

DOI: [10.7242/1999-6691/2018.11.4.28](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2018.11.4.28)

УДК 532. 679.743.1:519.63

## АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КАНАЛАХ ФОРМУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ СОЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ

М.В. Козицына, Н.М. Труфанова

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

На сегодняшний день кабельное производство испытывает потребность в использовании в качестве изоляционного материала сшитого полиэтилена (ПЭ), имеющего более высокую рабочую температуру. Одним из способов получения многослойной изоляции из сшитого ПЭ является соэкструзия привитого ПЭ с последующей сшивкой в паровых котлах. Каналы коническо-цилиндрических конфигураций, найденные авторами в литературе, существенно отличаются от реальных каналов в кабельной головке. В статье приведены постановка и результаты численной реализации пространственной задачи тепломассопереноса для нелинейно-вязких пластмасс в каналах соэкструзионной кабельной головки сложной геометрии. Поскольку трехслойное кабельное покрытие создается в формующем инструменте, важным является исследование и анализ течений расплавов материалов с различными свойствами. Во многом процесс течения определяется нелинейным характером зависимости вязкости расплава как от температуры, так и от тензора скоростей деформации. В данной работе считалось, что полимерная изоляция изготовлена из привитого ПЭ, для которого определение реологических параметров на лабораторном реометре весьма затруднительно из-за возможного процесса подшивки. Рассмотрены три геометрических модели формующего инструмента, отличающиеся формой и длиной каналов. Вычисления по соответствующим математическим моделям выполнены с помощью универсального программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS. Представлены зависимости максимальных и средних температур, давлений для каждого канала в отдельности. Установленные результаты позволили сделать вывод о том, что геометрическая модель, наиболее приближенная к реальной кабельной головке, полнее других описывает процессы тепломассопереноса.

*Ключевые слова:* соэкструзия, реология, сшитые полиэтилены, многослойное покрытие, математическое моделирование, аномально-вязкая жидкость.

## ANALYSIS OF SPATIAL HEAT AND MASS TRANSFER IN THE CHANNELS OF A FORMING TOOL DURING POLYMER COEXTRUSION

M.V. Kozitsyna and N.M. Trufanova

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

At present, there is a growing demand for use of crosslinked polyethylene (PE) as an insulating material possessing high operating temperature. One way to obtain multi-layer insulation of cables from cross-linked PE is coextrusion of grafted PE with its further cross-linking in steam boilers. The shapes of conical-cylindrical configuration channels, found by the authors in the literature, are significantly different from the actual cable head. In this article, the formulation and numerical realization of the spatial problem of heat and mass transfer of nonlinear plastics in the channels of a coextrusion cable head of complicated geometry are present. It is important to study and analyze the flows of melts of materials with different properties, because a three-layer coating is created in the forming tool. Largely the flow process is determined by the nonlinear character of the dependence of the melt viscosity on temperature and on the strain rate tensor. For polymer isolation, the cross-linked PE was used. Determination of the rheological parameters of this polymer using a laboratory rheometer is very difficult due to the process of cross-linking. In the paper, three geometric models of a forming tool, each of which differs from the previous shape and length of the channels, are considered. The models were realized using the finite element method in ANSYS software package. Maximum and average temperature and pressure dependences are presented for each geometric channel. Analysis of the results has revealed that the geometric model closest to the actual cable head better describes the processes of heat and mass transfer compared to other models.

*Key words:* coextrusion, rheology, cross-linked polyethylene multilayer coating, mathematical modeling, abnormally viscous liquid

### 1. Введение

Широкое распространение при производстве многослойных покрытий получил метод соэкструзии, которая заключается в одновременном наложении на поверхность токопроводящей жилы нескольких слоев полимерного покрытия [1–3]. Во многом характер процесса течения определяется геометрией формующего инструмента и нелинейным характером зависимости вязкости расплава и от температуры, и от скорости сдвига [4–9]. Для анализа процессов течения расплавов полимеров используется численное моделирование, которое успешно реализуется в России и за рубежом в задачах двухслойных течений аномально-вязких жидкостей, в том числе и в каналах сложной формы [10–16].

Геометрии каналов формующего инструмента, исследованные в данной работе, представлены на рисунке 1. От трех независимо работающих экструдеров расплавы полимеров поступают в каналы адаптеров, затем в каналы кабельной головки. На достаточно протяженных участках формующего инструмента каждый из расплавов движется раздельно до участка совместного — трехслойного — течения. Рассмотрены три различных геометрических модели кабельной головки для нанесения трехслойного покрытия: полная модель — А, и отличающиеся от нее степенью усечения (длиной и формой каналов) модели Б и В.

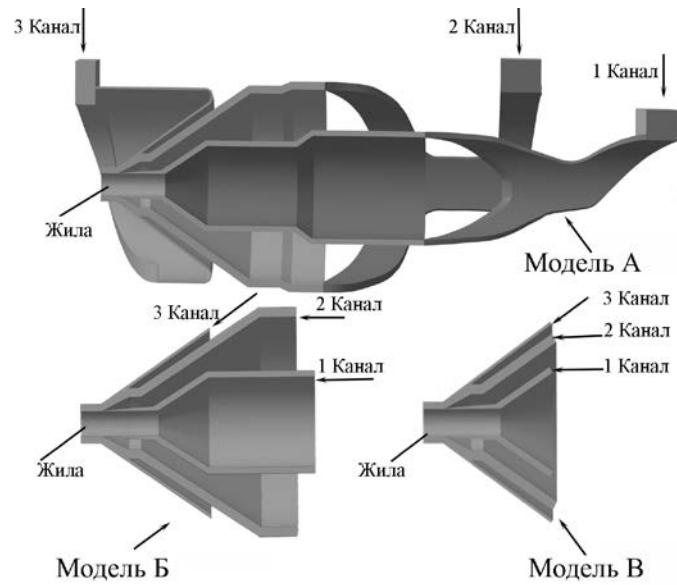


Рис. 1. Конфигурации каналов формирующего инструмента

## 2. Математическая постановка задачи

При анализе процессов тепломассопереноса расплава полимера для всех выбранных геометрических моделей делаются следующие допущения: процесс полагается стационарным и установившимся при постоянном массовом расходе; расплав полимера считается чисто вязкой несжимаемой средой; массовые силы приравниваются нулю; на подвижных и неподвижных границах выполняются условия прилипания и непроницаемости; теплофизические характеристики расплавов полимеров постоянны.

Математическое описание процессов тепломассопереноса при течении расплавов полимеров в каналах основывается на законах сохранения [17]. С учетом сделанных допущений соответствующая система дифференциальных уравнений для каждого из трех расплавов и каждой из обсуждаемых моделей имеет вид:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \tag{1}$$

$$\rho_m \left( V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}, \tag{2}$$

$$\rho_m \left( V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}, \tag{3}$$

$$\rho_m \left( V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}, \tag{4}$$

$$\rho_m C_m \left( V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda_m \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \Phi, \tag{5}$$

где  $x, y, z$  — прямоугольные координаты;  $\rho_m, C_m, \lambda_m$  — соответственно плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности расплава полимера ( $m = 1, 2, 3$ );  $V_x, V_y, V_z$  — компоненты скорости движения расплава полимера;  $\tau$  — компоненты девиатора тензора напряжений;  $\Phi$  — функция диссипации;  $P$  — давление;  $T$  — температура.

Для того чтобы полностью охарактеризовать поведение расплава полимера, необходимо установить связь между напряжениями и соответствующими скоростями деформаций. С этой целью систему уравнений (1)–(5) следует дополнить реологическими уравнениями:

$$\tau_{zz} = 2\mu_{\text{э}} \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu_{\text{э}} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right), \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu_{\text{э}} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right), \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu_{\text{э}} \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \tag{6}$$

где  $\mu_{\text{э}}$  — эффективная вязкость расплава полимера, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры.

Функция диссипации в (5) вычисляется по формуле:

$$\Phi = \mu_0 (I_2/2), \quad (7)$$

здесь  $I_2$  — второй инвариант тензора скоростей деформации,

$$I_2 = 2 \left[ \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[ \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Зависимость вязкости от температуры представляется уравнением Рейнольдса:

$$\mu_0 = \mu_0|_{T_0} \exp(-\beta(T - T_0)), \quad (9)$$

где  $\mu_0$  — коэффициент консистенции расплава полимера,  $\mu_0|_{T_0}$ ,  $\beta$ ,  $T_0$  — реологические и температурные константы. Для описания зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига используется степенной закон, наиболее часто употребляемый при моделировании течений псевдопластических жидкостей:

$$\mu_0 = \mu_0 \dot{\gamma}^{(n-1)/2}, \quad (10)$$

где  $\dot{\gamma}$  — скорость сдвига,  $n$  — показатель аномалии вязкости.

Реологические и теплофизические характеристики исследуемых полимеров, которые были определены предварительно [18], приведены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства полимерных материалов

Номер слоя	$\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda_m$ , Вт/(м·°C)	$C_m$ , Дж/(кг·°C)	$\mu_0$ , Па·с	$\beta$ , 1/°C	$n$	$T_0$ , °C
1	1080	0,182	1974	14000	0,01	0,4	120
2	900	0,182	2368	49000	0,012	0,4	120
3	1080	0,170	2000	17500	0,010	0,4	120

Систему уравнений (1)–(10) замыкают следующие краевые условия:

- расплавы полимеров на входах в каналы кабельной головки имеют температуру 150°C;
- изотермические условия на внутренней и внешней поверхностях кабельной головки, которые считаются неизменными на протяжении всей длины; температура на этих поверхностях составляет 120°C;
- равенство температуры на подвижной стенке температуре подогрева жилы, которая имеет значение 110°C;
- граничные условия для компонент скорости; они находятся из условия прилипания к твердым непроницаемым поверхностям;
- известные на входах в каналы эпюры скорости, соответствующие следующим массовым расходам: 0,016 кг/с для 1-го канала, 0,094 кг/с для 2-го, 0,023 кг/с для 3-го;
- на выходе из головки течение считается установившимся;
- равенство продольной компоненты скорости течения жидкости на границе контакта с подвижной жилой и скорости движения жилы, которая составляет 0,45 м/с;
- граничные условия на поверхностях раздела потоков материалов:

$$\text{по напряжениям} \quad \sigma^1 \cdot \mathbf{n} = \sigma^2 \cdot \mathbf{n}, \quad \sigma^2 \cdot \mathbf{n} = \sigma^3 \cdot \mathbf{n}, \quad (11)$$

$$\text{по скоростям} \quad \mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2, \quad \mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_3, \quad (12)$$

$$\text{по потокам тепла} \quad \mathbf{q}_1 = \mathbf{q}_2, \quad \mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_3, \quad (13)$$

$$\text{по температуре} \quad T_1 = T_2, \quad T_2 = T_3, \quad (14)$$

где индексы 1, 2, 3 — это номера слоев стратифицированного течения,  $\sigma^1$ ,  $\sigma^2$ ,  $\sigma^3$  — тензоры полных напряжений для соответствующего слоя полимерного покрытия,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор нормали к поверхности.

Для оценки толщины слоя покрытия, получаемого в ходе совместного течения материалов, решена задача, учитывающая область со свободной поверхностью (Рис. 2). При этом на свободной поверхности выполняются граничные условия:

– кинематическое (условие непроницаемости)

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0; \tag{15}$$

– динамическое

$$\sigma_n \cdot \mathbf{n} = 0. \tag{16}$$

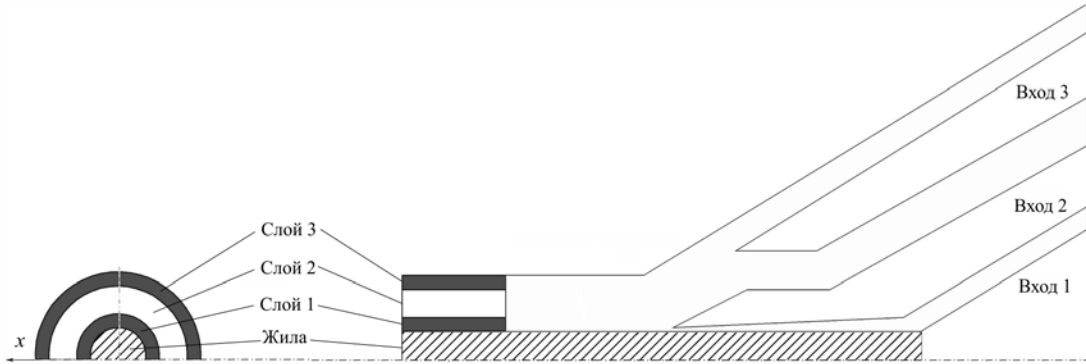


Рис. 2. Конфигурация расчетной области с формующим инструментом и свободной поверхностью

Система дифференциальных уравнений (1)–(16) решалась методом конечных объемов с помощью итерационной процедуры в программном комплексе ANSYS [19, 20]. Положения свободных поверхностей отыскивались из условий выполнения кинематических и динамических граничных условий. Сходимость вычислительного процесса, которая оценивалась с помощью контролируемого параметра, демонстрирует рисунок 3. В качестве параметра взята или максимальная температура в формующем инструменте (Рис. 3а), или ее относительная погрешность (Рис. 3б). Полученные результаты позволяют установить количество итераций  $I$  для достижения стабильного решения. Так, для модели А оно составляет 40000, для модели Б — 20000, для модели В — 17000 итераций соответственно.

При дискретизации расчетных областей, отвечающих исследуемым моделям, необходимо было определить количество требуемых конечных объемов  $N$ . Оценка сходимости решения с этой точки зрения проводилась по относительной погрешности изменения температуры  $|(T^{m+1} - T^m)/T| \leq \delta$  ( $m$  — номер итерации). В каждом узле относительная погрешность по модулю не должна была превышать некоторой заданной малой величины  $\varepsilon$ . Из рисунка 3б видно, что для модели А при числе итераций больше 700 000 величина параметра  $\delta$  не меняется.

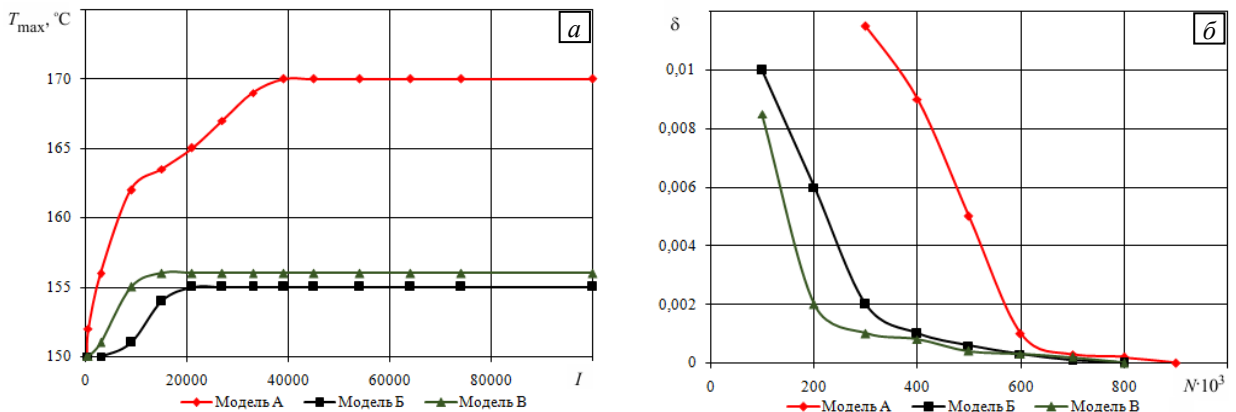


Рис. 3. Зависимости максимальной температуры от количества итераций (а) и относительной погрешности максимальной температуры от числа конечных объемов (б) для моделей А, Б, В

### 3. Анализ полученных результатов

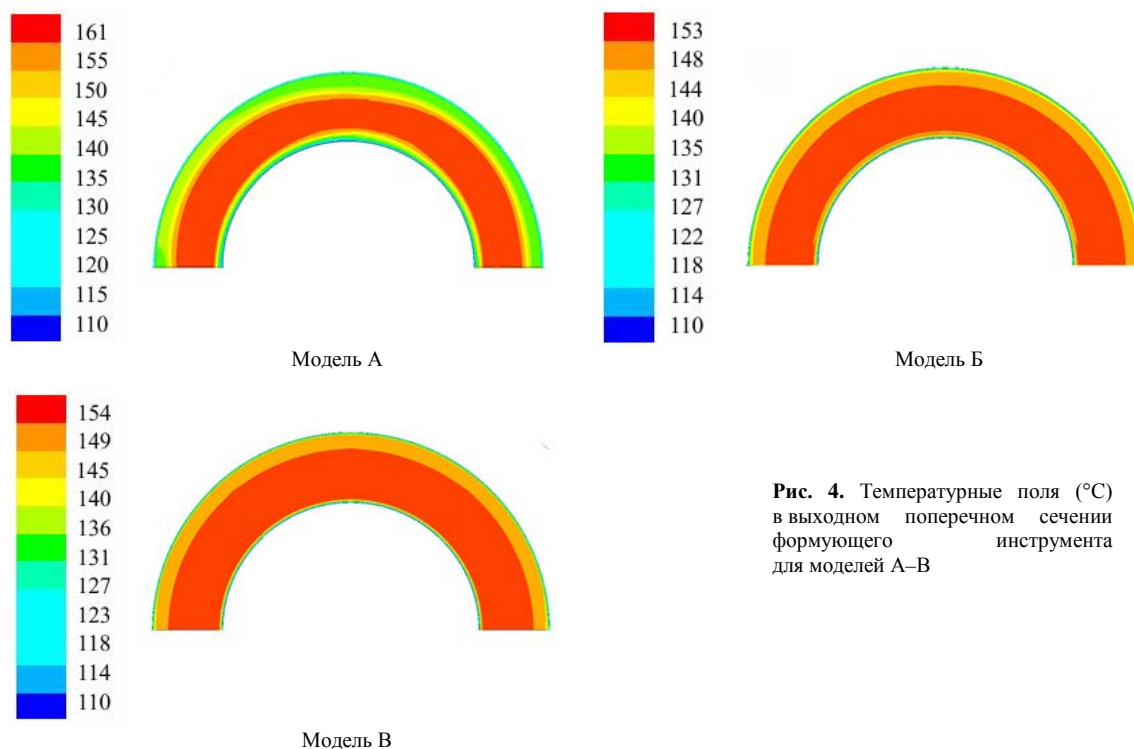
На рисунке 4 представлены температурные поля в поперечном сечении на выходе из формующего инструмента для моделей А, Б, В. Из рисунка видно:

– для слоя 1 (материала из канала 1) максимальная температура на выходе  $152^{\circ}\text{C}$ , а превышение максимальной температуры полимера на выходе по отношению к температуре на входе равно  $2^{\circ}\text{C}$  у всех моделей;

– для слоя 2 (материала из канала 2) значение максимальной температуры для полной модели А  $161^{\circ}\text{C}$ , для моделей Б и В  $152,8^{\circ}\text{C}$  и  $153,6^{\circ}\text{C}$  соответственно; превышение максимальной температуры полимера на выходе составляет 6% для модели А (для ряда полимеров это является существенным увеличением), 1,8% — для модели Б и 2,3% — для модели В;

– для слоя 3 (материала из канала 3) значение максимальной температуры в каналах кабельной головки стало ниже температуры на входе и равно  $145^{\circ}\text{C}$  для модели А и  $148^{\circ}\text{C}$  — для моделей Б и В.

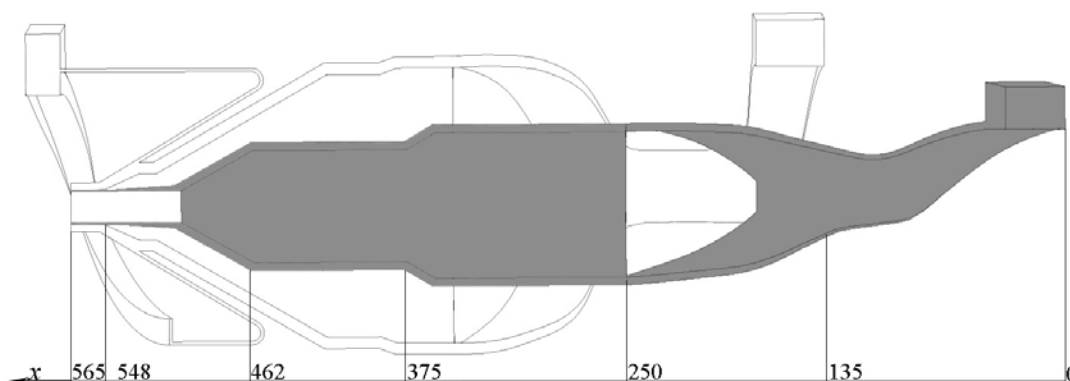
Для более подробного представления об изменении температуры и давления в каналах формирующего инструмента далее приводятся распределения характеристик по продольной координате для каждого канала в отдельности.



**Рис. 4.** Температурные поля ( $^{\circ}\text{C}$ ) в выходном поперечном сечении формирующего инструмента для моделей А–В

На рисунке 5 показана схема модели А с указанием координат начал и концов характерных участков 1-го канала. Таким образом, участку течения полимера по каналу 1 у модели А отвечает  $x = [0, 565]$  мм, у модели Б —  $x = [375, 565]$  мм, у модели В —  $x = [462, 565]$  мм.

Рисунок 6 содержит изменение средней по сечениям температуры расплава полимера в зависимости от продольной координаты  $x$  в канале 1 моделей А, Б, В. Кривая распределения средней температуры для модели А расположена ниже кривых для моделей Б и В. Это объясняется большей протяженностью канала 1 модели А: отвод тепла через стенку формирующего инструмента, имеющего постоянную



**Рис. 5.** Деление канала 1 полной модели А на характерные участки

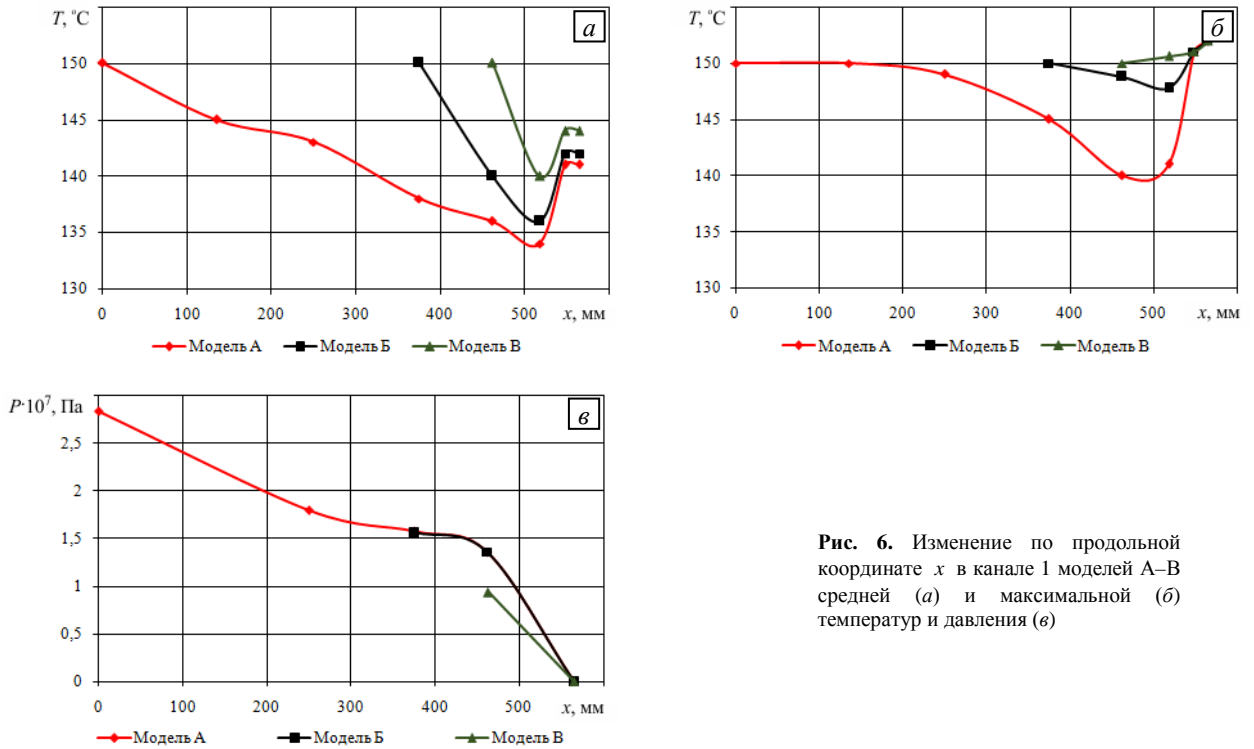


Рис. 6. Изменение по продольной координате  $x$  в канале 1 моделей А–В средней (а) и максимальной (б) температур и давления (в)

температуру  $120^\circ\text{C}$ , происходит дальше. Так, расплав материала постепенно остывает до  $134^\circ\text{C}$ , а затем по мере продвижения по участку совместного течения, начиная с координаты  $x = 548$  мм, разогревается, с одной стороны, за счет диссипации, обусловленной сужением канала течения, а с другой, — вследствие контакта с более разогретым расплавом. Для моделей Б и В характер кривых распределения средней температуры подобен, но в силу меньших длин каналов расплавы остывают до  $136$  и  $140^\circ\text{C}$  с последующем разогревом до  $142$  и  $144^\circ\text{C}$  в области совместного течения. На рисунке 6б изображены зависимости максимальной температуры от текущей длины 1-го канала формирующего инструмента для моделей (А–В). Максимальное значение температуры расплава —  $152^\circ\text{C}$ , отмечается на выходе из формирующего инструмента для всех моделей. Изменение давления по длине каналов представлено на рисунке 6в. Видно, что величины давлений в моделях А и Б хорошо согласуются, различие не превышает 1% на отметке  $x = 375$  мм. У модели В имеет место отклонение давления в 23% при  $x = 462$  мм, что говорит о нецелесообразности использования этой наиболее упрощенной геометрии для численных исследований.

Аналогичный анализ изменений температур и давлений проведен для двух других каналов. Деление 2-го канала модели А на характерные участки можно видеть на рисунке 7. Участок течения полимера по 2-му каналу для модели А имеет координаты  $x = [0, 430]$  мм, для модели Б —  $x = [255, 430]$  мм, для модели В —  $x = [327, 430]$  мм.

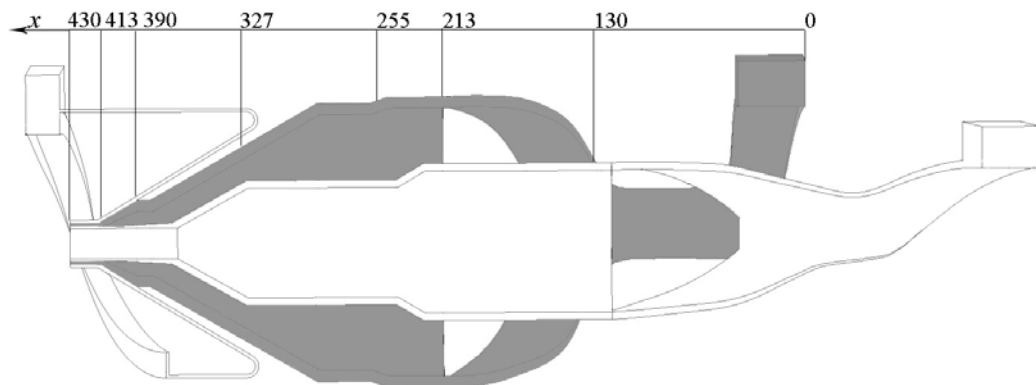
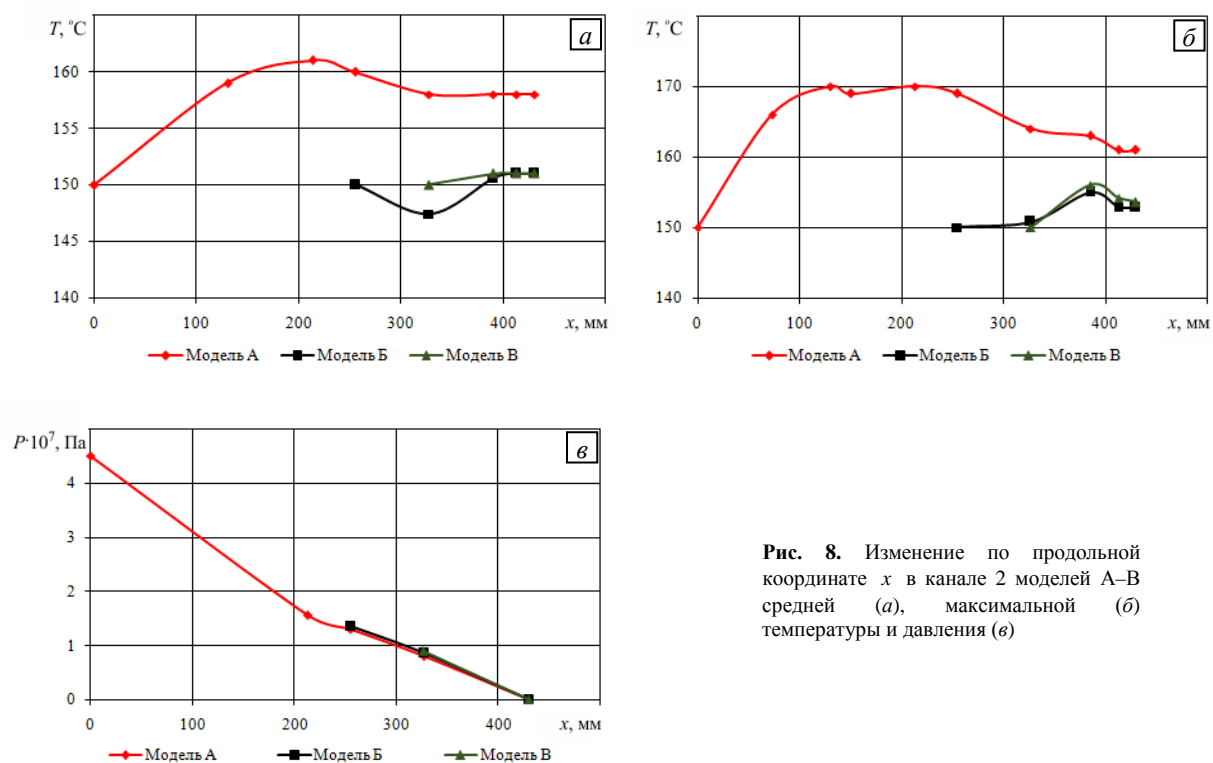


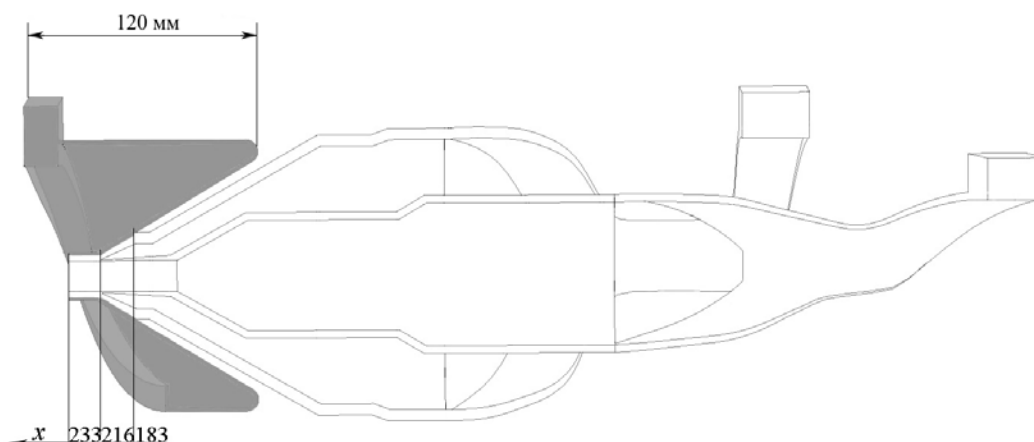
Рис. 7. Деление канала 2 полной модели А на характерные участки



**Рис. 8.** Изменение по продольной координате  $x$  в канале 2 моделей А–В средней (а), максимальной (б) температуры и давления (в)

На рисунке 8а для модели А очевиден рост средней температуры расплава до  $161^\circ\text{C}$  на участке от входа до  $x = 213$  мм. Здесь площадь охлаждаемой поверхности меньше в сравнении со следующим — коническо-цилиндрическим — участком течения от 213 до 390 мм по  $x$ , где в свою очередь наблюдается постепенное остывание расплава полимера до  $158^\circ\text{C}$ ; данная температура сохраняется и в формующей части. Наряду с этим рост максимальной и средней температур связан с существенной диссипацией энергии при движении высоковязкого материала слоя 2 (Табл. 1). Нужно отметить, что характер кривых, описывающих изменение температуры по длине 2-го канала для моделей А и Б, на участке от 255 до 390 мм подобен; видно незначительное снижение температуры расплава до  $147^\circ\text{C}$ ; при дальнейшем течении по формующей части значение средней температуры стабилизируется на  $151^\circ\text{C}$  и остается неизменным. Максимальное значение температуры  $170^\circ\text{C}$  для модели А на 5% выше средней температуры на этом участке (см. Рис. 8б). Для моделей Б и В максимальные по уровню температуры реализуются в области слияния потоков и на 3% превышают средние значения температур в этой области.

На рисунке 9 представлена схема 3-го канала модели А с делением на характерные участки. Так, участок течения полимера по 3-му каналу у модели А состоит из двух частей: прямой части длиной 120 мм где расплав полимера движется слева направо, и наклонной части  $x = [120, 233]$  мм, в которой направление течения меняется на противоположное; конец канала 3 совпадает с отметкой  $x = 233$  мм, у модели Б участок имеет координаты  $x = [120, 233]$  мм, у модели В — тоже  $x = [120, 233]$  мм.



**Рис. 9.** Деление канала 3 полной модели А на характерные участки

Характер кривых, отображающих изменение средней по сечению температуры как функции продольной координаты в канале 3 моделей (А–В) (Рис. 10а), подобен характеру кривых средней температуры в канале 1 (см. Рис. 6а). Однако для модели А наблюдается более интенсивное охлаждение расплава полимера (на 13% ниже) за счет бóльшей площади охлаждаемой поверхности. Для моделей Б и В расплав охлаждается на 6% относительно температуры подачи материала. Стоит отметить, что длины третьего канала в моделях Б и В равны 120 мм, и как свидетельствует рисунок 10а, разница в средних температурах для моделей Б и В не превышает 1,5% по всей длине рассматриваемого канала. Изменение максимальной температуры по продольной координате  $x$  в 3-м канале показано на рисунке 10б. Ни в одном из каналов на всем их протяжении не установлено превышения этой температурой входного значения. Из рисунка 10в видно, что величины давлений в моделях А, Б и В при  $x=120$  мм в 3-м канале хорошо согласуются; при сравнении максимальная разность этих характеристик у всех моделей не превышает 4%.

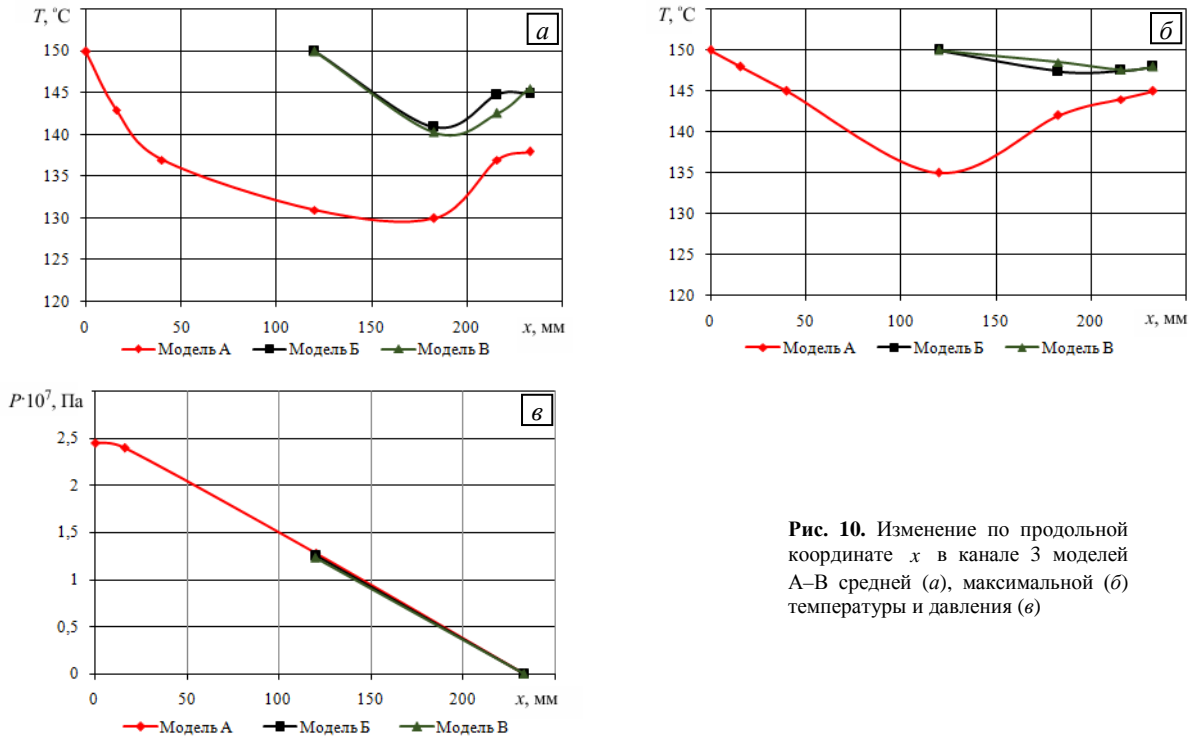


Рис. 10. Изменение по продольной координате  $x$  в канале 3 моделей А–В средней (а), максимальной (б) температуры и давления (в)

Дальнейшее исследование было направлено на определение толщин слоев, получаемых на выходе из формующего инструмента. Конфигурация расчетной области представлена на рисунке 2. В качестве геометрии формующего инструмента использована модель В, дополненная участком со свободной поверхностью.

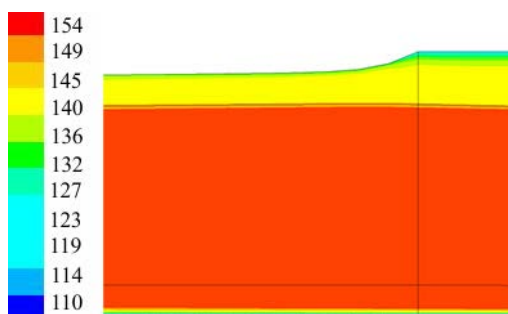


Рис. 11. Поле температур (°C) на участке со свободной поверхностью

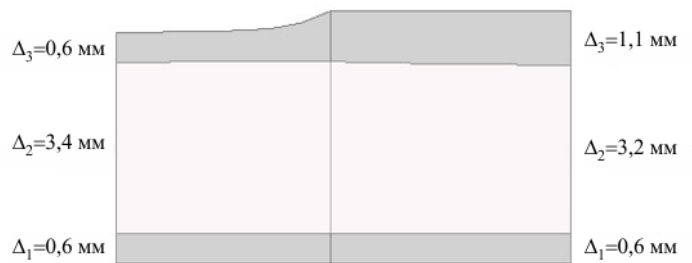


Рис. 12. Распределение потоков материалов в формующем инструменте и за его границами

Рисунок 11 содержит поле температур на участке со свободной поверхностью, находящейся за пределами формующего инструмента (слева от вертикальной линии). На рисунке 12 показаны границы разделов потоков расплавов полимеров, полученные путем визуализации поля плотностей. Стоит отметить стабильность размера слоев на всем протяжении формующего инструмента и перестроение толщин 2-го и 3-го слоев после пересечения границы выхода из него, обозначенной на рисунке вертикальной линией. Величины толщин хорошо согласуются со значениями из таблицы 2.



Таблица 2. Номинальные размеры элементов конструкции кабеля

Площадь сечения жилы, мм <sup>2</sup>	Расчетный радиус жилы, мм	Толщина слоя 1, мм	Толщина слоя 2, мм	Толщина слоя 3, мм	Общая толщина покрытия, мм
240	8,65	0,60	3,40 мм	0,60	4,60

#### 4. Заключение

В результате проведенных численных экспериментов установлены поля температур, давлений, скоростей в формующем инструменте и в области совместного течения. Построены распределения максимальных и средних по сечениям температур, а также давлений для каждого из каналов формующего инструмента. Анализ полученных результатов для трех геометрических моделей кабельной головки позволил сделать вывод о существенном влиянии длины и формы каналов на характер распределений температур и давлений. Несмотря на то что характер представленных кривых для моделей Б и В подобен характеру распределений для модели А, геометрия которой наиболее приближена к реальному формующему инструменту, вклад истории раздельного течения расплавов является существенным, особенно это видно во 2-м канале, по которому протекает расплав с высокой вязкостью. Вычисленные распределения потоков материалов позволили установить толщины слоев накладываемого покрытия без проведения натурного эксперимента и тем самым минимизировать временные и материальные затраты.

Результаты данной работы могут использоваться при изучении процессов пространственного теплопереноса в каналах формующего инструмента, а также при составлении технологических режимов переработки полимерных материалов.

#### Литература

1. Sunwoo K.B., Park S.J., Lee S.J., Ahn K.H., Lee S.J. Three-dimensional numerical simulation of nonisothermal coextrusion process with generalized Newtonian fluids // Korea-Australia rheology journal. 2000. Vol. 12. No. 3/4. P. 165-173.
2. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: конструкции и технические расчеты. СПб.: Профессия, 2007. 472 с.
3. Gifford W.A. A three-dimensional analysis of coextrusion // Polymer Eng. Sci. 1997. Vol. 37. No. 2. P. 315-320. [DOI](#)
4. Malkin A.Y. Non-Newtonian viscosity in steady-state shear flows // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2013. Vol. 192. P. 48-65. [DOI](#)
5. Казаков А.В., Труфанова Н.М. Численное моделирование процесса течения полимера в кабельной головке и анализ зависимости параметров процесса от некоторых теплофизических свойств материала // Вестник ПГТУ. Механика. 2009. № 1. С. 130-136.
6. Dooley J., Rudolph L. Viscous and elastic effects in polymer coextrusion // Journal of plastic film & sheeting. 2003. Vol. 19. P. 111-122. [DOI](#)
7. Lee B.L., White J.L. An experimental study of rheological properties of polymer melts in laminar shear flow and of interface deformation and its mechanisms in two-phase stratified flow // Transactions of the Society of Rheology. 1974. Vol. 18. P. 467-492. [DOI](#)
8. Southern J.M., Ballman R.L. Additional observations on stratified bicomponent flow of polymer melts in a tube // J. Polymer Sci. Polymer physics edition. 1975. Vol. 13. No. 4. P. 863-869. [DOI](#)
9. Бачурина М.В., Казаков А.В., Труфанова Н.М. Численное исследование закономерностей течения anomalно вязких жидкостей // Вычисл. мех. сплош. сред. 2015. Т. 8, № 3. С. 298-309. [DOI](#)
10. Mitsoulis E., Heng F.L. Numerical simulation of coextrusion from a circular die // J. Appl. Polymer Sci. 1987. Vol. 34. P. 1713-1725. [DOI](#)
11. Гончаров Г.М., Гуданов И.С., Ломов А.А. О влиянии параметров заходной зоны цилиндрических каналов на качество агрегированных профилей // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 6. С. 137-141.
12. Гончаров Г.М., Ломов А.А., Гуданов И.С., Лаврентьев Ю.Б., Юрыгин П.П. Численное изучение процесса размерообразования при соэкструзии трубчатых изделий из резиновых смесей // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2013. Т. 56, № 12. С. 82-85.
13. Юрыгин П.П., Гуданов И.С., Гончаров Г.М., Ломов А.А. Математическое моделирование соэкструзии длинномерных кольцевых изделий из резиновых смесей // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 2. С. 267-271.
14. Гуданов И.С., Юрыгин П.П., Гончаров Г.М., Ломов А.А. Определение энергосиловых параметров процесса соэкструзии трубчатых профилей из резиновых смесей // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55, № 5. С. 116-118.
15. Снигерев Б.А., Тазюков Ф.Х. Двухслойное течение расплавов полимеров в каналах фильер // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2014. Т. 14, № 3. С. 349-354.
16. Mavridis H., Hrymak A.N., Vlachopoulos J. Finite-element simulation of stratified multiphase flows // AIChE Journal. 1987. No. 33. P. 410-422. [DOI](#)
17. Раувендааль К. Экструзия полимеров. СПб.: Профессия, 2008. 768 с.

18. Козицына М.В., Труфанова Н.М., Рябкова Н.А. Численно-экспериментальное определение реологических характеристик полимеров // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19, № 1. С. 155-169. [DOI](#)
19. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидродинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2004. № 2. С. 70-81.
20. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.

## References

1. Sunwoo K.B., Park S.J., Lee S.J., Ahn K.H., Lee S.J. Three-dimensional numerical simulation of nonisothermal coextrusion process with generalized Newtonian fluids. *Korea-Australia rheology journal*, 2000, vol. 12, no. 3/4, pp. 165-173.
2. Michaeli W. *Extrusion dies for plastic and rubber. Designs and engineering computations*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2003. 362 p.
3. Gifford W.A. A three-dimensional analysis of coextrusion. *Polymer Eng. Sci.*, 1997, vol. 37, no. 2, pp. 315-320. [DOI](#)
4. Malkin A.Y. Non-Newtonian viscosity in steady-state shear flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013, vol. 192, pp. 48-65. [DOI](#)
5. Kazakov A.V., Trufanova N.M. Chislennoye modelirovaniye protsessa techeniya polimera v kabel'noy golovke i analiz zavisimosti parametrov protsessa ot nekotorykh teplofizicheskikh svoystv materiala [Numerical simulation of the polymer flow process in the cable head and analysis of the dependence of the process parameters on some thermophysical properties of the material]. *Vestnik PGTU. Mekhanika – Bulletin of Perm State Technical University. Mechanics*, 2009, no. 1, pp. 130-136.
6. Dooley J., Rudolph L. Viscous and elastic effects in polymer coextrusion. *Journal of plastic film & sheeting*, 2003, vol. 19, pp. 111-122. [DOI](#)
7. Lee B.L., White J.L. An experimental study of rheological properties of polymer melts in laminar shear flow and of interface deformation and its mechanisms in two-phase stratified flow. *Transactions of the Society of Rheology*, 1974, vol. 18, pp. 467-492. [DOI](#)
8. Southern J.M., Ballman R.L. Additional observations on stratified bicomponent flow of polymer melts in a tube. *J. Polymer Sci. Polymer physics edition*, 1975, vol. 13, no. 4, pp. 863-869. [DOI](#)
9. Bachurina M.V., Kazakov A.V., Trufanova N.M. Numerical study of mechanisms of abnormally viscous liquid flows. *Vychisl. meh. splos. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2012, vol. 8, no. 3, pp. 298-309. [DOI](#)
10. Mitsoulis E., Heng F.L. Numerical simulation of coextrusion from a circular die. *J. Appl. Polymer Sci.*, 1987, vol. 34, pp. 1713-1725. [DOI](#)
11. Goncharov G.M., Gudanov I.S., Lomov A.A. About influence of parameters of the initial zone of cylindrical channels on quality of the aggregated profiles. *Nauchno-texnicheskij vestnik Povolzhya – Scientific and technical Bulletin of the Volga region*, 2011, no. 6, pp. 137-141.
12. Goncharov G.M., Lomov A.A., Gudanov I.S., Lavrent'yev Yu.B., Yurygin P.P. Chislennoye izucheniye protsessa razmeroobrazovaniya pri soekstruzii trubchatykh izdeliy iz rezinovykh smesey [Numerical study of the process of size formation during the coextrusion of tubular products from rubber compounds]. *Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – News of universities. Chemistry and chemical technology*, 2013, vol. 56, no. 12, pp. 82-85.
13. Yurygin P.P., Gudanov I.S., Goncharov G.M., Lomov A.A. Mathematical modeling of coextrusion of lengthy annular products from rubber compounds. *Nauchno-texnicheskij vestnik Povolzhya – Scientific and technical Bulletin of the Volga region*, 2013, no. 2, pp. 267-271.
14. Gudanov I.S., Yurygin P.P., Goncharov G.M., Lomov A.A. Opredeleniye energosilovykh parametrov protsessa soekstruzii trubchatykh profiley iz rezinovykh smesey [Determination of energy-power parameters of the process of coextrusion of tubular profiles made of rubber compounds]. *Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – News of universities. Chemistry and chemical technology*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 116-118.
15. Snigerev B.A., Tazyukov F.Kh. Double layer of polymer melts in channels of dies. *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika – News of Saratov university. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 349-354.
16. Mavridis H., Hrymak A.N., Vlachopoulos J. Finite-element simulation of stratified multiphase flows. *AIChE Journal*, 1987, no. 33, pp. 410-422. [DOI](#)
17. Rauwendaal Ch. *Polymer extrusion*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2001. 791 p.
18. Kozitsyna M.V., Trufanova N.M., Ryabkova N.A. Numerical and experimental determination of the rheological properties of polymers. *Vestnik PNIPIU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye – Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 155-169. [DOI](#)
19. Smirnov E.M., Zaytsev D.K. Metod konechnykh ob'yemov v prilozhenii k zadacham gidrogazodinamiki i teploobmena v oblastiakh slozhnoy geometrii [Finite volume method as applied to hydro- and gas dynamics and heat transfer problems in complex geometry domains]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGTU – Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University*, 2004, no. 2, pp. 70-81.
20. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. London: McGraw-Hill, 1971. 535 p.

Поступила в редакцию 28.09.2018, после доработки 15.10.2018; принята к опубликованию 16.10.2018

## Сведения об авторах

Козицына Мария Владимировна, б/с, ст. преп., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614061, Россия, Пермь, ул. Проф. Поздеева, д. 7; e-mail: bachurinamaria@gmail.com

Труфанова Наталья Михайловна, д.тн, проф., зав.каф., ПНИПУ; e-mail: trufanova@pstu.ru