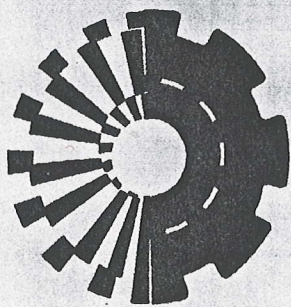


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
УКРАИНЫ**

ISSN 0453-7998

ISSN 0234-5110

# ВЕСТНИК



**Харьковского  
Государственного  
Политехнического  
Университета**

---

**Выпуск 15**

**ХГПУ 1998**

## ОСОБЕННОСТИ НАПОРНО-РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В КРУГЛЫХ КОНФУЗОРАХ. II. ТЕЧЕНИЕ В КАНАЛАХ С АДИАБАТИЧЕСКОЙ СТЕНКОЙ

Представлены результаты дослідження напорно-розхідної характеристики круглого конфузору при течії у каналі з адиабатичною стінкою. Виявлено, що при малих кутах розчину конфузору характеристика є немонотонною.

В работе [1] автором кратко изложены результаты анализа значимости исследования напорно-расходных характеристик фильтрных каналов при проектировании полимерного оборудования. Там же автором приведена математическая модель неизоотермического течения высоковязких жидкостей в конических каналах и метод ее исследования.

Предварительный анализ математической модели показывает, что решение поставленной задачи будет определяться параметрами:  $Gn$ ,  $Re$ ,  $Bi$ ,  $\Theta_a$ ,  $\beta$ ,  $\xi_1$ ,  $\tau_0$  и характером зависимости  $m(\Theta)$ , но, как показано автором в [2], основные особенности неизоотермического течения исследуемых жидкостей определяются их расходом и интенсивностью теплообмена на границе канала. При течении в конфузоре значительную роль будет играть еще и угол его раскрытия.

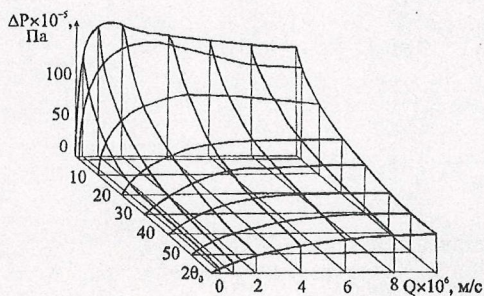


Рис. 1. Распределение среднего по поперечному сечению конфузора перепада давления в зависимости от расхода  $Q$  и угла раскрытия  $2\theta_0$

Для выяснения закономерностей напорно-расходной характеристики, связанных с определяющей особенностью высоковязких жидкостей — значительным внутренним трением, рассмотрим сначала течение в конфузоре с адиабатической стенкой и геометрическими размерами [1]  $L = R_0 - R_1 = 0,06\text{м}$ , углами раскрытия  $2\theta_0 \sim 0 \dots 60^\circ$  и постоянным диаметром выходного отверстия  $d = 0,03\text{м}$ . Свойства расплава полимера определяются значениями:  $s = 2000$  Дж/кг·К,  $\lambda = 0,2$  Вт/м·К,  $\rho = 1250$  кг/м<sup>3</sup>,  $\beta = 1,44 \cdot 10^{-2}$ .

Для малых углов раскрытия конфузора напорно-расходная функция имеет экстремальный характер (рис. 1), т.е. при превышении некоторого значения расхода гидравлическое сопротивление канала уменьшается. При стремлении  $\theta_0 \rightarrow 0$  напорно-расходная характеристика стремится к характеристике для неизотермического течения в цилиндрическом канале [2] (рис. 1). При увеличении  $\theta_0$  напорно-расходная функция постепенно становится монотонно растущей, оставаясь при этом существенно нелинейной.

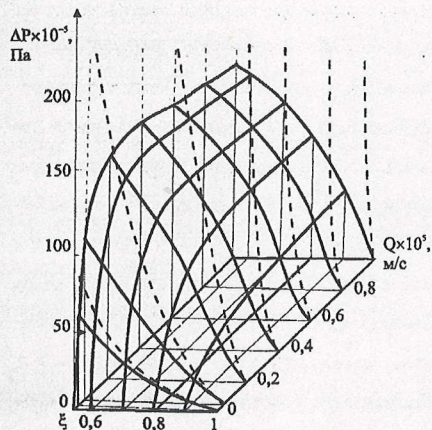


Рис. 2. Распределение среднего по поперечному сечению конфузора давления в зависимости от радиальной координаты и расхода жидкости в конфузоре с углом раскрытия  $2\theta_0 \approx 2,2^\circ$ . Сплошные линии для течения с адиабатической стенкой, штриховые для изотермического течения

себя тепло успевает почти равномерно распределиться по сечению потока. И хотя температура жидкости в целом незначительно растёт вдоль канала, профиль скорости мало чем отличается от профиля Харрисона [1] (рис. 5), что ведёт лишь к малому отклонению зависимости  $\Delta P(R/R_0)$  от изотермической (рис. 2). При увеличении расхода такое поведение будет наблюдаться до тех пор, пока в пределах канала не образуется маловязкий пограничный слой.

Возникновение такого слоя связано с тем, что с увеличением расхода на периферии течения увеличивается градиент скорости, а значит и диссипация энергии, которая из-за малой теплопроводности полимеров не успевает релаксировать за время пребывания расплава в канале. С повышением температуры у стенки там уменьшается вязкость, профиль скорости становится более наполненным, т.е. увеличивается скорость

Такой результат становится понятным, если рассмотреть зависимость перепада давления  $\Delta P = P - P_0$  от радиальной координаты (рис. 1-3) для различных расходов расплава и углов раскрытия конфузора.

Для течения в конфузоре с малым углом раскрытия  $\theta_0 \sim 1^\circ$  и малыми расходами, число Нема-Гриффита на входе в конфузоре  $Gn_0 \sim 0,02$ , а на выходе  $Gn_e \sim 0,2$ , следовательно, энергия диссипации практически не будет влиять на динамику течения. Действительно, при таких расходах скорости сдвига малы, диссипация незначительна и все выделившееся

сдвига на периферии, что ведет к локализации тепловыделения. Вместе с этим модуль градиента давления уменьшается, и кривая  $\Delta P(\xi)$  с появлением маловязкого слоя заметно отклоняется от изотермической (рис. 3). Но и сам конфузор, в некотором смысле, моделирует стационарные течения с увеличивающимися расходами.

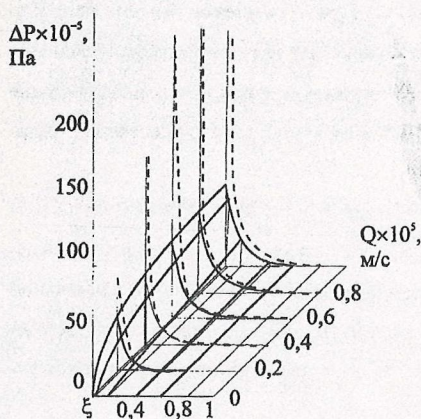


Рис. 3. Распределение среднего по поперечному сечению конфузора давления в зависимости от радиальной координаты и расхода жидкости в конфузоре с углом раскрытия  $2\theta_0 \approx 30^\circ$ . Сплошные линии для течения с адиабатической стенкой, штриховые для изотермического течения

жидкости вблизи выхода из конфузора.

При малых расходах именно там наблюдаются отличия в распределении давления от изотермического распределения. С увеличением расхода до  $Q = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  число  $Gn >$

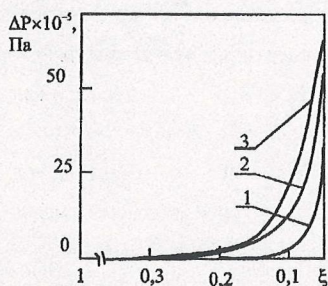


Рис. 4. Распределение среднего по поперечному сечению конфузора давления в зависимости от радиальной координаты в конфузоре с углом раскрытия  $2\theta_0 \approx 30^\circ$  и течения с адиабатической стенкой

1 для всей длины конфузора, и маловязкий сдвиговый слой распространяется на все большую его часть (рис. 5). Профиль скорости становится более наполненным, но, вследствие уменьшения вязкости на периферии течения, модуль градиента давления  $|\nabla P|$  снижается еще больше, и при дальнейшем увеличении расхода уменьшение модуля градиента давления уже значительно превосходит его зависимость от радиуса (см. (40) [1]) и функция  $\Delta P(R/R_0)$  меняет знак кривизны, т.е. становится выпуклой вверх, как в случае неизотермического течения в цилиндре [2]. Для еще больших расходов, на начальном участке тече-

Действительно, течение жидкости вдоль конфузора сопровождается увеличением средней скорости по сечению канала. Это ведет к увеличению градиента скорости, особенно в периферийной области течения, и, следовательно, к росту диссипации энергии у стенок канала, благодаря чему повышается температура, уменьшается вязкость и профиль скорости становится более наполненным (рис. 4-6). И, как следствие, маловязкий тепловой слой начинает образовываться при увеличении расхода

уже значительно превосходит его зависимость от радиуса (см. (40) [1]) и функция  $\Delta P(R/R_0)$  меняет знак кривизны, т.е. становится выпуклой вверх, как в случае неизотермического течения в цилиндре [2]. Для еще больших расходов, на начальном участке тече-

ния модуль градиента давления  $|\nabla P|$  высок, значительна и диссипация, что ведет к быстрому образованию высокотемпературного маловязкого слоя и почти прямоугольному профилю скорости (рис. 4), а это при дальнейшем течении вдоль канала только усиливает описанные эффекты. В итоге перепад давления в канале  $|\Delta P|$  может быть меньше, чем для течения с малыми расходами, хотя падение давления у входа в канал в первом случае больше (рис. 2). В результате при неизотермическом течении в конфузорах с малыми углами раскрытия напорно-расходная характеристика немонотонна (рис.

1). Заметим, что зависимость, приведенная на рис. 1, отно-

сится только к установившимся течениям.

Увеличение угла раскрытия конфузора ведет к увеличению разницы в значениях средних скоростей на входе в конфузур и выходе из него.

При течении в конфузуре с углом раскрытия  $2\theta_0 = 30^\circ$  эти скорости отличаются в 137 раз, а это значит,

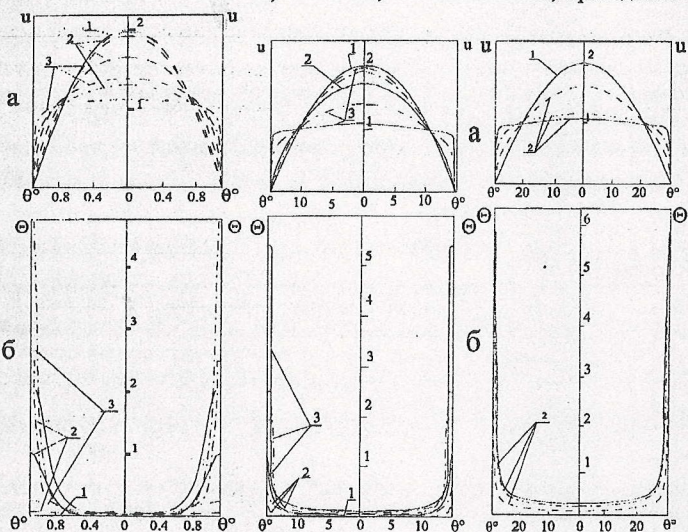


Рис. 5. Профиль скорости (а) и распределение безразмерной температуры поперек канала (б) для течения в конфузоре с  $2\theta_0 \approx 2,2^\circ$ . Штриховые линии для  $Q = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ , сплошные для  $Q = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , штрих-пунктирные для  $Q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

Рис. 6. Профиль скорости (а) и распределение безразмерной температуры поперек канала (б) для течения в конфузоре с  $2\theta_0 \approx 30^\circ$ . Штриховые линии для  $Q = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , сплошные для  $Q = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ , штрих-пунктирные для  $Q = 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ . 1- распределение для  $\xi = 1$ ; 2- 0,2; 3- 0,085

Рис. 7. Профиль скорости (а) и распределение безразмерной температуры поперек канала (б) для течения в конфузоре с  $2\theta_0 \approx 60^\circ$ . Штриховые линии для  $Q = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , сплошные для  $Q = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , штрих-пунктирные для  $Q = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . 1- распределение для  $\xi = 1$ ; 2- 0,048

что при появлении маловязкого нагретого слоя в пределах конфузора течение на большей его части, прилегающей ко входу, еще мало будет отличаться от изотермического. С увеличением расхода расплава полимера тепловой слой будет постепенно распространяться вверх по течению. Но на образование этого слоя будет затрачиваться значи-

тельная часть механической энергии. Поэтому общий перепад давления в канале будет только расти с увеличением расхода жидкости, хотя на выходе из конфузора  $|\nabla P|$  будет существенно уменьшаться вследствие уменьшения вязкости в высокотемпературном периферийном слое (рис. 6), что приведет к существенному снижению перепада давления на конфузоре по сравнению с изотермическим.

Увеличение угла раскрытия конфузора также приводит к снижению общего сопротивления канала (рис. 3) вследствие увеличения поперечного сечения канала.

В конфузоре с углом раскрытия  $2\theta_0 = 60^\circ$  средняя скорость жидкости при течении вдоль канала увеличивается почти в 600 раз, поэтому в пределах исследованного диапазона расходов неизомермические эффекты, в случае адиабатического течения, проявлялись практически только на выходе из канала (рис. 5). В этом случае заметно повышается температура на оси канала вследствие диссипации механической энергии, которая существенна, из-за градиента скорости в центральной области течения, связанного с изменением поперечного сечения канала (рис. 7).

### Обозначения (см. также [1])

$c$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·град;  $E$  – энергия активации вязкого течения, Дж/моль;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Дж/м<sup>2</sup>·с·К;  $P, P_0$  – давление текущее и на входе, Н/м<sup>2</sup>;  $Q$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $R_0, R_1, R$  – радиальная сферическая координата, формулирующая конфузора и его усеченной части, м;  $T, T_0$  – температура расплава, текущая и на входе, К;  $V$  – скорость, м/с;  $\tau$

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

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

$$\text{Re} \text{ - число Пеклс; } \Delta T_{\text{theol}} = \left. \frac{\mu(T)}{\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)} \right|_{T=T_0} = \frac{R^* T_0^2}{E} = \beta T_0 \quad \lambda \text{ - теплопроводность расплава, Вт/м·К; } \mu \text{ - ко}$$

эффициент динамической вязкости Па·с;  $\theta$  –угловая сферическая координата, рад;  $2\theta_0$  – угол раствора конфузора;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

*Индексы:* а-относящийся к окружающей среде; R,  $\theta$  – обозначают радиальную и угловую координаты вектора.

**Список литературы:** 1. 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. 2. 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.

Поступила в редколлегию 20.06.98