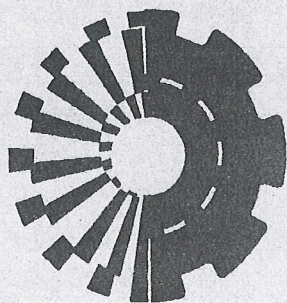


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
УКРАИНЫ

ISSN 0453-7998
ISSN 0234-5110

ВЕСТНИК



Харьковского
Государственного
Политехнического
Университета

Выпуск 28

ХГПУ 1999

Л.М. Ульев, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ НАПОРНО-РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ НЕИЗТЕРМИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В КРУГЛЫХ КОНФУЗОРАХ. III. ТЕЧЕНИЕ С ТЕПЛООБМЕНОМ НА ГРАНИЦЕ. МАЛЫЕ УГЛЫ РАСКРЫТИЯ

Представлені результати дослідження напорно-розхідної характеристики при течії у круглому конфузори з теплообміном на межі. Інтенсивність теплообміну змінюється за допомогою завдання температури оточуючого середовища та умов третього роду на межі.

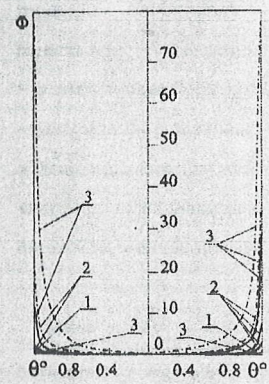
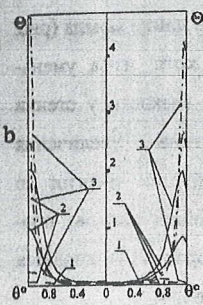
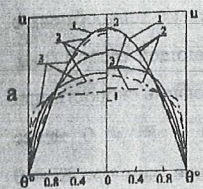
В последние несколько лет вырос интерес к исследованию напорно-расходных характеристик при течении полимерных жидкостей в формующих каналах. Это связано с тем, что качество выдавливаемого экструдата в значительной степени определяется режимом течения расплава полимера в фильерах экструзионной головки [1]. Многие особенности такого течения можно определить и объяснить, исходя из простых феноменологических моделей макрореологии [2,3].

В работах [2,3,4,5] приведены результаты исследования напорно-расходных характеристик при течении расплавов термопластичных полимеров в цилиндрических фильерах. В работе [6] автором построены математическая модель неизотермического течения высоковязких жидкостей в конических каналах и численный метод ее анализа. С помощью развитых автором методов, в [7] исследована напорно-расходная характеристика при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглом конфузоре с адиабатической стенкой.

В случае теплообмена с окружающей средой неизотермичность течения определяется уже не только диссипацией энергии, но и теплообменом на границе канала.

Рассмотрим течение расплава полимера с Аррениусовской зависимостью вязкости от температуры [6]

$$\mu(T) = \mu_0 \exp \left[\frac{E}{R^*} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (1)$$



где $\mu_0 = 10^3$ Па·с, $E \sim (10^5 \dots 3 \cdot 10^5)$ Дж/моль; $T_0 = 463$ К; R^* - универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К, и теплофизическими свойствами $s = 2000$ Дж/кг·К; $\lambda = 0,2$ Вт/м·К; $\rho = 1250$ кг/м³; $\beta = 1,44 \cdot 10^{-2}$ [7], в канале с диаметром выходного отверстия $d = 0,003$ м и длиной образующей $L = R_0 - R_1 = 0,06$ м [6].

Рис. 1. Профиль скорости (а) и распределение безразмерной температуры поперек канала (б) для течения в конфузоре с $2\theta_0 \approx 2,2^\circ$. Левая часть для течения при $Bi = 0$, правая при $\Theta_a = 0$. Штриховые линии для $Q = 0,6 \cdot 10^{-7}$ м³/с, сплошные для $Q = 0,6 \cdot 10^{-6}$ м³/с, штрих-пунктирные для $Q = 0,2 \cdot 10^{-5}$ м³/с. 1 - распределение для $\xi = 1$; 2 - 0,8; 3 - 0,55

Для течения с малыми скоростями ($Q \leq 0,8 \cdot 10^{-7}$ м³/с) в конфузорох с небольшими углами раскрытия ($2\theta_0 \leq 4^\circ$) и $\Theta_a = 0$, угловое распределение температуры почти равномерно практически на всей длине канала, но значение ее меньше, чем при $Bi=0$ (рис. 1).

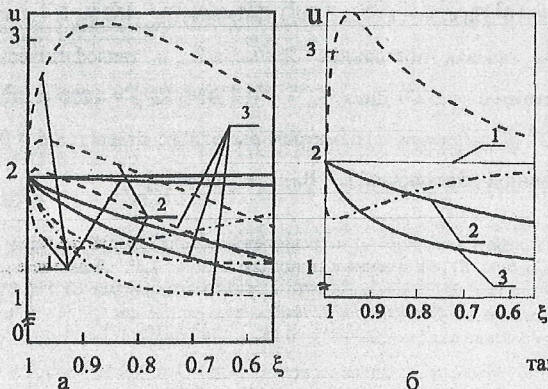
Это происходит вследствие того, что мощность диссипации энергии Φ [6] незначительна (рис.2) (числа Нема-Гриффита $Gn \ll 1$ на всем протяжении канала [7]), и практически все выделившееся тепло рассеивается в окружающую среду. Параметр Био [6]

зависит от величины образующей канала и, в рассматриваемом случае при $2\theta_0=2,2^\circ$, $Bi \approx 207$.

Вследствие большой вязкости, значение величины $|\text{grad } P|$ здесь больше, чем при $Bi = 0$, и

Рис. 2. Распределение безразмерной мощности диссипации энергии поперек канала. а - для расхода $Q = 0,2 \cdot 10^{-7}$ м³/с, б - $0,6 \cdot 10^{-7}$ м³/с, в - $0,6 \cdot 10^{-6}$ м³/с, г - $0,2 \cdot 10^{-5}$ м³/с. Сплошные линии для течения жидкости с постоянными свойствами, штрих-пунктирные для течения при $\Theta_a = -3$, штриховые для $\Theta_a = 3$, пунктирные для $\Theta_a = 3$. 1 - распределение на входе в канал, 2 - $\xi = 0,8$, 3 - $\xi = 0,56$.

$|\Delta P|$ на длине канала здесь больше. Увеличение расхода ведет к росту диссипации энергии вблизи стенки канала (рис. 2), где наблюдается максимальный градиент скорости (рис. 1). Там повышается температура, но ее максимум находится на некотором расстоянии от границы, т.к. жидкость в непосредственной близости стенки остывает



вследствие теплообмена с окружающей средой (рис. 1). Профиль скорости при $\Theta_a = 0$ и $Vi \neq 0$ менее наполнен, чем при $Vi = 0$ на всей длине канала (рис. 1, 3), хотя, из-за уменьшения вязкости у стенки вследствие увеличения там диссипации энергии по

Рис. 3. Изменение наполненности профиля скорости вдоль ξ в конфузоре с $2\theta_0 = 2,2^\circ$. а - сплошные линии для адиабатического течения, штрих-пунктирные для течения при $\Theta_a = 3$, штриховые для $\Theta_a = -3$. 1 - для расхода $Q = 0.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, 2 - $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, 3 - $0.1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ (для $\Theta_a = 3$; 3 - $0.2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$). б - сплошные линии для течения с $\Theta_a = 0$, штрих-пунктирные для течения при $Q = 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ и $\Theta_a = 3$, штриховые для $Q = 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ и $\Theta_a = -3$. 1 - для расхода $Q = 0.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, 2 - $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, 3 - $0.2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$.

мере сужения канала, профиль скорости уплощается вдоль течения.

Увеличение мощности диссипации и повышение

температуры расплава приводит к увеличению теплового потока на стенке канала $q = Vi(\Theta_N - \Theta_a)$ [6] (рис. 4). Для малых расходов тепловой поток незначителен, но при увеличении расхода окружающей среде будет отдаваться значительная часть выделившейся энергии. Поэтому в отличие от течения с $Vi = 0$ [7], напорно-расходная характеристика имеет нелинейный, но монотонно возрастающий характер в исследованном диапазоне изменений расхода Q (рис. 5).

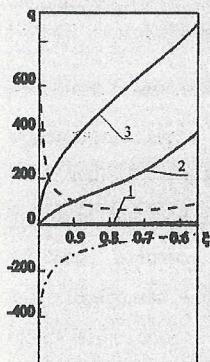


Рис. 4. Распределение безразмерного теплового потока на границе канала вдоль течения в конфузоре с $2\theta_0 = 2,2^\circ$. Сплошные линии для течения с $\Theta_a = 0$, штрих-пунктирные для течения при $Q = 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ и $\Theta_a = 3$, штриховые для $Q = 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ и $\Theta_a = -3$. 1 - $Q = 0.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, 2 - $0.6 \cdot 10^{-6}$, 3 - $0.2 \cdot 10^{-5}$

В случае $\Theta_a < 0$ расплав при малых расходах охлаждается практически равномерно по поперечному сечению канала (рис. б), тепловой поток значителен только вблизи входа в конфузур (рис. 4), где и происходит выравнивание температуры потока с температурой окружающей среды. Профиль скорости вблизи входа в конфузур вытягивается, но по мере восстановления однородности в распределении температуры возвращается к профилю Харрисона [6,8] (рис. 3).

Модуль градиента давления $|\nabla P|$ увеличивается за счет увеличения вязкости, и перепад давления в канале $|\Delta P|$ значительно выше, чем при

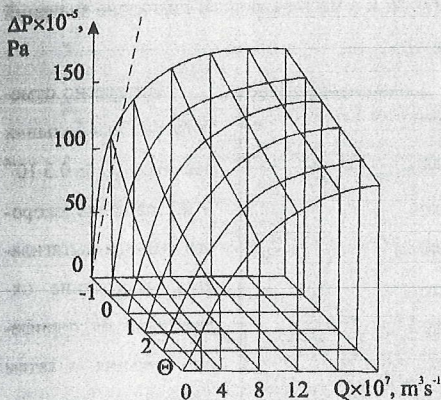
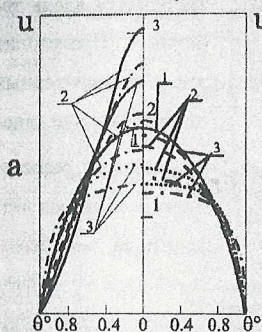


Рис. 5. Распределение среднего по поперечному сечению конфузора давления в зависимости от безразмерной температуры окружающей среды Θ_a и расхода Q для течения в конфузоре с углом раскрытия $2\theta_0 = 2,2^\circ$ - сплошные линии. Штриховая - для течения жидкости с постоянными свойствами.

изотермическом течении (рис. 2). Напорно-расходная характеристика при $\Theta_a < 0$ и малых расходах значительно круче, чем при изотермическом течении (рис.5).

С увеличением расхода жидкости



увеличивается диссипация механической энергии на периферии течения, увеличивается там и температура (рис.

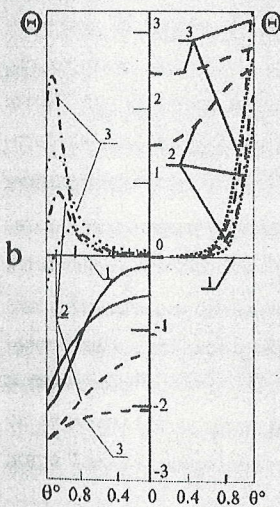
Рис. 6. Профиль скорости (а) и распределение безразмерной температуры поперек канала (б) для течения в конфузоре с $2\theta_0 \approx 2,2^\circ$. Левая часть для течения при $\Theta_a = -3$, правая при $\Theta_a = 3$. Штриховые линии для $Q = 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, сплошные для $Q = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, пунктирные - $Q = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, штрих-пунктирные для $Q = 0,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$. 1 - распределение для $\xi = 1$; 2 - 0,8; 3 - 0,55

б), что ведет к уменьшению вязкости и снижению скорости нарастания $|\nabla P|$ вдоль течения (рис. 7). При $\Theta_a = -3$ и $Q \approx 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ вблизи выхода из конфузора величина

модуля градиента давления начинает уменьшаться вдоль течения, вследствие чего перепад давления на длине канала становится меньше изотермического.

Дальнейшее увеличение расхода приводит к еще большему росту температуры жидкости у стенки канала вдоль ее течения (рис. 7) вследствие диссипации энергии, и поэтому модуль градиента давления, начиная с

некоторого значения Q , становится меньше изотермического практически на всей длине канала (рис. 7). Перепад давления $|\Delta P|$ при больших Q значительно меньше изотермического, хотя и выше $|\Delta P|$ для течения при $Bi = 0$, т.к. значительная часть диссипировавшей энергии рассеивается в окружающую среду (рис. 8). В итоге



функция $|\Delta P(Q)|$ является сильно нелинейной и в исследованном диапазоне значений Q и $\Theta_a < 0$ – монотонно возрастающей (рис. 6).

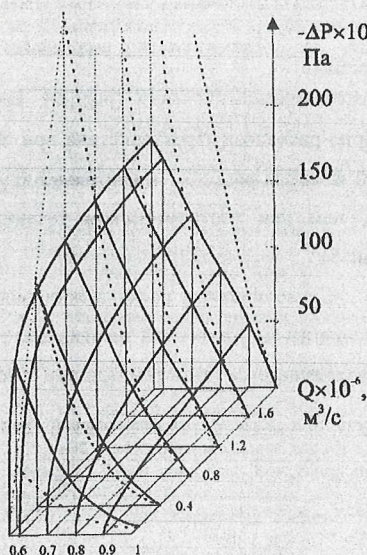


Рис. 7. Распределение среднего по поперечному сечению конфузора давления в зависимости от радиальной координаты и расхода жидкости в конфузоре с углом раскрытия $2\theta_0 \approx 2,2^\circ$. Сплошные линии для течения при $\Theta_a = -3$, штриховые для изотермического течения.

расходов (рис. 3). Профиль скорости, конечно, будет отличаться от профиля Харрисона, даже когда значение U на оси канала совпадет со значением U для распределения Харрисона вследствие неравномерного распределения вязкости по угловой координате.

Тепловой поток на границе для расходов $Q \leq 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ сначала уменьшается вдоль течения, достигает на некотором расстоянии от входа своего минимального значения и затем начинает увеличиваться (рис. 4,8). Это связано с тем, что в начале течения, где $Gn \ll 1$, диссипация энергии незначительна, жидкость интенсивно остывает и разность температур на периферии течения и окружающей среды уменьшается, но по мере сужения канала увеличивается тепловыделение и соответственно тепловой поток на границе.

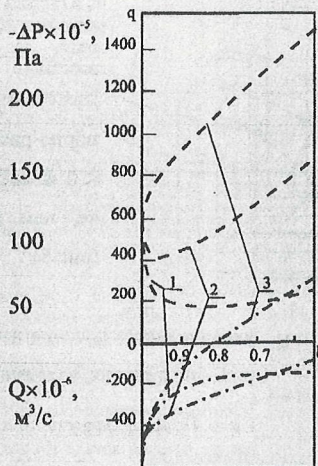


Рис. 8. Распределение безразмерного теплового потока на границе канала вдоль течения в конфузоре с $2\theta_0 = 2,2^\circ$. Штриховые для $\Theta_a = -3$, штрихпунктирные для течения при $\Theta_a = 3$, 1 - для расхода $Q = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, 2 - $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, 3 - $0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$.

как при охлаждении жидкости для малых

Интересно отметить, что для больших расходов ($Q \geq 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$) профиль скорости сначала вытягивается, вследствие охлаждения на периферии течения, а затем уплощается вдоль течения. Происходит это в рассмотренных случаях за счет диссипативного разогрева и уменьшения вязкости на периферии течения, а не за счет восстановления однородного распределения температуры,

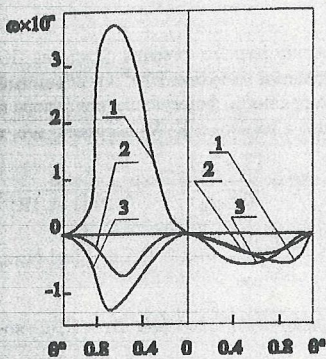


Рис. 9. Распределение безразмерной угловой составляющей скорости при течении в конфузоре с углом раскрытия $2\theta_0 \approx 2,2^\circ$ и $Q = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Левая часть рисунка для $\Theta_a = -3$, правая для $\Theta_a = 3$. 1 - распределение для координаты $\xi = 0,985$ (в левой части $n = 2$, в правой $n = 1$); 2 - $\xi = 0,7$, $n = 2$; 3 - $\xi = 0,56$, $n = 2$.

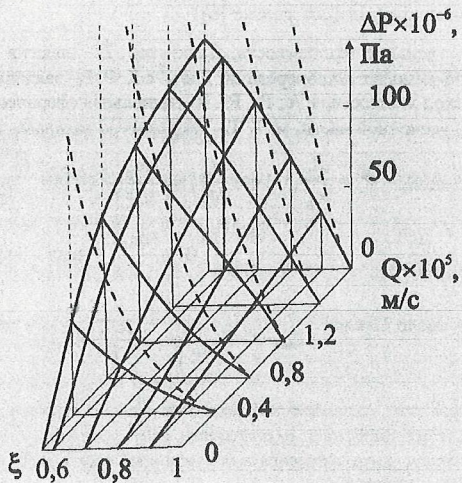


Рис.10. Распределение среднего по поперечному сечению конфузора давления в зависимости от радиальной координаты и расхода жидкости в конфузоре с углом раскрытия $2\theta_0 \approx 2,2^\circ$. Сплошные линии для течения при $\Theta_a = 3$, штриховые для изотермического течения

Для малых расходов и $\Theta_a > 0$ жидкость равномерно прогревается (рис. 6), профиль скорости сначала несколько уплощается, но далее по течению возвращается почти к исходному (рис. 3, 6) вследствие равномерного нагрева потока. В области интенсивной перестройки профиля продольной скорости наблюдаются максимальные значения поперечной составляющей скорости ω [6] (рис. 9) (здесь необходимо учесть, что значение величины V_0 [6] отрицательно в рассматриваемой схеме решения).

Уменьшение вязкости на периферии течения вследствие нагрева от окружающей среды приводит к уменьшению диссипации энергии и значительному снижению модуля градиента давления (рис. 10). Поэтому общий перепад давления в канале меньше, чем при изотермическом течении.

При больших расходах, жидкость не успевает равномерно прогреться за счет теплообмена с окружающей средой, но на образование маловязкого периферийного слоя тратится энергии меньше, чем при $\Theta_a < 0$ или $Bi = 0$, поэтому перепад давления на конфузоре значительно меньше (рис. 5, 10). Интересно отметить, что при $Q > 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ тепловой поток на стенке канала на некотором расстоянии от входа в конфузоре меняет знак (рис. 9) из-за того, что в периферийном слое, вследствие диссипации энергии, температура расплава становится выше температуры окружающей среды.

Обозначения (см. также [6])

c – удельная теплоемкость, Дж/кг·град; E – энергия активации вязкого течения, Дж/моль; K – коэффициент теплопередачи, Дж/м²·с·К; P, P_0 – давление текущее и на входе, Н/м²; Q – объемный расход жидкости, м³/с; R_0, R_1, R – радиальная сферическая координата, формирующая конфузора и его усеченной части, м; T, T_0 – температура расплава, текущая и на входе, К; V – скорость, м/с; τ

$$= \cos\theta, \quad \xi = \frac{R}{R_0}, \quad v = \frac{V_R}{V_0}, \quad u = \frac{V_R}{V_0 \xi^2}, \quad \beta = \frac{R^* T_0}{E}, \quad \Theta = \frac{(T - T_0)}{\Delta T_{\text{rheol}}}, \quad V_0 = \frac{Q}{2\pi(1 - \tau_0)R_0^2},$$

$$m = \frac{\mu(T)}{\mu(T_0)} = \exp\left(-\frac{\Theta}{1 + \beta\Theta}\right), \quad \text{Bi} = \frac{KR_0}{\lambda} \text{ - число Био; } \text{Sp} = \frac{\mu(T_0)V_0^2}{\lambda\Delta T_{\text{rheol}}} \text{ - число Нема-Гриффита;}$$

Re – число Пекле; $\Delta T_{\text{rheol}} = \left| \frac{\mu(T)}{\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_{T=T_0}} \right| = \frac{R^* T_0^2}{E} = \beta T_0$ λ – теплопроводность расплава, Вт/м·К; μ – ко-

эффициент динамической вязкости Па·с; θ – угловая сферическая координата, рад; $2\theta_0$ – угол раствора конфузора; ρ – плотность, кг/м³.

Индексы: а – относящийся к окружающей среде; R, θ – обозначают радиальную и угловую координаты вектора.

Список литературы: 1. Kolnaar J. W., Keller A. A singularity in the melt flow of polyethylene with wider implications for polymer melt flow rheology // J. Non-Newton. Fluid Mech. –1996. – Vol. 67, No. 2. – P. 213– 240. 2. Ульев Л.М. Неизотермическое течение расплавов термопластичных полимеров в круглых формирующих каналах // ТОХТ. –1995. –Т. 29, №. 3. – С. 233- 241. 3. Ульев Л.М. Напорно-расходная характеристика круглых формирующих каналов при неизотермическом течении расплавов термопластичных полимеров // Инж. –физ. журн. –1996. –Т. 69, №. 4. –С. 606- 614. 4. Uliev L.M. Pressure drop-flowrate characteristic for non-isothermal flow high-viscosity liquids in circular channel // 12 th International Congress of Chemical and Process Engineering. CHISA'96. Praha. 1996. Paper No. P.[0273]. 5. Uliev L.M. Pressure Drop-Flowrate Characteristic for Non-Isothermal Flow Melts of Thermoplastic Polymers in Circular Channels // 5th World Congress of Chemical Engineering. July 14- 18. 1996. San Diego. California. Paper No. 79j. 6. 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. 7. 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. 8. Найденов В.И. Течение вязкой жидкости в коническом диффузоре при наличии теплопередачи // Изв. АН СССР. МЖТ. –1974. –№ 1. – С. 138- 147.

Поступила в редколлегию 15.12.98