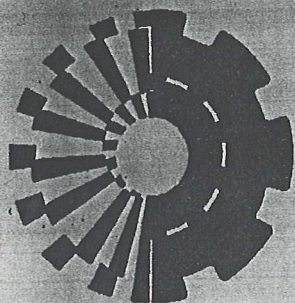


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
УКРАИНЫ**

**ISSN 0453-7998
ISSN 0234-5110**

ВЕСТНИК



**Харьковского
Государственного
Политехнического
Университета**

Выпуск 33

ХГПУ 1999

Л.М. Ульев, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ НАПОРНО-РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В КРУГЛЫХ КОНФУЗОРАХ. V. КРИТЕРИИ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ

У цій роботі одержані критерії, які дозволяють оцінити неізотермічність при течії високов'язких рідин у круглому конфузорі як у випадку адіабатичної течії, так і при теплообміні з зовнішнім середовищем. За допомогою отриманих критеріїв можна оцінити вплив неізотермічності на динаміку течії та вибрати адекватну математичну модель течії високов'язких рідин у кожному конкретному випадку.

В работах [1-5] автором развит метод исследования неізотермічного течения высоковязких жидкостей в круглых конфузорах и исследованы напорно-расходные характеристики конфузоров при различной интенсивности теплообмена на границе. В названных работах установлено, что вследствие больших значений вязкости полимеров,

резкой температурно-вязкостной зависимости и малой теплопроводности огромное влияние на перепад давления в канале оказывает как диссипация энергии, так и теплообмен на границе канала. Результаты, полученные в [2-5], позволяют определить критерии, с помощью которых возможно оценить степень влияния неізотермічних ефектов на перепад давления в канале. Неізотермічне течење високовязкої жидкості в конфузоре определяється параметрами Gn , Pe , Bi , Θ_a ,

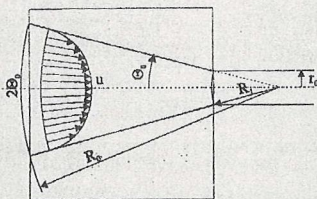


Рис. 1. Схема течения в конфузоре. R_0 , R_1 - образующие конфузора и его усеченной части; $2\theta_0$ - угол раскрытия конфузора; r_0 - радиус выходного отверстия

β , ξ_1 и τ_0 [2-5]. Первые два Gn и Pe , входящие как коэффициенты в уравнение [2]

$$v \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} - \omega \frac{\sqrt{1-\tau^2}}{\xi^2} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{Re \xi^2} \frac{\partial}{\partial \tau} \left[(1-\tau^2) \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} \right] + \frac{Gn}{Pe} \Phi, \quad (1)$$

где v и ω - радиальная и угловая составляющие безразмерной скорости, Θ - безразмерная температура, ξ - безразмерная координата, $\tau = \cos \theta$, Φ - диссипативная функция [1].

Числа Bi и Θ_a – показывают интенсивность теплообмена с окружающей средой [2], β – характеризует зависимость вязкости от температуры [2] и тем самым связывает поле температур с распределением скорости и давления в канале. В данной работе, также как в [1-5], значения β считается постоянным и равным $\beta = 1.44 \cdot 10^{-2}$. Два последних параметра являются геометрической характеристикой канала (рис.1). Отметим, что в работе [6] автором исследована напорно-расходная характеристика цилиндрического канала для различных значений β .

Известно, что интенсивность процессов конвективного теплообмена характеризуется не только значениями определяющих параметров задачи, но и величиной производных, входящих в уравнения описывающие процесс [7]. Поэтому, кратко проанализируем уравнение (1). Левая его часть изменяется вдоль течения, как $1/\xi^2$, первый член в правой части как $1/\xi^2$, второй как $1/\xi^4$, т.е. эффекты, связанные с диссипацией механической энергии при течении вдоль конфузора, становятся преобладающими по сравнению с кондуктивным и конвективным переносом теплоты [1-5]. Это означает, что сам конфузор в некотором смысле моделирует течение с увеличивающимися расходами жидкости, и для оценки неизотермичности и ее влияния на перепад давления необходимо знать значение параметров, определяющих течение и теплообмен как на входе в конфузор, так и на выходе из него.

Основным параметром, характеризующим влияние теплоты диссипации на динамику течения, является число Нема-Грифитта [8] $Gn = \mu v_0^2 / \lambda \Delta T_{\text{theol}}$, где

$$\Delta T_{\text{theol}} = \left| \frac{\mu(T)}{\left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)} \right|_{T=T_0} = \beta T_0 - \text{интервал температуры, на котором происходит существенное изменение вязкости в рассматриваемом процессе. Следовательно, число } Gn \text{ представляет отношение характерного теплового потока, возникающего вследствие диссипации механической энергии к тепловому потоку, необходимому для существенного изменения вязкости, а значит и давления.}$$

Если $Gn \ll 1$ в пределах всего канала, то основное влияние на градиент давления оказывает изменение вязкости за счет теплообмена с окружающей средой. В этом случае, при условии, что величина теплового потока, необходимая для изменения градиента давления, значительно больше, чем тепловой поток на границе канала, т.е. при выполнении условия

Если $Gn \ll 1$ в пределах всего канала, то основное влияние на градиент давления оказывает изменение вязкости за счет теплообмена с окружающей средой. В этом случае, при условии, что величина теплового потока, необходимая для изменения градиента давления, значительно больше, чем тепловой поток на границе канала, т.е. при выполнении условия

$$\frac{\Delta T_{\text{theol}}}{|T_0 - T_a|} \gg \text{Bi}, \quad (2)$$

($1/\Theta_a \gg \text{Bi}$, если в качестве масштаба температуры используется ΔT_{theol})

система уравнений гидродинамики и теплообмена не является сопряженной и перепад давления можно вычислять по зависимости, полученной для изотермического течения [2]. В тех случаях, когда выполняются условия:

$$\frac{\Delta T_{\text{theol}}}{|T_0 - T_a|} = O(\text{Bi}) \text{ или } \frac{\Delta T_{\text{theol}}}{|T_0 - T_a|} < \text{Bi}, \quad (3)$$

при вычислении перепада давления необходимо учитывать изменение градиента давления вследствие изменения вязкости из-за теплообмена с окружающей средой.

Здесь также при некоторых параметрах могут быть сделаны существенные упрощения. Для течения, когда средняя температура жидкости в пределах канала сравнивается со значением температуры окружающей среды, должно выполняться приближенное условие баланса тепловой энергии:

$$\text{ср}Q|T_0 - T_a| \approx \frac{1}{2}K|T_0 - T_a|S_w, \quad (4)$$

где S_w — боковая поверхность конфузора.

Следовательно, можно отметить, что при выполнении соотношения:

$$\text{Pe} \leq \frac{\text{Bi}}{4} \sqrt{\frac{1 + \tau_0}{1 - \tau_0}} (1 - \xi_1^2), \quad (5)$$

или

$$\text{St} \geq \frac{4}{1 - \xi_1} \sqrt{\frac{1 - \tau_0}{1 + \tau_0}}, \text{ где } \text{St} = \frac{K}{\text{ср}V_0}, \quad (5')$$

в пределах канала достигается равномерное распределение температуры со средним значением близким к Θ_a (см. рис. 1, 6 в [3] и рис. 4 в [5]).

Поскольку наибольшее изменение перепада давления в конфузорах с углами раскрытия $2\theta_0 \geq 5^\circ$ происходит вблизи выхода [5], то оценить ΔP при выполнении условий $\text{Gn} \ll 1$, (3) и (5) можно по изотермической зависимости [2], в которой вязкость определяется при температуре окружающей среды $\mu = \mu(T_a)$, что хорошо согласуется с результатами, приведенными на рис. 6 и 7 в [5]. При меньших углах раскрытия конфузора для оценки вязкости можно использовать значение $\mu = \mu\left(\frac{T_0 - T_a}{2}\right)$, что также дает хорошее совпадение с результатами численных экспериментов (рис. 5, 7, 10 в [4]).

Заметим, что для малых углов раскрытия конфузора ($\theta_0 \rightarrow 0$) выражение (5) приобретает вид:

$$Re \leq \frac{Bi}{2\theta_0} (1 - \xi_1^2), \quad (6)$$

и если $\xi_1 \ll 1$, то оно принимает вид:

$$Re \leq \frac{Bi}{2\theta_0}. \quad (7)$$

В случае $\xi_1 = O(1)$ принимает вид:

$$Re \leq \frac{Bi}{\theta_0} (1 - \xi_1). \quad (8)$$

При течении со значительным энерговыделением, т.е. когда $Gn = O(1)$ или > 1 в пределах канала, повышение температуры жидкости вследствие диссипации механической энергии будет оказывать значительное влияние на общий перепад давления. В случаях, исследованных ранее [3-5], числа Нема-Грифитта на выходе из конфузора

$Gn_{ex} = \frac{\mu V_{0ex}^2}{\lambda \Delta T_{theol}} = \frac{1}{\xi_1^2} Gn_0$ и входе в него отличаются в 10 раз для угла раскрытия $2\theta_0 \approx 2,2^\circ$, в 2×10^4 раз для $2\theta_0 \approx 30^\circ$ и в 3×10^5 раз для $2\theta_0 = 60^\circ$. Вследствие этого величина Gn_0 , полученная при обезразмеривании системы уравнений [2] с помощью значения образующей канала R_0 и средней по начальному поперечному сечению канала скорости V_0 [2], неадекватно отражает влияние неизотермичности течения в пределах всего канала (рис. 2). Поэтому, для оценки влияния неизотермичности рассмотрим значение чисел Нема-Грифитта, вычисленных при различных характерных значениях скорости, определяемых геометрией канала. Здесь следует отметить, что в пределах изменения расхода жидкости в [2-5], величина числа Re на выходе из конфузора всегда удовлетворяла условию $Re_{ex} \ll 1$.

$$\text{Для средней по длине конфузора скорости получим } Gn_L = \frac{1}{\xi_1} Gn_0.$$

Вычисляя среднее значение Gn по длине канала, получим выражение (или, что то же самое, используя среднеквадратичное значение скорости)

$$\overline{Gn} = \frac{\mu_0 Q^2 (R_0^2 + R_0 R_1 + R_1^2)}{12 \pi^2 \lambda (1 - \tau_0)^2 R_1^3 R_0^3 \Delta T_{theol}} = \frac{1 + \xi_1 + \xi_1^2}{3 \xi_1^3} Gn_0. \quad (9)$$

Для определения характерного значения числа Нема-Грифитта можно также использовать выражение:

$$Gn' = \frac{R_0 - R_1}{\int_{R_1}^{R_0} \frac{dR}{Gn}} = \frac{5(1 - \xi_1)}{1 - \xi_1^5} Gn_0. \quad (10)$$

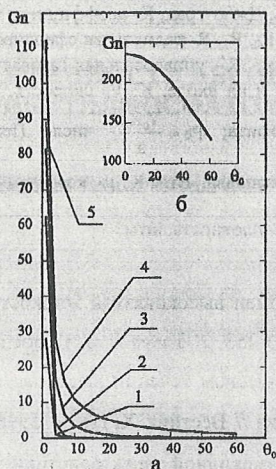


Рис. 2. Зависимость критериев Нема-Грифитга, определенных различным способом от угла раскрытия конфузора. а) 1 – для Gn_0 , 2 – для Gn' , 3 – для Gn_L , 4 – для \overline{Gn} , 5 – для \overline{Gn} рассчитанного по (12). б) зависимость для Gn_{ex} .

Понятно, что характер зависимости зависимостей, от угла раскрытия конфузора для определенных критериев будет инвариантен относительно изменений расхода жидкости, поэтому для рассмотрения примем $Q = 0,2 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$.

Диссипативные эффекты вблизи выхода из конфузора существенны практически для всех значений θ_0 (рис.2). Вблизи входа в канал диссипативный разогрев значителен только для малых углов раскрытия. Значение величин \overline{Gn} и Gn' характеризуют влияние диссипации механической энергии на динамику течения в пределах всего канала. По результатам численных экспериментов [3-5] и рис.2

можно заключить, что наиболее адекватно отражает влияние неизомеричности на течение величина числа \overline{Gn} .

Для малых углов раскрытия конфузора выражение (9) можно преобразовать к виду:

$$\overline{Gn} = \frac{1}{\xi_1^4} Gn_0 = \frac{\mu_0 Q^2}{\lambda \pi^2 r_0^4 \Delta T_{\text{theol}}} = Gn_{\text{cyl}}, \quad (11)$$

где r_0 – радиус выходного отверстия конфузора (рис.1). В этом случае \overline{Gn} , выраженное через r_0 , полностью совпадает с определением числа \overline{Gn} для цилиндра радиуса r_0 .

Для больших углов раскрытия конфузоров и $\xi_1 \ll 1$ получим:

$$\overline{Gn} = \frac{1}{\xi_1^3 (1 - \xi_1)} Gn_0. \quad (12)$$

В случае $\xi_1 = 0$ (1) будет справедливо выражение (11).

Значение \overline{Gn} , рассчитанное по (12) для $\theta_0 \geq 10^\circ$, почти полностью совпадает со значением, полученным по (9), а для $\theta_0 < 10^\circ$ превосходит его, но остается меньше, чем Gn_{ex} и величина (11) (рис.2). Это означает, что (12) можно использовать для оценки влияния диссипативных эффектов на динамику течения в пределах всего конфузора.

Полученные здесь выражения позволяют определить характер неизотермичности при течении высоковязких жидкостей в конфузорах и выбрать как математическую модель наиболее полно описывающую течение, так и метод ее исследования.

Обозначения

a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{град}$; K – коэффициент теплопередачи, $\text{Дж}/\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К}$; Q – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; R_0, R_1, R – радиальная сферическая координата, формующая конфузора и его усеченной части, м ; R^* – универсальная газовая постоянная $\text{Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}$; T, T_0 – температура расплава, текущая и на входе, К ; V – скорость, $\text{м}/\text{с}$;

$Bi = \frac{KR_0}{\lambda}$ – число Био; $Gp = \frac{\mu(T_0)V_0^2}{\lambda\Delta T_{\text{теол}}}$ – число Нема-Гриффита; $Pe = \frac{V_0R_0}{a}$ – число Пекле;

$Re = \frac{\theta_0\rho V_0R_0}{\mu_0}$ – число Рейнольдса; λ – теплопроводность расплава, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; μ – коэффициент

динамической вязкости $\text{Па}\cdot\text{с}$; $2\theta_0$ – угол раствора конфузора; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Индексы: а-относящийся к окружающей среде.

- Список литературы:** 1. Ульев Л.М. Течение и теплообмен высоковязкой жидкости в круглом конфузоре // ТОХТ. –1992. –Т. 26, №. 2. –С. 243-253. 2. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. I. Метод исследования // Вестник ХГПУ. – 1998. – Вып. 15. – С. 3-13. 3. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. II. Течение в каналах с адиабатической стенкой // Вестник ХГПУ. – 1998. – Вып. 15. – С. 14-18. 4. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. III. Течение с теплообменом на границе. Малые углы раскрытия // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 28. – С. 26-32. 5. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. IV. Течение с теплообменом на границе. Большие углы раскрытия // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 28. – С. 33- 7. 6. Ульев Л.М. Напорно-расходная характеристика круглых формующих каналов при неизотермическом течении расплавов термопластичных полимеров // Инж. – физ. журн. – 1996. –Т. 69, №. 4. –С. 606- 614. 7. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. – М.: Высшая школа – 1974. – С. 328. 8. Pearson J.R.A. Polymer flows dominated by high heat generation and low heat transfer // Polymer Engng. Sci. – 1978. Vol. 18, No. 3. – P. 222-229.

Поступила в редколлегию 3.03.99