

УДК 532.522:531.746.2

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЕСС-ФОРМ ПОЛИМЕРНОЙ МАССОЙ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

А.Н. Козлобродов

Томский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: akozlobrodov@gmail.com

На основе численного решения задачи о течении нелинейной вязкопластической жидкости со свободной поверхностью проводится исследование процесса заполнения цилиндрических пресс-форм. Приводится математическая постановка задачи и анализируются факторы, оказывающие влияние на процесс формования. Численные эксперименты, проведенные в широком диапазоне входных параметров задачи, позволили выявить особенности гидродинамического поведения формы свободной поверхности движущейся полимерной массы и установить влияние определяющих параметров на основные характеристики процесса.

### Введение

Качественное и бездефектное изготовление изделий из полимерных материалов (ПМ) методом литья под давлением обусловлено, главным образом, структурно-механическими (реологическими) свойствами ПМ, технологическим режимом их переработки и конструктивными особенностями используемого перерабатывающего оборудования. Поэтому для формирования научно обоснованных требований к ведению технологического процесса необходимо глубокое изучение как реологических характеристик полимерных композиций, так и наиболее важных сторон самого процесса.

Заполнение полимерной массой цилиндрических пресс-форм методом литья под давлением и методом свободного литья, характеризуется одной важной гидродинамической особенностью, которая состоит в наличии у движущейся массы свободной поверхности, контактирующей с твердыми неподвижными стенками пресс-оснастки. С этой точки зрения весь процесс заполнения пресс-форм полимерной массой есть процесс образования и развития свободной поверхности движущейся массы, вплоть до ее исчезновения к моменту завершения цикла.

Экспериментальные исследования [1, 2] показывают, что характер течения ПМ в элементах пресс-оснастки определяются совокупностью факторов, которые с некоторой условностью можно разделить на три группы:

1. Гидродинамические и реологические факторы. Сюда относятся: расход массы в пресс-форме, определяемый производительностью перерабатывающего оборудования; геометрия пресс-формы; физико-механические свойства массы (плотность, вязкость, реологические характеристики и пр.); массовые силы.
2. Теплофизические факторы. Это, в первую очередь, температурный режим формования (температура поступающей полимерной массы, температура и изоляционные качества стенок корпуса пресс-формы, температура окружающего воздуха) и теплофизические свойства самой ПМ.

3. Физико-химические факторы. К ним обычно относят факторы, связанные с процессами отверждения и определяющие в конечном итоге время и характер действия двух предыдущих групп факторов.

Исследование влияния различных факторов на процесс формования изделий из ПМ непосредственно в производственных условиях экономически невыгодно. Поэтому необходимо использовать методы физического и математического моделирования с дальнейшей проверкой и внедрением полученных результатов в производство. При математическом моделировании одновременный учет всего комплекса факторов весьма затруднителен. В этой связи представляется целесообразным, основываясь на экспериментальных данных, упростить задачу, рассматривая влияние отдельных, наиболее важных с данной точки зрения факторов. Проведенные исследования [3–9] показывают, что форма свободной поверхности движущейся массы в элементах пресс-оснастки определяется, главным образом, гидродинамическими и реологическими параметрами технологического режима формования изделий из ПМ.

### Математическая постановка задачи

При математической постановке задачи предполагается, что течение является ламинарным, изотермичным и осесимметричным, а характерное время гидродинамического процесса намного больше времени релаксации напряжений движущейся полимерной массы. В этом случае система уравнений, описывающая процесс заполнения вертикально расположенных пресс-форм реологически сложной жидкостью в цилиндрической системе координат  $(z, r, \varphi)$  с использованием безразмерных переменных, запишется в виде [4]

$$\operatorname{Re} \left( \frac{\partial v_r}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r^2)}{\partial r} + \frac{\partial (v_r v_z)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + B \left( \nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} \right) + 2 \frac{\partial B}{\partial r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial B}{\partial z} \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$\operatorname{Re} \left( \frac{\partial v_z}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r v_z)}{\partial r} + \frac{\partial v_z^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + B \nabla^2 v_z + \frac{\partial B}{\partial r} \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + 2 \frac{\partial B}{\partial z} \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\operatorname{Re}}{\operatorname{Fr}}, \quad (2)$$

$$\Delta p = -\operatorname{Re} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (r v_r^2)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial^2 (r v_r v_z)}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^2 v_z^2}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial B}{\partial r} \nabla^2 v_r + 2 \frac{\partial B}{\partial z} \nabla^2 v_z + 2 \frac{\partial^2 B}{\partial r^2} \frac{\partial v_r}{\partial r} + 2 \frac{\partial^2 B}{\partial r \partial z} \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + 2 \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} \frac{\partial v_z}{\partial z}. \quad (3)$$

В уравнениях (1–3)  $\tau$  – время;  $r, z$  – оси координат;  $v_r, v_z$  – соответствующие им компоненты вектора скорости;  $p$  – давление;  $\operatorname{Fr} = U^2/(gL)$  – число Фруда.

В соответствии с реологической моделью Шульмана [10] обобщенное число Рейнольдса ( $\operatorname{Re}$ ) и эффективная вязкость жидкости ( $B$ ) определяются в виде:

$$\operatorname{Re} = \rho U^{2-n/m} L^{n/m} / \mu^{n/m}; \quad B = [\operatorname{Se}^{1/n} + I_2^{1/n}]^n / (I_2 + \varepsilon_0), \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $L$  – характерный линейный размер, в качестве которого выбирается радиус трубы  $R$  в случае заполнения круглой трубы или разность между радиусом внешнего цилиндра  $R_2$  и внутреннего –  $R_1$  при заполнении канала соосноцилиндрического типа;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости;  $U$  – среднерасходная скорость, определяемая через объемный расход жидкости –  $Q$  и площадь поперечного сечения канала –  $S$ ; безразмерный параметр нелинейной вязкопластичности  $\operatorname{Se} = \tau_0 L^{n/m} / (U^{n/m} \mu^{n/m})$ , где  $\tau_0$  – предел текучести.

Для записи уравнений (1–3) в качестве безразмерных переменных выбраны:

$$\bar{r} = \frac{r}{L}; \quad \bar{z} = \frac{z}{L}; \quad \bar{v}_z = \frac{v_z}{U}; \quad \bar{v}_r = \frac{v_r}{U}; \quad \bar{\tau} = \frac{\tau \cdot U}{L}; \quad \bar{p} = (p - p_0) (L / (\mu U))^{n/m},$$

Для того, чтобы иметь возможность вести сквозной счет при расчете течений вязкопластичной жидкости, в выражение для  $B$  в (4) вводится малый параметр  $\varepsilon_0$ , значение которого выбирается таким образом, чтобы эффективная вязкость в области вязкого течения составляла  $\approx 10^{-4}$  от вязкости в области ядра потока ( $\varepsilon_0 = 0$ ) при решении задач динамики нелинейной вязкопластичной жидкости.

Выражение для интенсивности скоростей деформации  $I_2$ , входящее во второе из соотношений (4), можно записать как

$$I_2 = \sqrt{2 \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2}.$$

Начальные и граничные условия также записываются в безразмерной форме.

Предполагается, что в момент времени  $t=0$  свободная поверхность массы  $S_f$  находится на уровне  $J_H$  и

является плоской, а на всех неподвижных твердых границах  $\Gamma_i (i=1, 2)$  выполняется условие прилипания

$$v_z = v_r = 0. \quad (5)$$

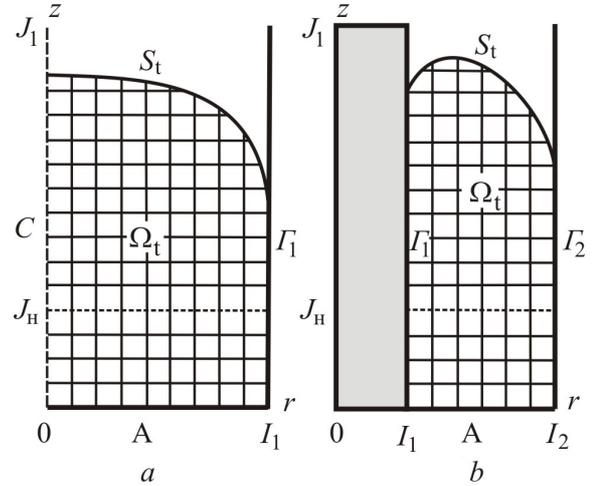


Рис. 1. Границы расчетной области: а) круглая труба; б) соосные цилиндры;  $z, r$  – оси координат;  $\Omega_t$  – расчетная область;  $S_t$  – граница свободной поверхности;  $A$  – входная граница;  $C$  – ось симметрии;  $\Gamma_i (i=1, 2)$  – неподвижные твердые границы;  $I_k, J_k$  – номера узлов

На входной границе  $A$  (рис. 1) задается профиль скорости, соответствующий стабилизированному течению данной полимерной композиции в рассматриваемом канале

$$v_z = f(r); \quad v_r = 0. \quad (6)$$

Вид функции  $f(r)$  в выражении (6) зависит от реологических свойств жидкости и геометрии заполняемой пресс-формы. Проведенные численные эксперименты показали, что задание на входной границе профиля скорости (функции  $f(r)$ ) в виде, соответствующем течению заданной жидкости в рассматриваемом канале, не оказывают заметного влияния на картину течения по сравнению с ньютоновским профилем скорости. Это можно объяснить тем, что расстояние от входной границы до первоначального положения свободной поверхности превышает длину начального гидродинамического участка. Поэтому в дальнейших расчетах на входной границе граничные условия для аксиальной составляющей скорости записываются в виде:  $v_z = 2(1-r^2)$  в случае заполнения круглой трубы и

$$v_z = \frac{2 \left( R_1^2 - r^2 + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln(R_2/R_1)} \ln \left( \frac{r}{R_1} \right) \right)}{(R_2^2 + R_1^2 - (R_2^2 - R_1^2) / \ln(R_2/R_1))},$$

если рассматривается заполнение соосноцилиндрического канала, а радиальная составляющая скорости  $v_r$  в обоих случаях полагается равной нулю [3].

В случае заполнения круглой трубы условия на оси симметрии  $C$  имеют вид

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad v_r = 0; \quad \frac{\partial B}{\partial r} = 0. \quad (7)$$

На свободной поверхности  $S_f$  задаются два граничных условия: равенство нормального напряжения давлению в среде, граничащей с жидкостью, и отсутствие касательного напряжения. Эти условия записываются в локальной системе координат  $(n, s, \theta)$ , связанной с каждой точкой свободной поверхности, и имеют вид

$$p = 2B \frac{\partial u_n}{\partial n}; \quad \frac{\partial u_s}{\partial n} + \frac{\partial u_n}{\partial s} - \frac{u_s}{R_s} = 0, \quad (8)$$

где  $R_s$  – радиус кривизны свободной поверхности.

Величина эффективной вязкости  $B$ , входящая в первое из уравнений (8), определяется выражением (4). Интенсивность скоростей деформации  $I_2$  в локальной ортогональной криволинейной системе координат  $(n, s, \theta)$  можно представить в виде [3]:

$$I_2 = \left[ 2 \left( \frac{\partial u_n}{\partial n} \right)^2 + 2 \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u_s}{\partial s} + \frac{u_n}{R_s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Кроме того, на свободной поверхности должно выполняться кинематическое условие

$$\frac{dz}{dt} = v_z, \quad \frac{dr}{dt} = v_r.$$

Таким образом, для решения поставленной задачи используется система, состоящая из двух уравнений движения в направлениях  $r$  и  $z$ , уравнения Пуассона для давления и уравнения, связывающего эффективную вязкость с полем скорости.

Численное решение задачи находится методом конечных разностей. Для этого заданная расчетная область  $\Omega_r$  (рис. 1) покрывается эйлеровой сетью ячеек с размерами  $h_1$  и  $h_2$  соответственно в аксиальном и радиальном направлениях. Сам метод решения разностных аналогов исходной системы дифференциальных уравнений, использующий итерационные схемы либмановского типа, достаточно подробно изложен в работах [3, 4]. Там же описывается и оригинальная методика реализации граничных условий на свободной поверхности в точной постановке.

Для эквивалентности решения краевой задачи, описываемой системой уравнений (1–4), с соответствующими начальными и граничными условиями, решению задачи, описываемой системой, состоящей из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

и уравнений (1, 2, 4, 9), требуем выполнения уравнения неразрывности на всех границах расчетной области. Это гарантирует консервативность поля скорости внутри области.

Таким образом, получили математическую формулировку задачи об осесимметричном течении нелинейной вязкопластической жидкости со свободной поверхностью для описания процесса заполнения цилиндрических пресс-форм полимерной массой.

## Результаты расчета

Рассмотрим заполнение вертикального круглой трубы и канала соосно цилиндрического типа полимерной массой (рис. 1).

На основе метода, достаточно подробно изложенного в [3], разработан алгоритм и создана программа расчета процесса заполнения цилиндрических каналов реологически сложной жидкостью. Задачей численного исследования является определение положения и формы свободной поверхности, а также нахождение полей скорости, давления и напряжения в потоке нелинейной вязкопластической жидкости.

Проведенные расчеты показали довольно быструю сходимость итерационного процесса (число итераций до сходимости по  $\varepsilon=10^{-3}$  находилось в диапазоне 100–150) и устойчивость используемой разностной схемы в широком диапазоне изменения входных параметров. В качестве входных параметров при расчете течений указанного типа использовали реологические константы  $n$ ,  $m$ , критерии  $Re$ ,  $Fr$ , а также параметр нелинейной вязкопластичности  $Se$ . В работах [3–5] путем анализа размерностей установлено, что одной из главных характеристик процесса является величина  $W$ , являющаяся отношением  $Re/Fr$ , которая, как комбинация двух критериев подобия, также является критерием подобия. Кроме того, необходимо отметить, что в случае, когда рассматривается течение нелинейно-вязкой жидкости, т. е. жидкости без предела текучести ( $Se=0$ ), гидродинамическая картина потока определяется числами  $Re$ ,  $Fr$  и отношением параметров  $n/m$ . Когда же  $Se \neq 0$ , необходимо знать значение параметров  $n$ ,  $m$  в отдельности.

Рассмотрим некоторые результаты расчета.

На рис. 2 показано развитие формы свободной поверхности и изменение ее положения во времени для двух режимов заполнения цилиндрического канала.

Из представленного рисунка видно, что при достижении высоты, равной примерно  $1,5D$  ( $D$  – диаметр канала), наблюдается установление формы свободной поверхности. Сравнение случаев  $a$ ) и  $b$ ) показывает, что увеличение  $W$  приводит к тому, что фронт движущейся массы становится более плоским. Оценки, проведенные на основе анализа расходных характеристик, показали, что погрешность в обоих случаях не превышает 5 %.

На рис. 3 и 4 демонстрируется влияние основных гидродинамических параметров на установившуюся форму свободной поверхности.

Как видно из рис. 3, при фиксированном значении реологических констант  $n$  и  $m$  и параметра нелинейной вязкопластичности  $Se$  увеличение числа  $W$  приводит к тому, что фронт движущейся полимерной массы приобретает более плоскую форму, и величина  $h_{max}$ , определяющая максимальное возвышение фронта, при этом уменьшается ( $h$  – безразмерная величина, равная разности между текущей

координатой  $z$  свободной поверхности и координатой  $z$ , соответствующей точке прилипания свободной границы к стенке канала).

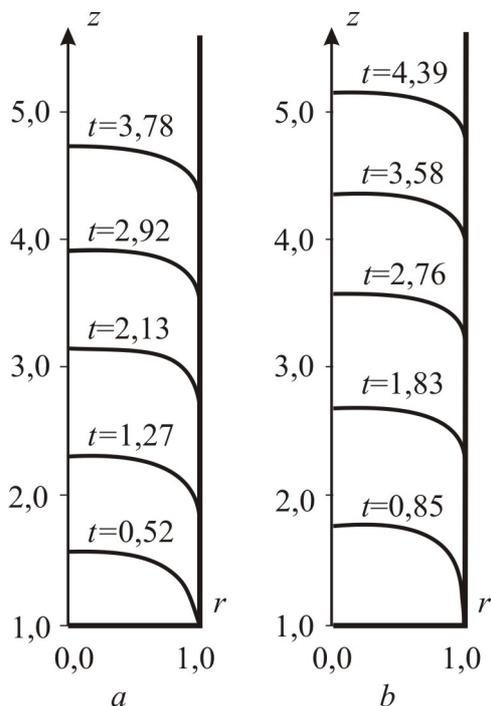


Рис. 2. Изменение положения и формы свободной поверхности: а)  $Re=1,14 \cdot 10^{-5}$ ,  $Fr=1,52 \cdot 10^{-7}$ ,  $Se=0$ ,  $n/m=0,7$ ; б)  $Re=2,76 \cdot 10^{-4}$ ,  $Fr=9,52 \cdot 10^{-8}$ ,  $Se=8,12$ ,  $n=0,7$ ,  $m=1,0$

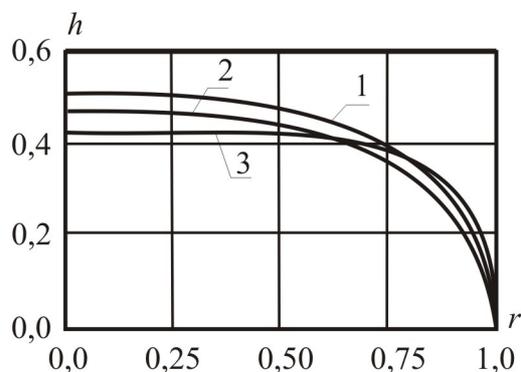


Рис. 3. Форма свободной поверхности в зависимости от  $W$  при  $Se=0$ ;  $n/m=0,7$ : 1) 89,3; 2) 294; 3) 2330

На рис. 4 для двух значений критерия  $W$  (кривые 1, 2 и 3, 4) показано влияние параметра  $Se$ . Представленные результаты показывают, что с увеличением  $Se$  форма свободной поверхности также становится более плоской, довольно хорошо просматривается область стержневого течения. Кроме того, результаты, приведенные на данном рисунке, еще раз иллюстрируют влияние параметра  $W$ .

Одной из особенностей движения жидкости со свободной поверхностью является наличие зоны двумерного течения. В этой зоне помимо аксиального течения жидкости наблюдается интенсивное радиальное течение. Поэтому представляется интересным проследить за изменением радиальной

скорости в прифронтной области и тем самым определить границы двумерной зоны течения.

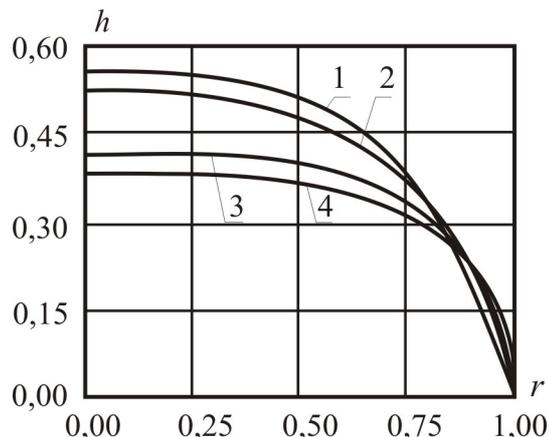


Рис. 4. Влияние параметра  $Se$  на форму свободной поверхности: 1, 2)  $W=54,8$ ,  $n=1$ ,  $m=1$ ,  $Se=0,16$ ,  $Se=1,63$ , 3, 4)  $W=3330$ ,  $n=0,7$ ,  $m=1$ ,  $Se=1,89$ ,  $Se=143$

На рис. 5 показано распределение радиальной составляющей вектора скорости, построенное по ее значениям в узлах разностной сетки, находящихся на различном расстоянии от свободной поверхности при  $Re=1,45 \cdot 10^{-6}$ ,  $Fr=1,62 \cdot 10^{-7}$ ,  $Se=0,6$ ,  $n=0,7$ ,  $m=1,0$ .

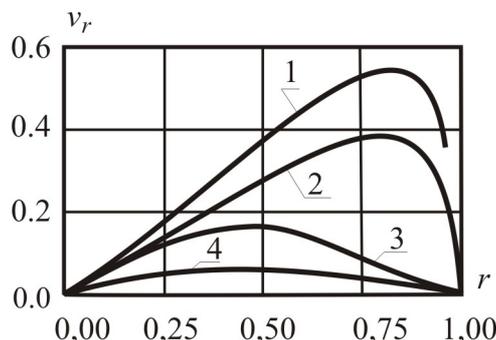


Рис. 5. Распределение радиальной скорости по сечению канала на различном расстоянии от свободной поверхности: 1) 0,13D; 2) 0,26D; 3) 0,43D; 4) 0,6D

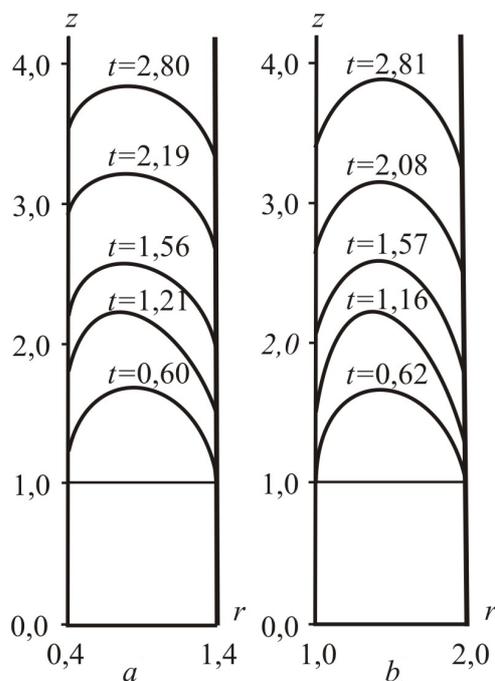
Как видно из рис. 5, радиальная скорость падает по мере удаления от свободной поверхности. На расстоянии порядка  $0,7D$  радиальная составляющая скорости практически отсутствует. Этот результат позволяет сделать вывод о том, что в установившемся режиме область двумерного течения распространяется примерно на  $0,7$  калибра от максимального возвышения фронта топливной массы, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными [1].

Расчет процесса заполнения канала соосно-цилиндрического типа несколько усложняется и требует больших затрат машинного времени по сравнению с круглой трубой той же длины. Время расчета одного варианта для трубы в среднем в 1,5 раза меньше, чем в данном случае. Это связано с тем, что при заполнении канала соосно-цилиндриче-

ского типа свободная поверхность жидкости имеет более сложную форму, и число итераций на одном шаге по времени возрастает.

При численном исследовании процесса заполнения таких каналов наряду с реологическими параметрами и критериями, рассмотренными в предыдущем параграфе, необходимо учитывать соотношение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров  $R_2/R_1$ , которое оказывает существенное влияние на гидродинамическую картину течения.

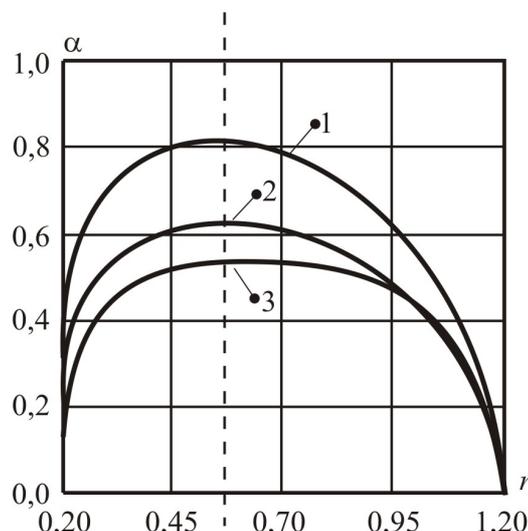
На рис. 6 показано изменение положения и формы свободной поверхности при заполнении канала соосно-цилиндрического типа для двух режимов течения. Из представленных рисунков видно, что форма свободной поверхности в обоих случаях устанавливается, претерпев определенную трансформацию. Положение максимального возвышения фронта на этих рисунках показывает, что с увеличением отношения  $R_2/R_1$  наблюдается смещение максимума в сторону внутреннего цилиндра (в случае *a*)  $R_2/R_1=3,5$ , а в случае *b*)  $R_2/R_1=2$ .



**Рис. 6.** Изменение положения и формы свободной поверхности: а)  $Re = 1,79 \cdot 10^{-4}$ ,  $Fr = 3,42 \cdot 10^{-7}$ ,  $Se = 389$ ,  $n=0,7$ ,  $m=1,0$ ; б)  $Re=5,54 \cdot 10^{-5}$ ,  $Fr=6,16 \cdot 10^{-6}$ ,  $Se=0$ ,  $n/m=0,75$

Аналогичный результат имеет место при течи вязкой жидкости в зазоре между круговыми цилиндрами для осевой скорости [11]. Кроме того, характер поведения свободной границы в рассмотренных случаях говорит о том, что, как и при течи в круглой трубе, с увеличением критериев  $W$  и  $Se$  свободная поверхность жидкости становится более плоской.

Влияние этих критериев на форму свободной поверхности в установившемся потоке при фиксированном соотношении радиусов внутреннего и внешнего цилиндров ( $R_2/R_1=6$ ) и значениях реологических параметров  $n$  и  $m$  иллюстрирует рис. 7.



**Рис. 7.** Форма свободной поверхности при  $R_2/R_1=6$ ;  $n=0,7$ ;  $m=1,0$ : 1)  $W=45,5$ ,  $Se=0$ ; 2)  $W=2,26 \cdot 10^4$ ,  $Se=0$ ; 3)  $Se=37,9$

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что положение точки, определяющей максимальное возвышение фронта, не зависит от  $W$  и  $Se$  и полностью определяется отношением  $R_2/R_1$ . Поведение кривых 1 и 2 показывает, что при заданном значении параметра  $Se$  увеличение  $W$  ведет к выполаживанию свободной границы и уменьшению расстояния между точками прилипания на внутренней и внешней боковой поверхности цилиндров. Такое же влияние оказывает и рост параметра  $Se$  при фиксированном значении  $W$  (кривые 2, 3).

### Выводы

Проведено численное исследование процесса заполнения крупногабаритных пресс-форм методом литья под давлением. Рассмотрены характерные особенности, присущие рассматриваемому процессу. На основе анализа экспериментальных данных показано, что для исследования течений высоковязких полимерных композиций наиболее подходящей со всех точек зрения является реологическая модель, предложенная З.П. Шульманом. На основе разработанного численного метода получено численное решение задач о заполнении круглой трубы и канала соосно-цилиндрического типа. Для каждой задачи приводятся характерные особенности течения и приводятся основные результаты расчета. Выяснено влияние реологических параметров и условий течения на гидродинамическую картину потока, форму свободной поверхности, поля скоростей и давлений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудин И.В., Ищенко В.П., Малкин А.И. Экспериментальное исследование течения наполненного полимера при наличии свободной поверхности // Тепло- и массообмен. – Минск, 1972. – Т. 3. – С. 167–172.
2. Шрагер Г.Р., Козлобродов А.Н., Якутенок В.А. Моделирование гидродинамических процессов в технологии переработки полимерных материалов. – Томск: Изд-во ТГУ, 1999. – 230 с.
3. Ищенко В.П., Козлобродов А.Н. Заполнение вертикальных цилиндрических каналов неньютоновской жидкостью // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1985. – Вып. 2. – № 10. – С. 34–42.
4. Smith T.G., Wilkes J.O. Laminar free surface flow into a vertical cylinder // Comput. and Fluids. – 1975. – V. 3. – № 1. – P. 51–68.
5. Козлобродов А.Н., Шрагер Г.Р. Анализ напряженного состояния поверхностного слоя полимерной массы при заполнении крупногабаритных пресс-форм // Механика композитных материалов. – 2001. – № 4. – С. 559–575.
6. Березин И.К., Голубицкий А.М., Иванов В.А. Растекание неньютоновских жидкостей под действием силы тяжести // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 58. – № 3. – С. 447–455.
7. Липанов А.М., Альес М.Ю., Константинов Ю.Н. Численное моделирование ползущих течений неньютоновских жидкостей со свободной поверхностью // Математическое моделирование. – 1993. – Т. 5. – № 7. – С. 3–9.
8. Хусид Б.М. Растекание неньютоновской жидкости по горизонтальной плоскости с интенсивными процессами тепло- и массообмена на поверхности слоя // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 45. – № 1. – С. 51–60.
9. Смольский Б.М., Шульман З.П., Гориславец В.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов. – Минск: Наука и техника, 1970. – 440 с.
10. Шульман З.П. Конвективный теплообмен реологически сложных жидкостей. – М.: Энергия, 1975. – 352 с.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.

Поступила 28.06.2006 г.

УДК 621.313.333:658.562

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

О.О. Муравлева, П.В. Тютева

Томский политехнический университет

E-mail: MuravlevaOO@tpu.ru, TyutevaPV@sibmail.com

*Предложено новое направление совершенствования асинхронных двигателей для регулируемого электропривода при изменении массогабаритных показателей, что позволит улучшить энергетические показатели и уменьшить затраты, приходящиеся на срок эксплуатации. Проанализированы результаты математического моделирования. Произведен расчет экономической эффективности при проектировании энергоэффективных асинхронных двигателей.*

### Введение

Энергосбережение, точнее рационализация производства, распределения и использования всех видов энергии, стало одним из основных приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Потенциал энергосбережения в России по оценкам специалистов составляет 40...45 % современного энергопотребления в стране, что составляет 360...430 млн т условного топлива. Треть этого потенциала экономии имеют отрасли топливно-энергетического комплекса, другая треть сосредоточена в энергоемких отраслях промышленности и строительстве, свыше 25 % – в жилищно-коммунальном хозяйстве, 7 % – на транспорте и 3 % – в сельском хозяйстве [1]. Европейский же потенциал в энергосбережении оценивается в 160 млн т условного топлива, что существенно ниже данного показателя в России. Энергоемкость выпускаемой отечественной продукции, как правило, в 2,5...3 раза выше, чем в Европе и США, что дает основание рассматривать российский потенциал энергосбережения как огромный, пока не используемый должным образом ресурс экономического и социального развития, сосредоточенный во всех сферах практической деятельности.

Структура потребителей электроэнергии в России выглядит примерно следующим образом: электроприводы – 60 %, электрический транспорт – 9 %, электротермия и электротехнология – 10 %, освещение и прочие потребители – 21 %. По данным европейских экспертов стоимость электроэнергии, потребляемой ежегодно средним двигателем в промышленности, в 5 раз превосходит его собственную стоимость. Очевидно, что за время службы двигателя (десять лет) энергетическая составляющая несоизмеримо выше составляющей, связанной с капитальными затратами, в связи с чем забота об оптимизации именно энергетической составляющей является особенно важной.

Современный уровень развития силовой электроники, микропроцессорных систем управления и контроля, теории и средств автоматического регулирования позволяет широко использовать эти теоретические и технические достижения для решения задач энерго- и ресурсосбережения. Современные преобразователи частоты обеспечивают качество регулирования скорости асинхронных двигателей (АД), не уступающее приводам постоянного тока. Хорошо известные преимущества