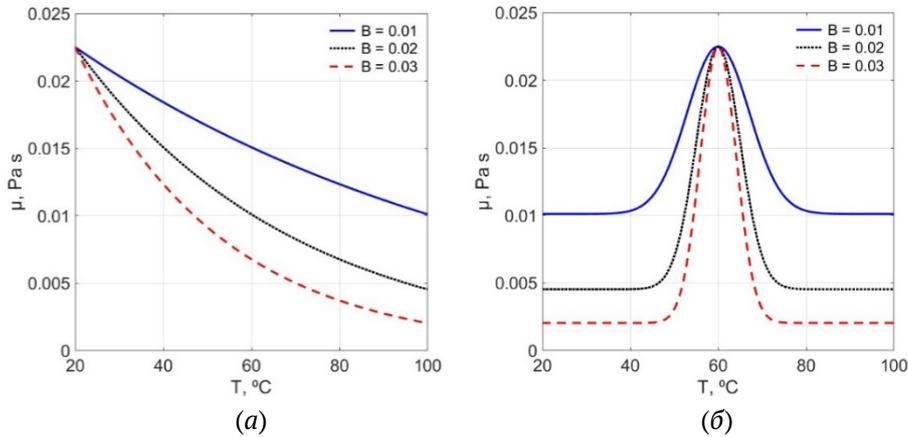


Рис. 1. Монотонная (а) и немонотонная (б) зависимости вязкости от температуры

– немонотонная (аномальная) зависимость вязкости от температуры вида (рис. 1(б))

$$\mu(T) = \mu_{\min} \left[ 1 + Ae^{-B(T-T_*)^2} \right], \quad T_* = \frac{T_{in} + T_{\infty}}{2},$$

где  $A > 0$  и  $B > 0$  – параметры, описывающие характер изменения вязкости.

С целью получения одинаковых диапазонов изменения вязкости для случаев монотонной и немонотонной зависимостей вязкости от температуры параметр вычисляется по формуле

$$A = e^{-B(T_{\infty}-T_{in})} - 1.$$

Для удобства анализа влияния геометрии диффузора и условий теплообмена на характер течения термовязкой жидкости введем два безразмерных параметра: число Нуссельта  $Nu = hR_2/k$ , характеризующее интенсивность теплообмена на

стенке диффузора и отношение радиусов входного и выходного сечений диффузора  $\xi = R_1/R_2$ .

На рис. 2(а) показаны продольные распределения вязкости в диффузоре для различных значений числа Нуссельта в монотонном случае. С увеличением числа Нуссельта распределение температуры в диффузоре снижается, вязкость жидкости ближе к концу диффузора увеличивается, а скорость жидкости падает. При  $Nu = 284$  параметры соответствуют значениям при условии Дирихле, когда на стенках поддерживается постоянная температура  $T = 20^\circ\text{C}$ .

В случае немонотонной зависимости вязкости от температуры распределения параметров носят более сложный характер (рис. 2(б)). При увеличении числа Нуссельта наблюдается высоковязкая зона – область вязкого барьера (рис. 3(б)). Образование вязкого барьера в неоднородном темпера-

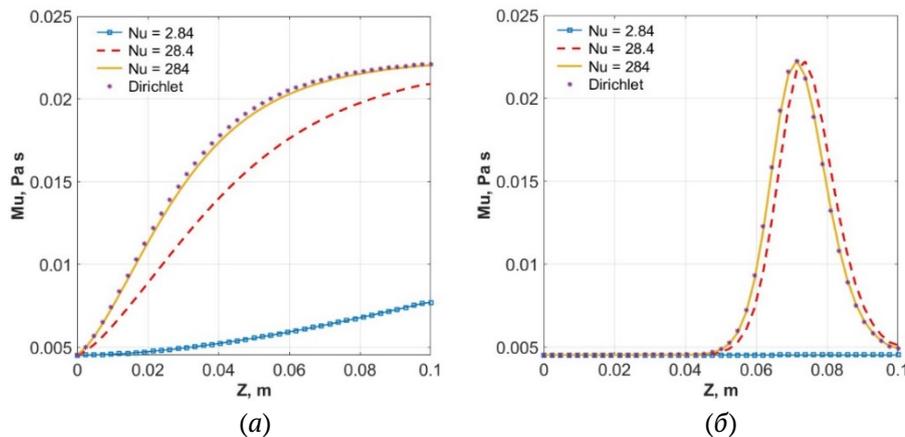


Рис. 2. Продольное распределение вязкости в монотонном (а) и немонотонном (б) случаях для различных значений Nu при  $\xi = 0.3$

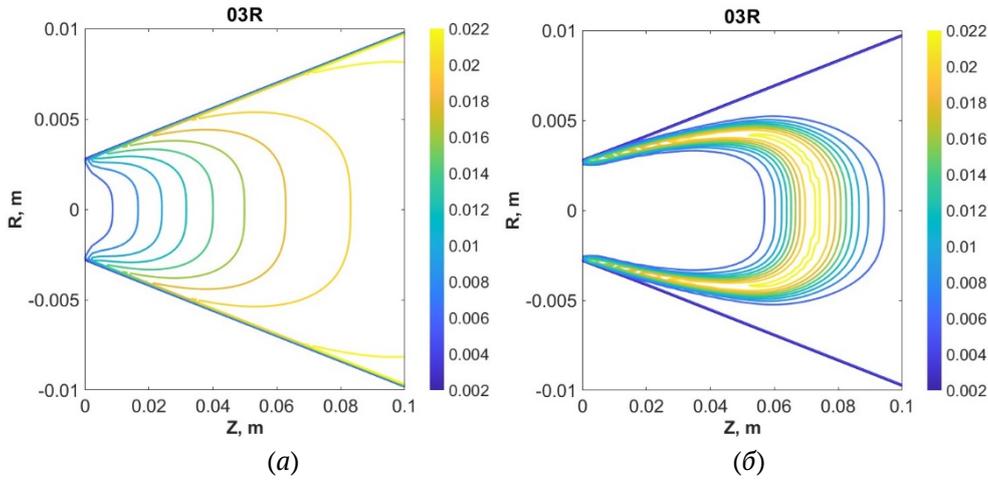


Рис. 3. Изолинии вязкости для случая монотонной (а) и немонотонной (б) функции вязкости при  $Nu = 28.4$  и  $\xi = 0.3$

турном поле приводит к локальному увеличению гидравлического сопротивления потоку аномально термовязкой жидкости, а значит к уменьшению скорости потока. Рассмотрим влияние параметра  $\xi$  на течение жидкости в случае монотонной и немонотонной вязкости. Графики на рис. 4(а) показывают, что по мере уменьшения  $\xi$  скорость жидкости уменьшается. Температура перестает повышаться, жидкость не прогревается. Для диффузоров с малым входным радиусом вязкость быстро становится постоянной  $\mu = 0.0225$  Па·с, что соответствует температуре  $20^\circ\text{C}$ . Это означает, что чем больше угол раскрытия диффузора, тем быстрее охлаждается жидкость.

В немонотонном случае, на рис. 4(б) видно, что чем меньше радиус входа, тем ниже скорость потока.

Однако за счет возникновения замкнутого вязкого барьера скорость жидкости падает не монотонно. При  $\xi = 0.2$  и  $\xi = 0.1$  можно наблюдать область с повышенными значениями скорости, которую можно интерпретировать как зону формирования затопленного струйного течения, связанного с распределением значений вязкости в рассматриваемой области.

### Список литературы

- [1] Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Часть II. М.: Физматгиз, 1963. 728 с.

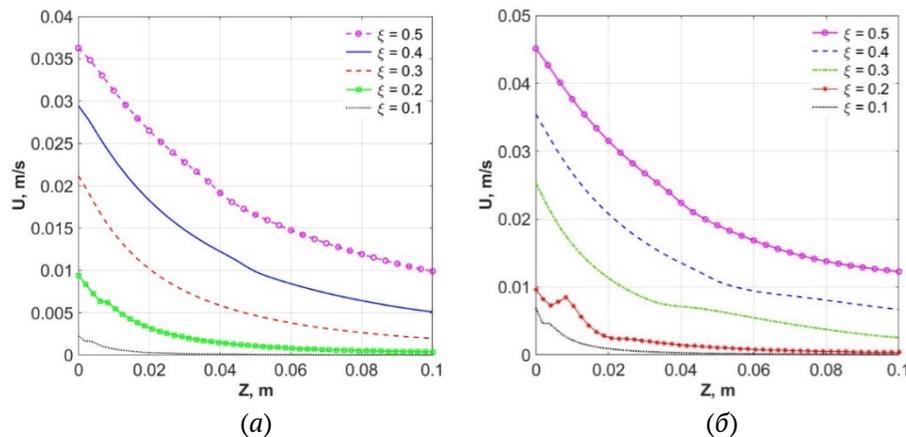


Рис. 4. Продольное распределение осевой компоненты скорости для монотонной (а) и немонотонной (б) вязкости для различных  $\xi$  при  $Nu = 2.84$