

ТЕПЛОМАССООБМЕН  
ММФ-96

ТОМ VI



MIF - 96  
HEAT/MASS TRANSFER

Академия наук Беларуси  
АНК "Институт тепло-  
и массообмена им. А.В. Лыкова"

**ТЕПЛОМАССОБМЕН-  
ММФ-96**

**HEAT / MASS TRANSFER-  
MIF-96**

III Минский международный форум  
(20-24 мая 1996 г.)

Том VI

**ТЕПЛОМАССОБМЕН В РЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Минск 1996

Л. М. Ульев

ОСОБЕННОСТИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ РАСПЛАВОВ  
ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ В КОНИЧЕСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФИЛЬЕРАХ

В работе моделируется течение ньютоновских расплавов полимеров с аррениусовской зависимостью вязкости от температуры [1]  $\mu(T) = \mu_0 \exp(E/R)(1/T - 1/T_0)$ , где  $\mu_0 \approx 10^3$  Па·с;  $E \approx 5(10^4 \dots 10^6)$  Дж/моль;  $T_0 \approx 470$  К в коническо-цилиндрических фильерах устройства подводного гранулирования для оптимизации его конструкции.

Большое значение вязкости и низкая теплопроводность позволяют моделировать течение расплава в элементах канала фильеры уравнениями ползущего течения, пренебрегая в уравнениях движения поперечной составляющей скорости по сравнению с продольной, а в уравнениях теплопереноса, учитывая диссипацию энергии, конвективный поперечный перенос теплоты пренебрегаем продольной теплопроводностью [2-4].

Для решения этой сопряженной по вязкости задачи ( $Gr \gg 1$ ) область течения разбивается на  $N$  концентрических конических слоев в конфузоре и цилиндрических - в цилиндре, и предполагается, что коэффициент вязкости в поперечном сечении каждого слоя постоянен и равен значению вязкости, взятом при средней по поперечному сечению этого слоя температуре, а затем решается многослойная задача для этого сечения.

Благодаря такому подходу, система уравнений движения и теплообмена редуцируется к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих средние значения температур в слоях и давление, а также алгебраические выражений для составляющих скорости в каналах фильеры [2-4].

Постановка и решение задач в конфузоре и цилиндре для граничных условий третьего рода даны в [2-4]. Для стыковки этих решений переходная область (сферический сегмент) разбивается на концентрические торондальные слои так, что это позволяет считать результаты на выходе из конфузора начальными данными для уравнений, решаемых в цилиндре.

В качестве тепловых граничных условий выбраны условия третьего рода, и, поскольку каждая фильера окружена другими фильерами, за  $\Theta_a$  принимается температура корпуса фильеры, зависящая от продольной

координаты, т. к. при погружном гранулировании температура фильерной

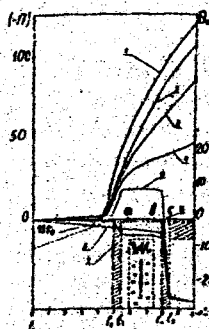


Рис. 1. Распределение безразмерных: давления (1, 2, 3, 4) вдоль канала фильеры; 5, 6, 7, 8- распределение температуры в стенке фильеры; 1, 5- фильера без обогрева; 2, 6- для  $\theta_s = 0$ ; 3, 7-  $\theta_s = -4,96$ ; 4, 8-  $\theta_s = 9,02$

плиты меняется от температуры расплава в распределительном устройстве до температуры охлаждающей жидкости со стороны ножей. Кроме того, в расчете  $\theta_s$  предполагалось, что, если отсутствует камера с теплоносителем W, то нет и теплоизолирующей прокладки  $h_1$ , а если камера W есть, то от координаты  $l_2$  до  $l_4$   $\theta_s = \theta_s$  (рис. 1).

Для изучения особенностей течения и теплообмена рассмотрим задачу с параметрами  $Re = 1591,6$ ;  $Gr = 21,2$ ;  $\beta = 1,44 \times 10^{-2}$ ;  $\Delta T_{\text{гвсч}} = 6,65$  и  $R_0 = 5,33 \times 10^{-2} \text{ м}$ ;  $A = 0,0857$ ;  $r_0 = 1,5 \times 10^{-3} \text{ м}$ ,  $2\theta_0 = 38^\circ$  и проанализируем четыре варианта теплообмена: 1) течение в фильере без камеры W; 2) течение при  $\theta_s = 0$ ; 3)  $\theta_s = -4,96$ ; 3)  $\theta_s = 9,02$ .

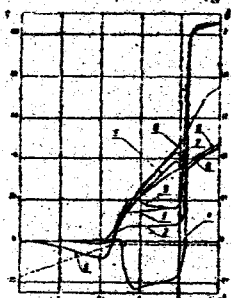


Рис. 2. Распределение безразмерного теплового потока (1, 2, 3, 4) на стенке и средней температуры жидкости (5, 6, 7, 8) вдоль канала. 1, 5- фильера без канала W; 2, 6- для  $\theta_s = 0$ ; 3, 7-  $\theta_s = -4,96$ ; 4, 8-  $\theta_s = 9,02$

В начале канала скорость жидкости мала, и во всех случаях диссипация там незначительна. Поэтому в вариантах 2), 3) и 4), когда в конструкции фильерной доски имеется теплоизолирующая прокладка  $h_1$  (рис. 1), температура  $\theta_s$  на большей части течения в конфузоре близка к  $\theta_0$ , вследствие чего распределение температуры и скорости остается почти без изменений, давление падает также очень медленно (рис. 1). Для  $\theta_s = 9,02$  расплав в конфузоре несколько нагревается

(отрицательный тепловой поток на стенке (рис. 2)), что вызывает лишь незначительное уменьшение  $|\text{grad } P|$ .

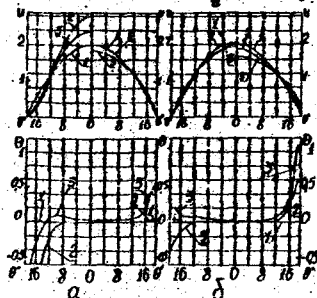


Рис. 3. Распределение безразмерных: радиальной скорости  $u(t)$  - верхние рисунки и температуры - нижние. а) левая половина для фильеры без канала W, правая с W при  $\theta_s = 0$ ; б) левая для фильеры с W при  $\theta_s = -4,96$ , правая при  $\theta_s = 9,02$ . 1- на входе в конфузор,  $R = 35,5r_0$ ; 2- при  $R = 11r_0$ ; 3- на выходе из конфузора  $R \approx 3,05r_0$

При отсутствии камеры  $\theta_n$  уменьшается вдоль конфузора интенсивнее (рис. 1), и жидкость на периферии канала охлаждается ( $q > 0$  (рис. 2)), а профиль скорости  $u = v_{co} \kappa^2$  вытягивается (рис. 3). Вследствие увеличения вязкости на периферии течения модуль градиента давления в этом случае больше, чем в остальных. Когда  $\theta_n = -4,96$  наблюдается аналогичные эффекты, но менее выражены из-за наличия теплоизолирующей прокладки  $h_1$ .

Вблизи выхода из конфузора скорость жидкости и соответственно диссипация энергии значительно возрастают, увеличивается и градиент давления (рис. 1). Повышается и температура жидкости на периферии канала (рис. 3). Даже в фильтре без камеры  $M$  температура растет, но не у стенки, где жидкость охлаждается, а вблизи оси (рис. 3). В цилиндрической части канала  $|d\Pi/dx|$  резко возрастает во всех случаях, но вследствие разных условий теплообмена его поведение различно.

В случае течения в фильтре без камеры  $M$  перепад давления наибольший, потому что на вход цилиндрического канала поступает охлажденная у стенок жидкость. Это приводит к большей диссипации и большему перепаду давления. В этом варианте и тепловой поток на стенке в начале цилиндра наибольший, т.к. здесь разность  $|\theta_n - \theta_s|$  и диссипация энергии наибольшие. Однако при  $\theta_n = -4,96$  тепловой поток  $q$  в районе прокладки  $h_1$  становится больше, т.к. в этом случае  $\theta_n$  меньше, чем в случае 1. Профиль скорости здесь несколько вытягивается, сохраняя при этом стержнеобразную форму с перегибом у стенки (рис. 4), но при малых числах  $Re$  это не будет приводить к неустойчивости. Распределение давления в случае 1) и 3) близки.

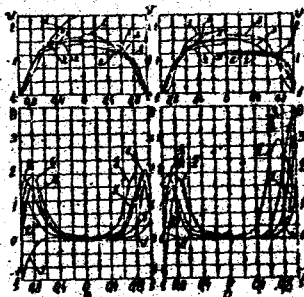


Рис. 4. Распределение безразмерных: продольной составляющей скорости в цилиндре - сверху и температуры - внизу. а) левая половина для фильтра без канала  $M$ , правая с  $M$  при  $\theta_n = 0$ ; б) левая половина  $\theta_n = -4,96$ ; правая  $\theta_n = 9,02$ . 1- распределение на входе; 2- на расстоянии  $7,2g_0$  от входа (сечение а на рис. 30); 3-  $18g_0$  (сечение б); 4-  $25,2g_0$  (сечение в); 5- распределение на выходе

При  $\theta_n = 0$  и  $\theta_n = 9,02$  жидкость на вход цилиндрического канала поступает с более развитым тепловым слоем и более плоским профилем скорости (рис. 3, 4). Для  $\theta_n = 0$   $\theta_n$  практически до прокладки  $h_1$  равна  $\theta_0$ , а изменение температуры потока на этом интервале происходит только за счет диссипации энергии. Из-за того, что  $\theta_n$  выше,

чем в ранее рассмотренных вариантах, профиль скорости здесь более плоский (рис. 4). В случае  $\Theta_s = 9,02$  при течении в конфузоре жидкость нагревается от окружающей среды,  $q$  отрицательный (рис. 2). В цилиндре за счет диссипации температура жидкости на периферии становится выше  $\Theta_s$ , а тепловой поток меняет свое направление и остается положительным до прокладки  $h_1$  (рис. 2), в пределах которой  $\Theta_s$  увеличивается,  $q$  опять изменяет знак и жидкость начинает нагреваться от теплоносителя (рис. 2, 4). В зоне между прокладками  $|dP/dx|$  уменьшается из-за уменьшения вязкости на периферии, вследствие этого же здесь наблюдается наиболее наполненный профиль скорости.

В области второй прокладки  $h_2$   $\Theta_s$  значительно уменьшается (рис. 1), и во всех рассматриваемых случаях жидкость начинает интенсивно охлаждаться на периферии, здесь быстро растет поток тепла к окружающей среде (при  $\Theta_s = 9,02$  он опять меняет знак), достигая за прокладкой  $h_2$  практически одинаковой во всех случаях величины (рис. 2), т. к. здесь  $\Theta_s$  почти не изменяется поперек пластины во всех вариантах. Профиль скорости здесь вытягивается, и, очевидно для того, чтобы сохранить более наполненный профиль скорости на выходе из фильеры, обеспечивающий получение качественного продукта [4], необходимо футеровать выходную часть канала более мощной теплоизоляцией.

В [4] показано, что тепловой режим течения расплавов термопластичных полимеров в основном определяется величиной числа  $Gn$ . При этом зависимость  $\Pi(Gn)$  оказывается столь существенной, что невозможно гранулировать ТПУ различной рецептуры, используя одну фильерную плиту. Но при наличии камеры  $W$  можно изменять перепад давления на фильерной плите, изменяя  $\Theta_s$ . На рис. 5 показана зависимость  $\Pi(\Theta_s)$  для одного и того же полимера при различных расходах. При меньшей скорости (меньшее  $Re$ ) зависимость  $\Pi(\Theta_s)$  сильнее, т. к. влияние диссипации здесь меньше, а жидкость дольше пребывает в зоне интенсивного теплообмена и более равномерно может прогреться или охладиться, поэтому гораздо сильнее влияние зависимости  $\mu(T)$ , чем при больших скоростях течения. При больших скоростях течение имеет высокотемпературный характер [4], когда вследствие диссипации на периферии образуется маловязкий сдвиговой слой, и в канале формируется стержнеобразное течение с малым градиентом давления на большей его части. Поэтому перепад давления для большего числа  $Re$  меньше (рис. 5), а за-

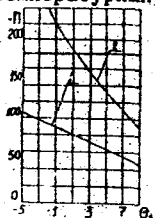
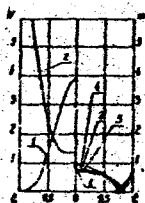


Рис. 5. Зависимость безразмерного перепада давления на фильерной доске от температуры теплоносителя в канале  $W$ . 1- течение с параметрами  $Re = 1591,6$ ;  $Gn = 21,2$ ; 2- с параметрами  $Re = 530,5$ ;  $Gn = 2,35$

висимость  $\Pi(\theta)$  слабее.



Изменяя  $\theta$ , можно подобрать перепад давления на фильерной головке, необходимый для технологического режима работы смесителя при синтезе различных марок ТПУ с помощью одной фильерной доски.

Рис. 6. Левая половина: распределение продольной скорости  $v$  и безразмерной вязкости  $\eta$  по радиусу канала на выходе из фильеры без камеры  $M$  и без теплоизолирующих прокладок  $h_1$  и  $h_2$ . Правая - распределение безразмерной вязкости  $\eta$  по радиусу канала на выходе: 1 - без  $M$ ; 2 - для  $\theta = 0$ ; 3 -  $\theta = -4,96$ ; 4 -  $\theta = 9,02$ .

Заметим, что если в конструкции фильерной плиты не будет ни камеры  $M$ , ни теплоизолирующих прокладок (5), то для некоторых марок ТПУ, например ВИТУР-1013-75, профиль скорости на выходе из такой фильеры будет вытянут, а вязкость будет сильно увеличиваться к периферии канала, в отличие от рассмотренных ранее случаев (рис. 6). При таких условиях переработки полимеров стренги получают с нерегулярной поверхностью, а при гранулировании может наблюдаться размазывание полимера по поверхности плиты или закупорка большого числа фильерных отверстий (4).

#### Обозначения

$\lambda$  - температуропроводность;  $E$  - энергия активации вязкого течения;  $\eta = \mu/\mu_0$ ;  $P, P_0$  - давление текущее и на входе;  $q = \text{Bi}(\theta_N - \theta_A)$ ;  $R^*$  - газовая постоянная;  $R$  - радиальная сферическая координата,  $R_0, R_1$  - образующие конфузора и усеченной части конфузора;  $r, r_0$  - радиус текущий и цилиндра;  $T, T_0$  - температура текущая и на входе;  $V_0$  - средняя скорость в цилиндре;  $v_{co} = V_R/V_0$ ;  $v = V_z/V_0$ ;  $z$  - продольная координата;  $\beta = R^*T_0/E$ ;  $A = R_1/R_0$ ;  $\theta = (T - T_0)/\beta T_0$ ;  $\theta, \theta_0$  - угловая сферическая координата и угол раствора конфузора;  $\kappa = R/r_0$ ;  $\xi = r/r_0$ ;  $\chi = z/r_0$ ;  $\Pi = (P - P_0)r_0/\mu_0 V_0$ ;  $Re = V_0 r_0/a$ ;  $Gr = \mu_0 V_0^2/\lambda \beta T_0$ . Индексы:  $a$  относится к окружающей среде;  $z$  - к теплоносителю.

#### Литература

1. Пономаренко В. Г., Потебня Г. Ф., Ульев Л. М. и др. // ИФХ-1990. - Т. 59, № 1. - С. 158-159.
2. Ponomarenko V.G., Potebnya G.F., Uliev L.M. // Fluid Mechanics of Soviet Research. - 1985. - V. 14, No. 4. - P. 40-50.
3. Ульев Л. М. // ТОХТ. - 1992. - Т. 26, № 2. - С. 243-253.
4. Ульев Л. М. // ТОХТ. - 1995. - Т. 29, № 3. - С. 233-241.
5. Патент № 1202446 ФРГ. Решетка погружного гранулятора термопластов/ Браун З., Роппель Ф., Шипперс Х. 21.09.72. Бюл. № 35.