

DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.3.25

УДК 679.743.1:519.63

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ АНОМАЛЬНО ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

М.В. Бачурина, А.В. Казаков, Н.М. Труфанова

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация*

В статье рассмотрены постановка и численная реализация задачи моделирования процесса тепло- и массопереноса перерабатываемых совместно полимерных материалов с различными физико-реологическими свойствами. Поскольку в современном производстве используется все больше видов искусственных полимерных материалов, а наиболее рациональным и удобным способом их переработки и формования готового изделия является экструзия, необходимость решения подобной задачи возникает весьма часто, в частности в процессе наложения многослойных полимерных покрытий. Трехслойное покрытие формируется из расплавов полимеров, свойства которых могут меняться в достаточно широких диапазонах. Кроме того, такое свойство этих материалов как вязкость, как правило, проявляет нелинейную зависимость от температуры и интенсивности деформации, что в значительной степени затрудняет прогнозирование и результатов взаимодействия стратифицированных потоков (слоев) на участках их совместного течения, и геометрических размеров получаемого многослойного покрытия. Цель данного исследования можно определить как осуществление оценки геометрии существующего формирующего инструмента с точки зрения ее рациональности, выявление условий стабильности границ раздела в стратифицированном потоке и экспериментальное определение взаимосвязи толщин накладываемых слоев полимерных материалов с изменением некоторых технологических параметров. Для упрощения постановки задачи реальные физические процессы заменяются математической моделью, представляющей собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, отражающих основные законы сохранения. Совокупность уравнений в частных производных описывает поведение anomalously вязких жидкостей в условиях вынужденного движения и теплообмена. Для однозначной идентификации моделируемого процесса, вышедшего на стационарный режим, сформированная система уравнений дополняется граничными условиями и физико-реологическими свойствами перерабатываемых материалов. В модели учитываются также естественные и технологические ограничения и допущения. Модель реализуется с помощью универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS. Для подтверждения адекватности выбранного численного метода решения оценены параметры его сходимости, проведен сравнительный расчет для формирующего инструмента, работающего в режимах заданного расхода и перепада давления в его каналах. Графически показано влияние на толщины накладываемых слоев изменения некоторых технологических параметров процесса экструзии. Отмечается возможность применения предлагаемой модели в системе автоматизированного управления линией формования трехслойного полимерного покрытия.

*Ключевые слова:* численные исследования, стратифицированное течение, математическое моделирование, формирование многослойного покрытия, реология

## NUMERICAL STUDY OF MECHANISMS OF ABNORMALLY VISCOUS LIQUID FLOWS

M.V. Bachurina, A.V. Kazakov and N.M. Trufanova

*Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation*

The paper presents formulation and numerical implementation of the heat and mass transfer problem in recycled polymer materials with different physical and rheological properties. Since modern production uses more and more synthetic polymeric materials and the most efficient and convenient method of processing and forming of finished products is extrusion, the necessity in solving this problem occurs quite often, for example, in the process of superimposing multilayer coatings. Three-layer coating is usually made from polymer melts, the properties of which can vary over a fairly wide range. Furthermore, the viscosity of these materials depends nonlinearly on temperature and intensity of their deformation, which greatly hampers forecasting the results of interaction of stratified flows in the regions of their concurrent motion and the geometric dimensions of the resulting coating stack. The goal of this study is to assess the geometry of the available forming tool, the stability of an interface between stratified flows and to determine experimentally the dependence of the thickness of layers of polymeric materials on some process parameters. In order to simplify the problem, actual physical processes are represented by a mathematical model, which is a system of nonlinear differential equations that admit basic conservation laws. The set of partial differential equations describes the behavior of anomalously viscous liquids in conditions of forced motion and heat. For unambiguous identification of the simulated process reaching the stationary regime, the system of equations is supplemented with boundary conditions and physical and rheological properties of the tested materials. The model takes into account natural and technological limitations and assumptions. The model is implemented using a general purpose finite element code ANSYS. To verify the efficiency of the method, its parameter convergence is evaluated, and a comparative analysis is performed for forming tool operating under constant flow rate and pressure drop. The dependence of the thickness of superimposed layers on some technological parameters of the extrusion process is represented graphically. The possibility of applying the proposed model to a system of automated control for three-layer polymeric coating forming line is demonstrated.

*Key words:* numerical study, stratified flow, mathematical modeling, formation of multi-layer coating, rheology

### 1. Введение

Зачастую в современном производстве возникает потребность в одновременном наложении на поверхность нескольких слоев полимерных материалов с различными физико-реологическими свойствами. Изначально полимерное покрытие создается, как правило, в формирующем инструменте, поэтому изучение течения в его каналах потоков (слоев) материалов с различными свойствами является

актуальным. При этом процесс течения определяется нелинейным характером зависимости вязкости расплава как от температуры, так и от тензора скоростей деформации [1]. Особый интерес представляют участки совместного течения разнородных расплавов полимерных композиций, так как исследования показывают [2], что стабильность границы раздела существенно влияет на результат всего процесса. Наблюдать данные явления непосредственно весьма затруднительно, так как они происходят внутри закрытых каналов истечения. Все же распределение материалов проследить можно, например, посредством моментального охлаждения инструмента с его последующим разбором и продольным разрезом канала. Далее с помощью специальных приемов можно получить картину распределения отдельных потоков [3–6]. Однако такой путь весьма затратен, трудоемок и подходит к каналам простой формы. Для анализа процессов течения полимеров в каналах сложной формы более приемлемо численное моделирование [7, 8], которое весьма успешно применяется разными авторами для решения задач течения вязких высокоаномальных жидкостей [9, 10].

## 2. Постановка задачи и метод решения

Процесс двуслойного неизотермического течения аномально вязких жидкостей описан, например, в [11, 12]. Геометрия каналов формующего инструмента показана на рисунке 1. Ее, с некоторыми упрощениями, можно рассматривать в цилиндрической системе координат  $r-\zeta$ . Математическое представление процессов теплообмена расплавов полимера при стратифицированном течении основывается на законах сохранения [13].

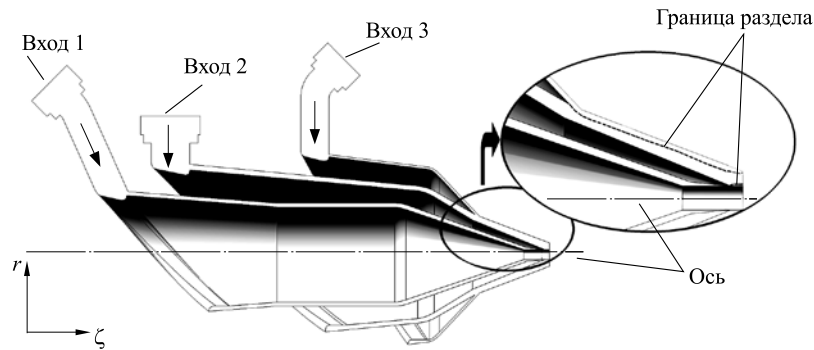


Рис. 1. Конфигурация формующего инструмента

Для упрощения постановки задачи теплопереноса при совместном протекании аномально вязких жидкостей в коническо-цилиндрических каналах формующего инструмента был сделан ряд допущений:

- процесс течения стационарный;
- формующая среда несжимаема, не проявляет упругих свойств [15];
- массовые силы значительно меньше поверхностных;
- течение осесимметричное;
- на подвижной (цилиндрическая внутренняя стенка канала на участке совместного течения трех потоков) и неподвижных (остальные стенки, образующие коническо-цилиндрические каналы) границах выполняются условия прилипания и непроницаемости;
- теплофизические характеристики деформируемой среды постоянны.

С учетом допущений система дифференциальных уравнений в скоростях для каждого из потоков имеет следующий вид [13, 14]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\zeta}{\partial \zeta} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot 2\mu_3^i \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \mu_3^i \left( \frac{\partial v_\zeta}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} \right) \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \zeta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \mu_3^i \left( \frac{\partial v_\zeta}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( 2\mu_3^i \frac{\partial v_\zeta}{\partial \zeta} \right), \quad (3)$$

$$\rho^i C^i \left( v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_\zeta \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) = \lambda^i \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial \zeta^2} \right) + \Phi, \quad (4)$$

где индекс  $i$  определяет номер потока (слоя) и соответствующий ему материал;  $r$ ,  $\zeta$  — радиальная

и продольная цилиндрические координаты;  $v_r, v_\zeta$  — компоненты вектора скорости;  $\Phi$  — диссипативный источник тепла;  $P$  — давление;  $T$  — температура;  $\rho$  — плотность;  $C$  — теплоемкость;  $\lambda$  — теплопроводность;  $\mu_\Theta^i$  — эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры:

$$\mu_\Theta^i = \mu_0^i e^{-\beta^i(T-T_0)} (I_2/2)^{(n^i-1)/2}, \quad (5)$$

где  $\mu_0$  — начальная вязкость при  $T_0$ ;  $\beta$  — температурный коэффициент вязкости;  $n$  — коэффициент аномалии вязкости;  $I_2$  — второй инвариант тензора скоростей деформации.

Наличие вязкости у несжимаемой жидкости служит причиной диссипации энергии [16]. Диссипация механической энергии жидкой среды происходит за счет превращения работы внутренних сил трения в тепловую энергию и определяется выражением  $\Phi = \mu_\Theta^i (I_2/2)$  [17].

Система дифференциальных уравнений (1)–(4) замыкается следующими граничными условиями:

- на неподвижных стенках компоненты скорости потока равняются нулю;
- на границе контакта жидкости с подвижной стенкой продольная компонента скорости и скорость движения стенки одинаковы;
- на входе в каналы известно давление;
- на выходе выполняются условия второго рода по скорости и температуре;
- температура неподвижных стенок каналов составляет 443К;
- расплавы полимеров на выходе из экструдера имеют температуру 423К;
- температура подвижной стенки равняется 383К;
- на границах раздела потоков имеют место граничные условия [18]:
  - по напряжениям

$$\begin{aligned} (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{r\zeta} \cos(\zeta, n))|_1 &= (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{r\zeta} \cos(\zeta, n))|_2, \\ (\tau_{r\zeta} \cos(r, n) + \tau_{\zeta\zeta} \cos(\zeta, n))|_1 &= (\tau_{r\zeta} \cos(r, n) + \tau_{\zeta\zeta} \cos(\zeta, n))|_2, \\ (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{r\zeta} \cos(\zeta, n))|_2 &= (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{r\zeta} \cos(\zeta, n))|_3, \\ (\tau_{r\zeta} \cos(r, n) + \tau_{\zeta\zeta} \cos(\zeta, n))|_2 &= (\tau_{r\zeta} \cos(r, n) + \tau_{\zeta\zeta} \cos(\zeta, n))|_3; \end{aligned} \quad (6)$$

– по скоростям

$$\begin{aligned} v_r|_1 &= v_r|_2, & v_\zeta|_1 &= v_\zeta|_2, \\ v_r|_2 &= v_r|_3, & v_\zeta|_2 &= v_\zeta|_3; \end{aligned} \quad (7)$$

– по потокам тепла

$$\begin{aligned} q_r|_1 &= q_r|_2, & q_\zeta|_1 &= q_\zeta|_2, \\ q_r|_2 &= q_r|_3, & q_\zeta|_2 &= q_\zeta|_3; \end{aligned} \quad (8)$$

– по температуре

$$T|_1 = T|_2, \quad T|_2 = T|_3, \quad (9)$$

где индексы 1, 2, 3 — номера потоков (слоев) стратифицированного течения (Рис. 1);  $q_r, q_\zeta$  — потоки тепла в направлении соответствующих осей;  $\tau_{rr}, \tau_{r\zeta}, \tau_{\zeta\zeta}$  — нормальные и касательные напряжения, определяемые как

$$\tau_{rr} = 2\mu_\Theta^i \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad \tau_{r\zeta} = \mu_\Theta^i \left( \frac{\partial v_\zeta}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} \right), \quad \tau_{\zeta\zeta} = 2\mu_\Theta^i \frac{\partial v_\zeta}{\partial \zeta}. \quad (10)$$

Свойства полимерных жидкостей представлены в таблице.

Таблица. Физико-реологические свойства исследуемых материалов

Номер потока $i$	Начальная вязкость $\mu_0$ , Па·с	Температурный коэффициент вязкости $\beta$ , 1/К	Показатель аномалии вязкости $n$	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(кг·К)
2	14946	0,0168	0,54	779	0,182	2500
1, 3	38523	0,0027	0,25	1080	0,22	2100

Сформулированная система дифференциальных уравнений (1)–(4), дополненная реологическими уравнениями (5), граничными условиями (6)–(9), физическими уравнениями (10) и свойствами материалов (Табл.), решалась численно; итерационная процедура, идентичная описанной в [19], реализована в рамках конечно-объемного программного комплекса ANSYS Fluent.

Для оценки повторяемости решения для различных граничных условий, обеспечивающих получение одинаковых толщин результирующих полимерных слоев, проведено два расчета: один при работе формующего инструмента в режиме заданного расхода, другой — в режиме заданного перепада давления в его каналах.

Для сравнения данных, найденных по модели с заданными расходами (назовем ее «модель  $Q$ ») с результатами, полученными по модели с заданными перепадами давления («модель  $P$ ») были вычислены поля температур, скоростей распределения потоков (слоев) и построены эпюры скорости в некоторых поперечных сечениях каналов (Рис. 2). Анализ эпюр скорости показывает максимальное расхождение результатов расчета на уровне 8,4% в сечении, расположенном ближе к выходу из расчетной области (при этом среднее отклонение скорости в этом сечении не превышает 3,9%). Для сечения вблизи зоны слияния потоков максимальное отклонение скорости составляет 2,3%, среднее — 0,9%.

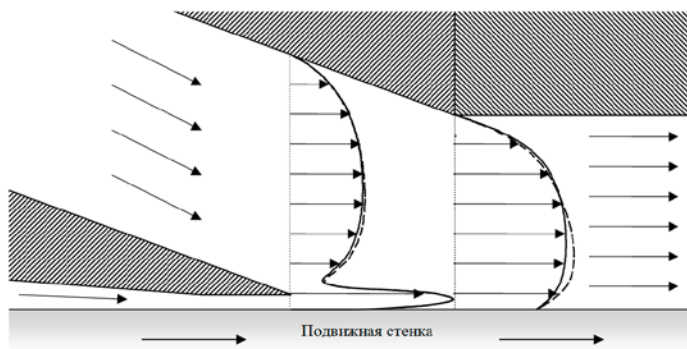


Рис. 2. Эпюры скоростей в различных сечениях канала: «модель  $Q$ » – сплошная линия; «модель  $P$ » – пунктирная линия

Поскольку численная реализация предложенной математической модели стратифицированного течения представляется в виде итерационной процедуры, необходимо иметь некоторое условие ее окончания. Исходя из того, что одним из основных контролируемых параметров являются толщины слоев материалов на выходе из канала, для нахождения критерия окончания вычислений проведена серия расчетов с целью определения характера зависимости толщин слоев от количества счетных итераций. Результат представлен на рисунке 3.

Из анализа кривых следует, что для стабилизации решения достаточно

1500–2000 итераций; дальнейшее увеличение их числа на характер распределения потоков материала в установившемся стратифицированном течении практически не оказывает влияния. Следовательно, при одной и той же геометрии расчетной области и одинаковом разбиении ее на конечные элементы при обеих моделях условий работы формующего инструмента можно ограничиться установленным количеством итераций.

Для определения числа конечных элементов, достаточного для получения приемлемых значений характеристик процесса, проведен анализ распределения потоков и положения границ их раздела на различных сетках (Рис. 4). При этом в рамках одной сетки все конечные элементы имели одинаковый размер; преимущественно использовались четырехузловые элементы. Из рисунка 4 видно, что при числе конечных элементов 200 000 и больше характер поведения толщин слоев не меняется.

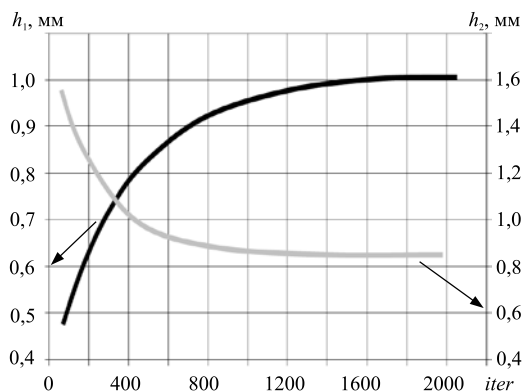


Рис. 3. Изменение толщины слоя материала на выходе из формующего инструмента при увеличении количества счетных итераций: — — — — слой 3 (шкала  $h_1$ ); — — — — слой 1 (шкала  $h_2$ )

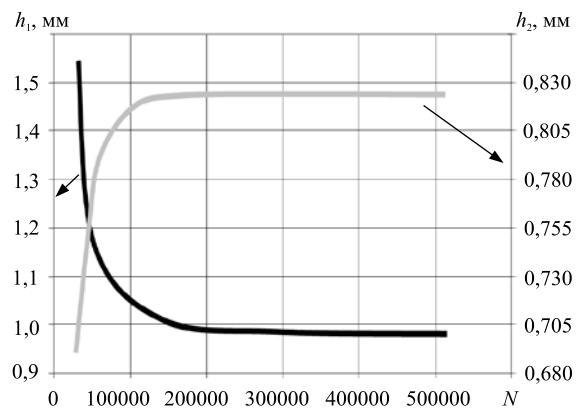


Рис. 4. Изменение толщин слоев материала на выходе при увеличении количества элементов ( $N$ ): — — — — слой 3 (шкала  $h_1$ ); — — — — слой 1 (шкала  $h_2$ )

### 3. Анализ полученных результатов

Изначально рассматривалась геометрия реально существующего формующего трехслойное покрытие инструмента, эксперименты с которым приводили к продукту с неудовлетворительным качеством. Измерение слоя, формируемого через «вход 1» (см. Рис. 1), показало его недостаточную толщину и неравномерность наложения. Предварительная оценка ситуации с помощью предлагаемой математической модели и численного метода ее реализации выявила причину этого [20]. Оказалось, что в части канала, где поток материала перетекает из коническо-цилиндрического зазора с неподвижными стенками в кольцевой зазор, одна из стенок которого подвижна, возникает вихревое течение, существенно влияющее на условия протекания материала через поперечное сечение канала (Рис. 5). Подобное явление достаточно хорошо известно и описано, например, в [21, 22], где автор отмечает его связь с качеством формируемого покрытия.

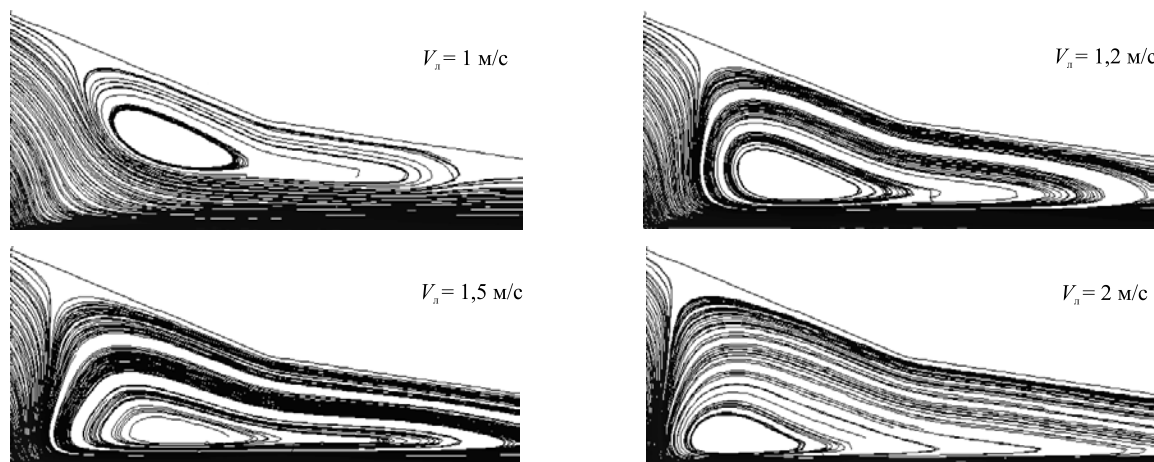


Рис. 5. Завихрение потока в канале исходной конфигурации

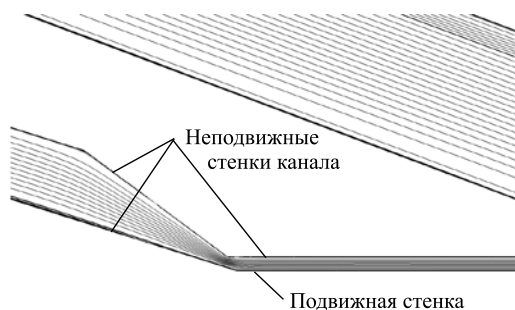


Рис. 6. Канал предложенной геометрии с отсутствием завихрений материала

Таким образом, при исследовании существующего режима работы формующего инструмента возникла новая задача, заключающаяся в рационализации его геометрии в пределах заданных диапазонов изменения технологических параметров. В результате была предложена такая геометрия для одновременного наложения нескольких слоев полимерного материала (Рис. 6), которая во всем диапазоне значений параметров режима экструзионной переработки показала отсутствие явления завихрения.

Полученное путем численного моделирования решение позволило построить в каналах температурные поля, поля давления, скорости. Найденные положения границ раздела потоков открыли возможность судить о толщине формируемых слоев на выходе из формующего инструмента, а распределения температуры — контролировать внутренние перегревы в потоках (слоях) расплава полимера.

Проведем анализ рисунков 7–9. На рисунке 7а представлено поле давления. Видно, что наибольшее давление создается в канале, по которому протекает расплав полимера, подаваемый через «вход 1». Это связано с размером поперечного сечения данного канала — оно наименьшее, и с достаточно высокой вязкостью полимера. Температурное поле, приведенное на рисунке 7б, свидетельствует о достаточно равномерном прогреве материала в каналах. При этом на выходе из канала полимер практически сохраняет температуру подаваемого расплава (средняя температура полимера на выходе 426 К, а температура расплава составляет 423 К, см. Рис. 8). На неподвижных стенках температура соответствует температуре подогрева формующего инструмента (подогрев осуществляется с целью улучшения прохождения материала через сечение канала).

На рисунке 7в приведено поле скоростей движения расплава по каналам. Наибольшая скорость потока наблюдается в самом узком сечении формующего инструмента — в месте выходов каналов с неподвижными стенками в канал, одна из стенок которого подвижна). При этом максимальная скорость в самом узком участке примерно в 2 раза превосходит скорость движения самой стенки.

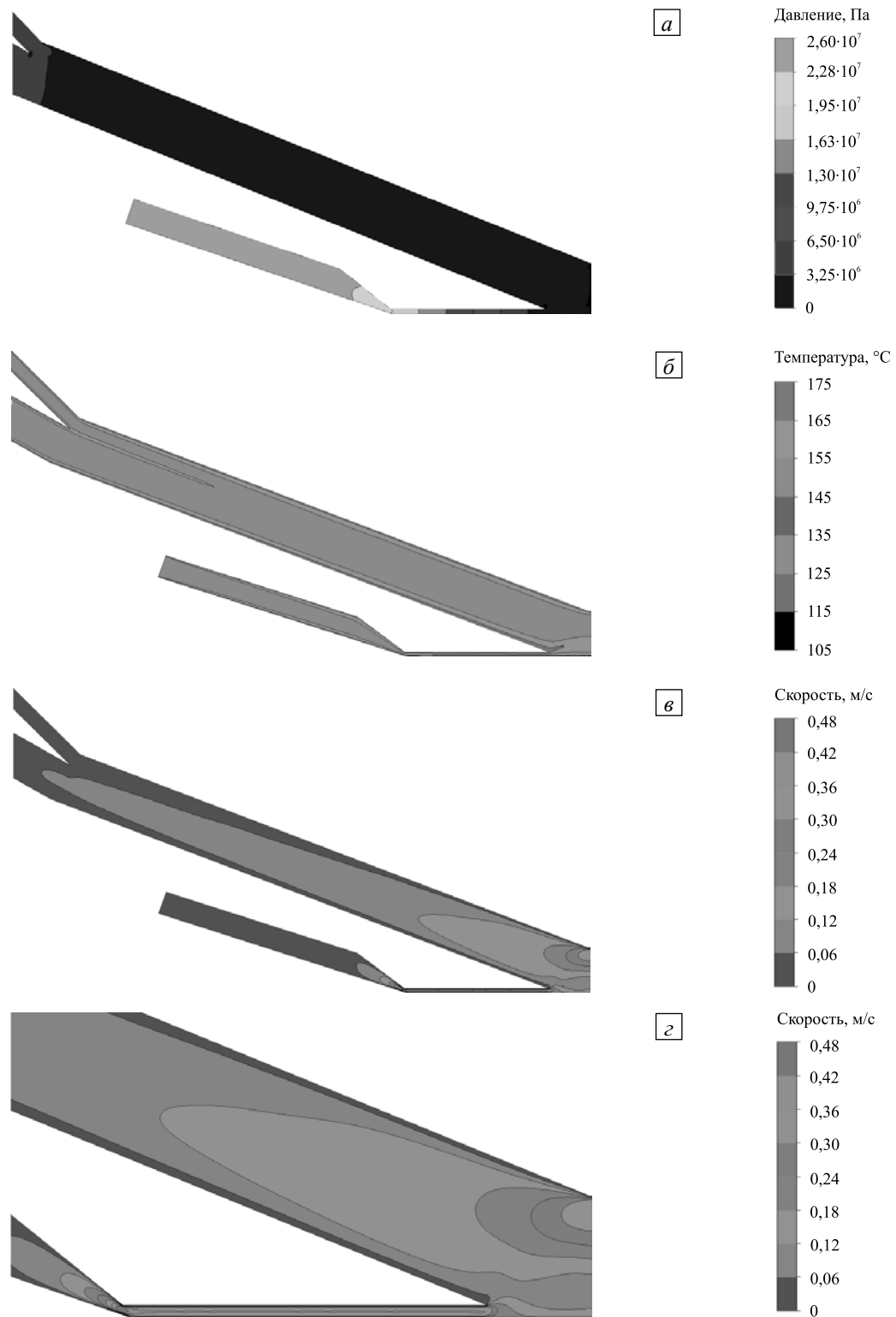
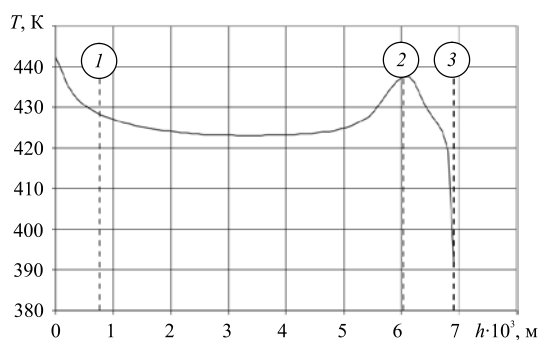


Рис. 7. Поля давления (а), температур (б) и скоростей (в, г – в увеличенном масштабе) в каналах формующего инструмента

Рисунки 7б и 8 говорят о неосуществимости оперативного контроля вероятных диссипативных перегревов полимера в формующем инструменте при помощи измерительных приборов, размещаемых на выходе, так как температуры выравниваются, и уловить перегрев не представляется возможным. Таким образом, предлагаемый метод определения внутренних перегревов на основе численного моделирования — один из способов контроля качества готового изделия на предмет выявления следов термической деструкции материала.

Рисунок 9а (и то же самое в увеличенном масштабе на 9б) демонстрирует траектории движения расплава полимеров по коническо-цилиндрическим каналам формующего инструмента и отражает взаимодействие потоков (слоев) при их слиянии. На рисунке 9в (и в увеличенном масштабе на 9г) отдельно



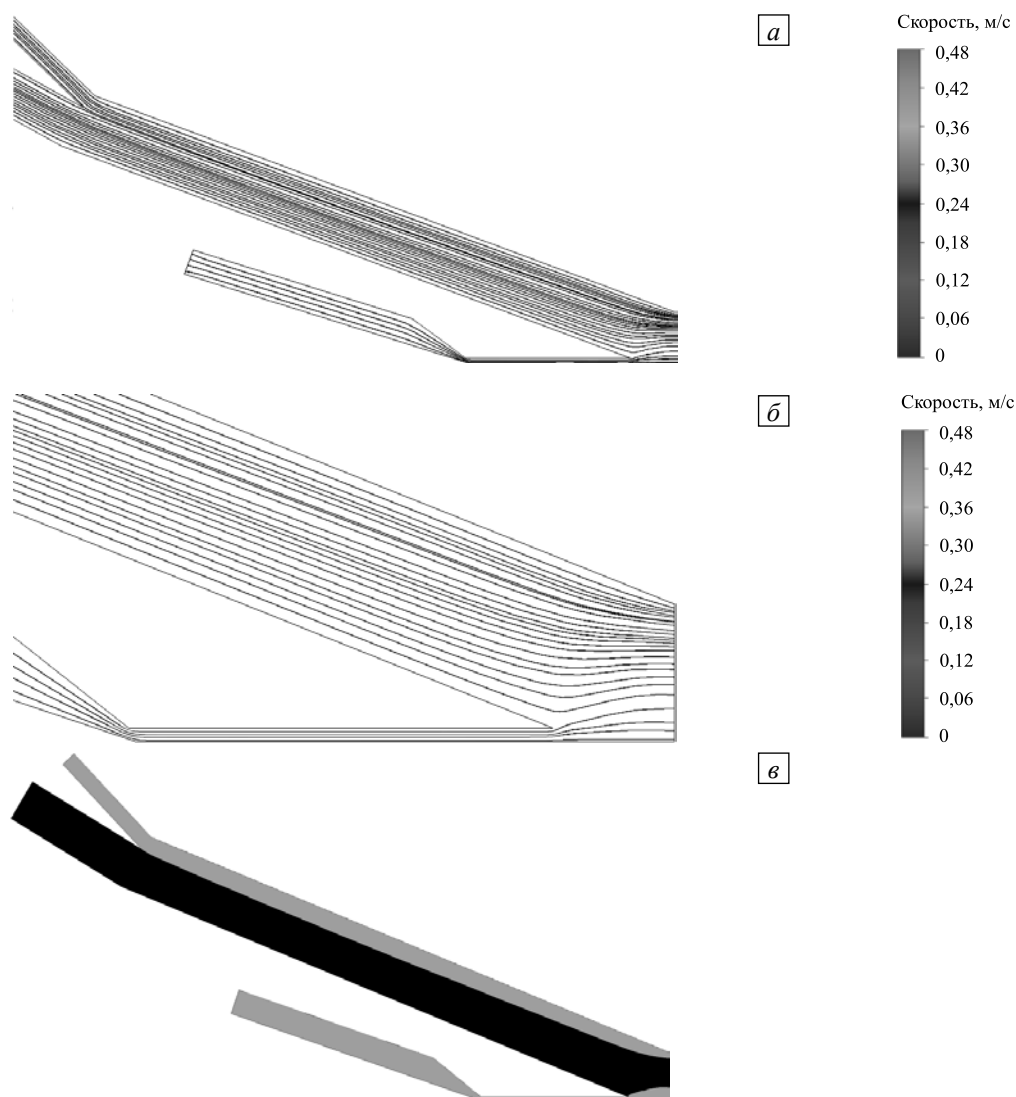
**Рис. 8.** Радиальное распределение температуры на выходе из формующего инструмента ( $h$  – радиальная толщина формируемого многослойного покрытия на выходе); штриховыми линиями показаны границы слоев, формируемых через различные входы: через «вход 3» (линия 1); через «вход 2» (2); через «вход 1» (канал имеет подвижную стенку) (3)

показаны границы потоков расплавов полимеров, которые были получены путем визуализации скалярного поля плотностей. Можно отметить стабильность положения границ раздела на всем участке взаимодействия потоков, что обеспечивает хорошее качество получаемого многослойного покрытия.

Так как жидкости практически несмешиваемые, границы зон с различными плотностями (Рис. 9в, з) вкуче с линиями тока (Рис. 9а, б) позволили достаточно точно определить результирующие толщины слоев. Толщины вычислялись по координатам границ на выходе из формующего инструмента.

Для оценки степени влияния

различных факторов на исследуемый процесс формирования многослойного полимерного покрытия проведены численные эксперименты. По их результатам построены графические зависимости толщин формируемых слоев от некоторых реологических свойств материалов, массового расхода, линейной скорости подвижной стенки, а также численные оценки отклонения давлений на входах в каналы при изменении этих параметров в технологически допустимом диапазоне.



**Рис. 9.** Распределение потоков материалов в каналах формующего инструмента (а) и то же самое в увеличенном масштабе (б); границы раздела потоков (в) и в увеличенном масштабе (з)

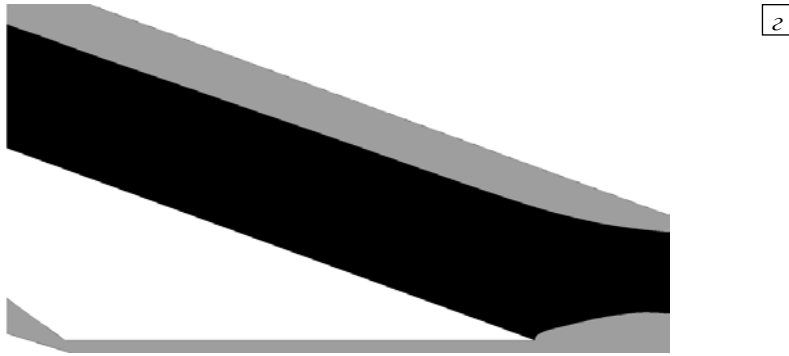


Рис. 9. Продолжение

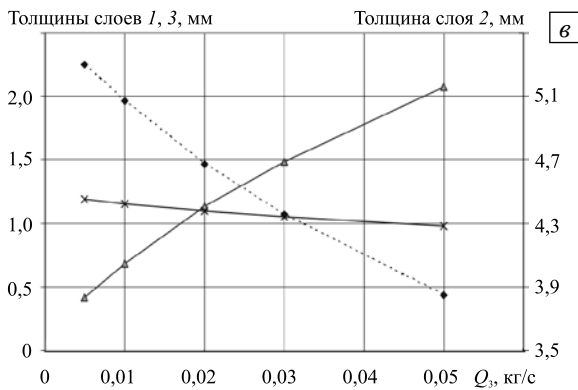
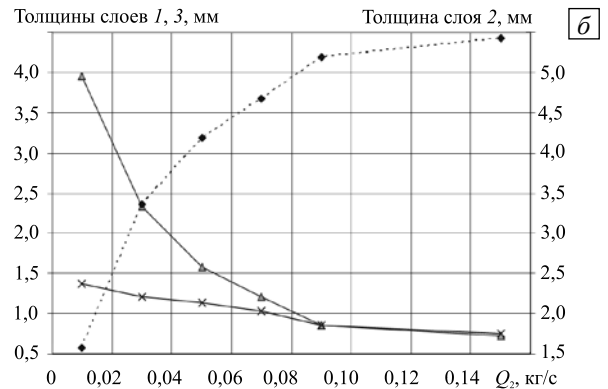
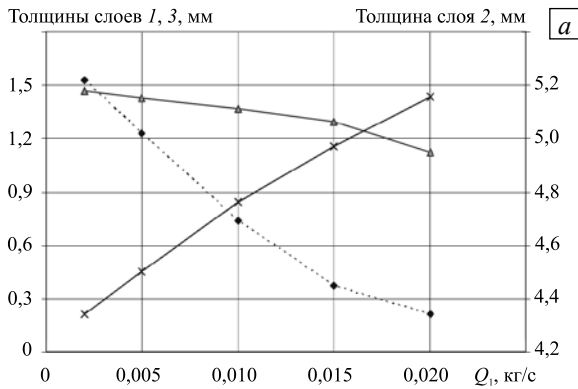


Рис. 10. Влияние расхода материала в канале с «входом 1» (а), в канале с «входом 2» (б), в канале с «входом 3» (в) на толщины слоев: —×— — слой 1; - - -♦- - - — слой 2; —▲— — слой 3

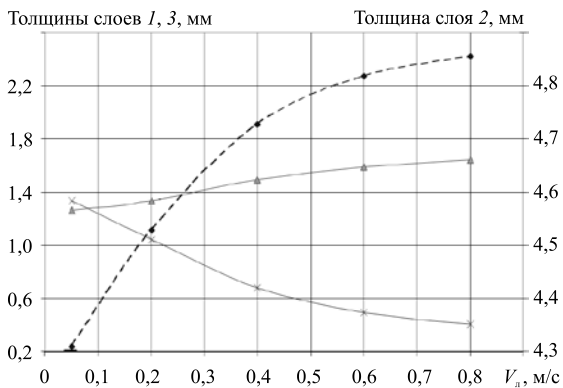


Рис. 11. Изменение толщин слоев материала в зависимости от  $V_n$  — линейной скорости подвижной стенки: —×— — слой 1; - - -♦- - - — слой 2; —▲— — слой 3

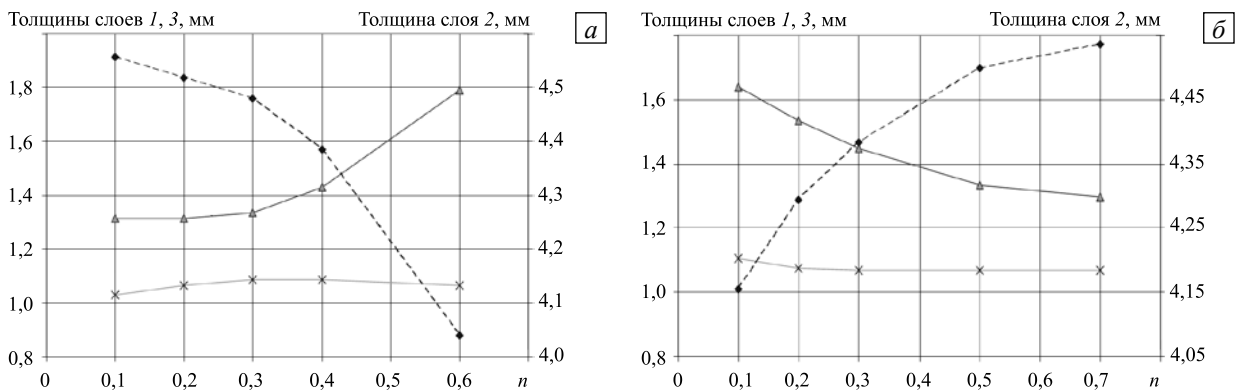
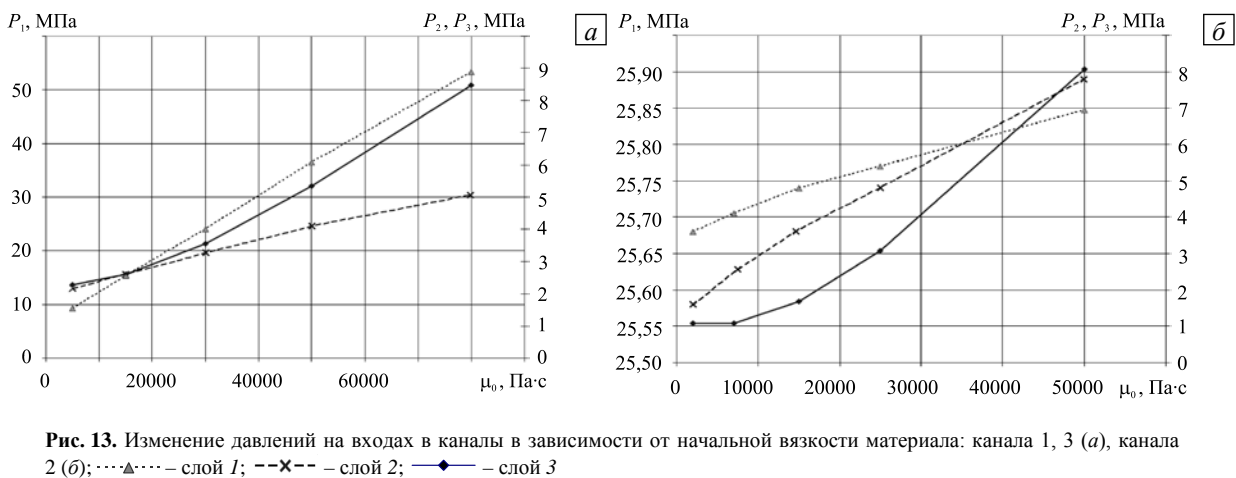
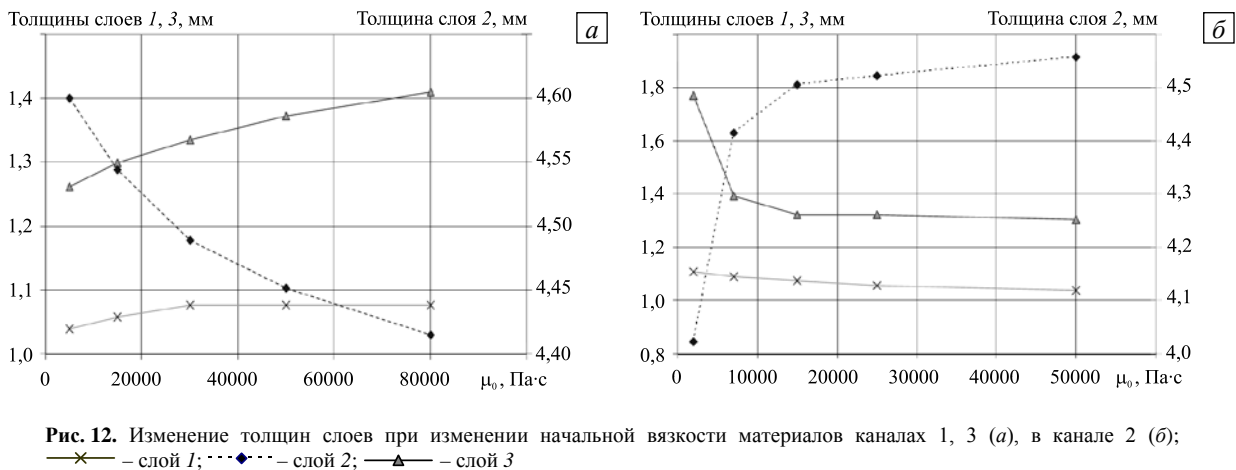
Графики, приведенные на рисунке 10, демонстрируют изменение толщины накладываемых слоев материала в зависимости от массового расхода в каналах. При увеличении расхода в канале с «входом 1» ( $Q_1$ ) в 10 раз толщина слоя 1 возрастает в 6,8 раза, а толщины слоев 2 и 3 уменьшаются, соответственно, на 20% и 30%. При увеличении расхода  $Q_2$  в 8 раз слой 1 становится тоньше в 2 раза, слой 2 утолщается в 3,7 раза, а слой 3 утоньшается в 5,7 раза. При увеличении расхода  $Q_3$  в 10 раз толщины слоев 1 и 2 падают, соответственно, на 20% и 40%, а толщина слоя 3 возрастает в 5 раз. Анализ графиков позволяет сделать вывод о минимальном влиянии расхода через «вход 1» на толщины слоев, формируемых в двух других каналах.



На рисунке 11 показана зависимость толщин слоев от линейной скорости подвижной стенки. При увеличении  $V_d$  в технологическом диапазоне в 8 раз толщина слоя 1 уменьшалась в 3,5 раз, толщина слоя 2 и толщина слоя 3 возрастали соответственно на 12% и 28%.

На рисунке 12 приведены зависимости толщин слоев формируемого покрытия при изменении начальной вязкости материала при неизменных расходе и линейной скорости подвижной стенки. Видно, что начальная вязкость слоя 2 влияет существенно на толщины формируемых слоев только при значениях из диапазона 2000–15000 Па·с.

На рисунке 13 представлены относительные давления на входах в каналы для различных начальных вязкостей. Анализ зависимостей показывает, что увеличение вязкости приводит к увеличению перепада давления, необходимого для соблюдения режима заданного расхода. Особенно этот эффект сказывается при увеличении вязкости материала для слоя 1, что обусловлено его малым поперечным сечением. Это необходимо учитывать при применении полупроводящих полимерных композиций с высокой начальной вязкостью.



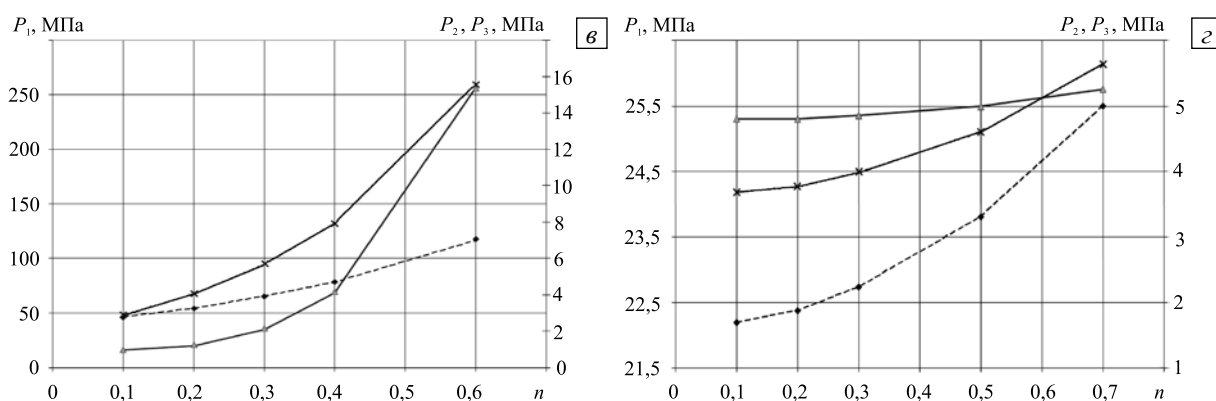


Рис. 14. Продолжение

Рисунок 14 содержит изменение толщин слоев и давлений на входах в каналы в зависимости от коэффициента аномалии вязкости, который изменяется в диапазоне 0,1–0,7. Рисунок 14в свидетельствует о существенном увеличении давления в 1-м и 3-м каналах с ростом коэффициента аномалии материала слоя 1 и слоя 3.

#### 4. Заключение

Таким образом, разработана осесимметричная модель трехслойного неизотермического течения расплавов полимеров в системе коническо-цилиндрических зазоров формующего инструмента. В ходе исследований обнаружилась необходимость в разработке новой геометрии формующего инструмента. Такая геометрия, рационализирующая потоки расплавов полимеров и устраняющая явление противотока, предложена в данной работе.

Произведена оценка степени влияния различных факторов на толщины слоев трехслойного полимерного покрытия. Построены зависимости геометрических свойств производимых многослойных покрытий от расходов и линейных скоростей движения. Эти зависимости позволяют оперативно менять технологические параметры производственной линии и заранее прогнозировать результат.

Полученные зависимости с успехом могут использоваться при изучении процессов неизотермических стратифицированных течений в формующих инструментах; а также при проектировании систем автоматизированного управления экструзионными линиями [23, 24].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-96034-р\_урал\_а).

#### Литература

1. Malkin A.Ya. Non-Newtonian viscosity in steady-state shear flows // J. Non-Newton. Fluid. – 2013. – Vol. 192. – P. 48-65. DOI
2. Zhang M., Huang C., Sun S., Jia Y. The finite element simulation of polymer coextrusion based on the slip boundary // Polym.–Plast. Technol. – 2009. – Vol. 48, no. 7. – P. 754-759. DOI
3. Martyn M.T., Gough T., Spares R., Coates P.D., Zatloukal M. Visualisation and analysis of LDPE melt flows in a coextrusion geometry // ANTEC 2002. Proceeding of the 60th SPE Annual Technical Conference, San Francisco, CA, 5-9 May 2002. – P. 937-941.
4. Martyn M.T., Gough T., Spares R., Coates P.D., Zatloukal M. Experimental observations of LDPE melt flow in coextrusion geometries // ANTEC 2004. Proceeding of the 62th SPE Annual Technical Conference, Chicago, IL, 16-20 May 2004. – P. 205-209.
5. Martyn M.T., Coates P.D., Zatloukal M. Visualisation and analysis of polyethylene coextrusion melt flow // AIP Conf. Proc. – 2009. – Vol. 1152, no. 1. – P. 96-109. DOI
6. Martyn M.T., Spares R., Coates P.D., Zatloukal M. Imaging and analysis of wave type interfacial instability in the coextrusion of low-density polyethylene melts // J. Non-Newton. Fluid. – 2009. – Vol. 156, no. 3. – P. 150-164. DOI
7. Yankov V.I., Trufanova N.M., Shcherbinin A.G. Nonisothermal flow of polymer solutions and melts in channels of constant cross section // Theor. Found. Chem. Eng. – 2004. – Vol. 38, no. 2. – P. 179-188. DOI
8. Malkin A.Ya., Semakov A.V., Kulichikhin V.G. Modeling macromolecular movement in polymer melts and its relation to non-linear rheology // Rheol. Acta. – 2011. – Vol. 50, no. 5-6. – P. 485-489. DOI
9. Снигерев Б.А. Математическое моделирование процесса экструзии полимерного расплава // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – № 4. – С. 33-40.
10. Снигерев Б.А., Тазюков Ф.Х., Шайхетдинова Р.С., Гарифуллин Ф.А. Моделирование неизотермической экструзии вязкоупругой жидкости // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 6. – С. 47-51.
11. Снигерев Б.А., Тазюков Ф.Х. Двухслойное течение нелинейно-вязких жидкостей в плоском канале // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2010. – № 2. – С. 70-73.

12. Снигерев Б.А. Неизотермическое двухслойное течение неньютоновских жидкостей в плоском канале // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2013. – № 4-1. – С. 104-111.
13. Раувендааль К. Экструзия полимеров – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
14. Юрыгин П.П., Гуданов И.С., Гончаров Г.М., Ломов А.А. Математическое моделирование соэкструзии длиномерных кольцевых изделий из резиновых смесей // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 267-271.
15. Khan A.A., Han C.D. On the interface deformation in the stratified two-phase flow of viscoelastic fluids // Trans. Soc. Rheol. – 1976. – Vol. 20, no. 4. – P. 595-621. DOI
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – Т. 6. – 736 с.
17. Попов Д.Н., Панаиотти С.С., Рябинин М.В. Гидромеханика: Учебник для вузов / Под ред. Д.Н. Попова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 384 с.
18. Zhang J., Lodge T.P., Macosko Ch.W. Interfacial slip reduces polymer slip adhesion during coextrusion // J. Rheol. – 2006. – Vol 50. – P. 41-58. DOI
19. Субботин Е.В., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Численное исследование течений полимерных жидкостей в канале шнекового экструдера на основе одно- и двухмерных моделей // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5, № 4. – С. 452-460. DOI
20. Казаков А.В., Савченко В.Г., Труфанова Н.М. Расчет влияния геометрии каналов технологического инструмента кабельной головки на возникновение вихревых потоков при наложении изоляции // Кабели и провода. – 2010. – № 2 (321). – С. 11-13.
21. Tanner R.I. Some experiences using finite element methods in polymer processing and rheology // Proceedings of the 7th International Congress on Rheology, 23-27 August, Gothenburg, Sweden. – 1976. – P. 140.
22. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины. – СПб.: Профессия, 2007. – 472 с.
23. Казаков А.В., Труфанова Н.М. Численные исследования режимов стратифицированного течения и методика управления процессом экструзионного наложения многослойной изоляции // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 167-171.
24. Kazakov A.V., Trufanova N.M. A system for adaptive monitoring of the process of polymer insulation production // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83, no. 11. – P. 640-643. DOI

## References

1. Malkin A.Ya. Non-Newtonian viscosity in steady-state shear flows. *J. Non-Newton. Fluid*, 2013, vol. 192, pp. 48-65. DOI
2. Zhang M., Huang C., Sun S., Jia Y. The finite element simulation of polymer coextrusion based on the slip boundary. *Polym.-Plast. Technol.*, 2009, vol. 48, no. 7, pp. 754-759. DOI
3. Martyn M.T., Gough T., Spares R., Coates P.D., Zatloukal M. Visualisation and analysis of LDPE melt flows in a coextrusion geometry. *ANTEC 2002. Proceeding of the 60th SPE Annual Technical Conference, San Francisco, CA, 5-9 May 2002*, pp. 937-941.
4. Martyn M.T., Gough T., Spares R., Coates P.D., Zatloukal M. Experimental observations of LDPE melt flow in coextrusion geometries. *ANTEC 2004. Proceeding of the 62th SPE Annual Technical Conference, Chicago, IL, 16-20 May 2004*, pp. 205-209.
5. Martyn M.T., Coates P.D., Zatloukal M. Visualisation and analysis of polyethylene coextrusion melt flow. *AIP Conf. Proc.*, 2009, vol. 1152, no. 1, pp. 96-109. DOI
6. Martyn M.T., Spares R., Coates P.D., Zatloukal M. Imaging and analysis of wave type interfacial instability in the coextrusion of low-density polyethylene melts. *J. Non-Newton. Fluid*, 2009, vol. 156, no. 3, pp. 150-164. DOI
7. Yankov V.I., Trufanova N.M., Shcherbinin A.G. Nonisothermal flow of polymer solutions and melts in channels of constant cross section. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2004, vol. 38, no. 2, pp. 179-188. DOI
8. Malkin A.Ya., Semakov A.V., Kulichikhin V.G. Modeling macromolecular movement in polymer melts and its relation to non-linear rheology. *Rheol. Acta.*, 2011, vol. 50, no. 5-6, pp. 485-489. DOI
9. Snigerev B.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa ekstruzii polimernogo rasplava [Mathematical modeling of polymer melt extrusion]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya – Chemical industry today*, 2012, no. 4, pp. 33-40.
10. Snigerev B.A., Tazyukov F.Kh., Shajkhetdinova R.S., Garifullin F.A. Modelirovanie neizotermicheskoy ekstruzii vyazkoupругoj zhidkosti [Modelling of non-isothermal extrusion of viscoelastic fluid]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of Kazan Technological University*, 2012, vol. 15, no. 6, pp. 47-51.
11. Snigerev B.A., Tazyukov F.Kh. Dvukhslojnoe techenie nelinejno-vyazkikh zhidkostej v ploskom kanale [Two-layer for a nonlinear viscous fluid in a flat channel]. *Ekologicheskij vestnik nauchnykh tse ntrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva – Ecological Bulletin of research centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2010, no. 2, pp. 70-73.
12. Snigerev B.A. Non-isothermal two layer flow of non-Newtonian fluid in a flat channel. *Ekologicheskij vestnik nauchnykh tse ntrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva – Ecological Bulletin of research centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2013, no. 4-1, pp. 104-111.
13. Rauwendaal Ch. *Polymer extrusion*. Hanser Gardner Publisher, 2001. 804 p.
14. Yurygin P.P., Gudanov I.S., Goncharov G.M., Lomov A.A. Matematical modeling of coextrusion of lengthy products from rubber compounds. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ia – Scientific and technical Volga region bulletin*, 2013, no. 2, pp. 267-271.
15. Khan A.A., Han C.D. On the interface deformation in the stratified two-phase flow of viscoelastic fluids. *Trans. Soc. Rheol.*, 1976, vol. 20, no. 4, pp. 595-621. DOI
16. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Fluid mechanics*. Course of theoretical physics, vol. 6. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1987.
17. Popov D.N., Panaiotti S.S., Ryabinin M.V. *Gidromekhanika* [Hydromechanics]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2002. 384 p.
18. Zhang J., Lodge T.P., Macosko Ch.W. Interfacial slip reduces polymer slip adhesion during coextrusion. *J. Rheol.*, 2006, vol. 50, pp. 41-58. DOI

19. Subbotin E.V., Trufanova N.M., Shcherbinin A.G. Numerical study of polymer fluid flows in the channel of a screw extruder using one- and two-dimensional models. *Vychisl. meh. splos. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2012, vol. 5, no. 4, pp. 452-460. DOI
20. Kazakov A.V., Savchenko V.G., Trufanova N.M. Raschet vliyaniya geometrii kanalov tekhnologicheskogo instrumenta kabel'noj golovki na vzniknovenie vikhrevykh potokov pri nalozhenii izolyatsii [Calculation of the influence of the geometry of the channels of technological tool cable head on the occurrence of eddy currents when applied insulation]. *Kabeli i provoda – Cables and wires*, 2010, no. 2 (321), pp. 11-13.
21. Tanner R.I. Some experiences using finite element methods in polymer processing and rheology. *Proceedings of the 7th International Congress on Rheology, 23-27 August, Gothenburg, Sweden, 1976. P. 140.*
22. Michaeli W. *Extrusion dies for plastics and rubber – Design and engineering computations*. Munich: Carl Hanser, 2003.
23. Kazakov A.V., Trufanova N.M. Chislennyye issledovaniya rezhimov stratifitsirovannogo techeniya i metodika upravleniya protsessom ekstruzionnogo nalozheniya mnogosloinoj izolyatsii [Numerical investigations of stratified flow regimes and method for controlling extrusion multilayer insulation overlay]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 167-171.
24. Kazakov A.V., Trufanova N.M. A system for adaptive monitoring of the process of polymer insulation production. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 11, pp. 640-643. DOI

Поступила в редакцию 13.05.2015; опубликована в электронном виде 30.09.2015

---

*Сведения об авторах*

Бачурина Мария Владимировна, асп., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: ktei@pstu.ru

Казаков Алексей Владимирович, ктн, доц., ПНИПУ; e-mail: phono@inbox.ru

Труфанова Наталья Михайловна, дфмн, проф., зав. каф., ПНИПУ; e-mail: ktei@pstu.ru