

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.1.10

УДК 679.743.1:519.63

**М.В. Козицына, Н.М. Труфанова, Н.А. Рябкова**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ**

При разработке математических моделей течения и теплообмена полимерных материалов в различных каналах, в том числе в канале формирующего инструмента, необходимо задавать реологические характеристики исследуемых полимеров, что в ряде случаев сделать затруднительно, поскольку свойства материала не определены, например для привитого полиэтилена, когда прививка происходит непосредственно в канале экструдера. В статье рассмотрена задача численно-экспериментального определения реологических характеристик полимерных материалов. Был произведен ряд экспериментов для трех экструдеров, используемых для одновременного создания трехслойной изоляции кабеля. В результате эксперимента были получены величины давлений в каналах, температуры, время и масса истечения материалов, последнее позволило определить расходы материалов для трех экструдеров. В качестве материалов были использованы три марки полиэтилена Borealis LE 0592 для наложения экрана по жиле (канал 1), Borealis LE 4205 для изоляции (канал 2) и Borealis LE 0505 для экрана по изоляции (канал 3). Экспериментальные данные были приняты в качестве исходных при математическом моделировании процессов течения и теплообмена в каналах рассматриваемых экструдеров. Разработанные трехмерные математические модели тепломассопереноса реализованы с помощью метода конечных элементов в программном пакете ANSYS. В качестве реологического закона, параметры которого необходимо было определить, выбран степенной закон для эффективной вязкости и температурное уравнение Рейнольдса. В ходе численного исследования были определены реологические характеристики, входящие в степенной закон, и температурный коэффициент. Оценено влияние каждого из параметров на величину расхода материала для каждого из экструдеров. Сделан вывод о значительном влиянии показателя аномалии и начальной вязкости на величину расхода и малом влиянии величины температурного коэффициента для рассматриваемых режимов течения. Были построены расходно-напорные характеристики кабельных головок на основе численных и экспериментальных исследований, сравнение которых показало хорошую согласованность результатов.

**Ключевые слова:** численно-экспериментальное исследование, реология, полимер, формирующий инструмент, многослойное покрытие, полиэтилен, экструзия, математическое моделирование, аномально вязкая жидкость, степенной закон.

**M.V. Kozitsyna, N.M. Trufanova, N.A. Ryabkova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION  
OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMERS**

In case of development of mathematical models of the flow and heat exchange polymeric materials in the various channels, including the channel forming tool it is necessary to set the rheological

characteristics of the polymers investigated. However, in some cases it is difficult to determine the properties, since the material properties are not determined, for example, graft polyethylene, because grafting takes place directly in the channel of the extruder. The paper has been considered the problem of numerical and experimental determination of rheological properties of polymeric materials. The experiments have been performed for the three extruders used for the simultaneous creation of three-layered cable insulation. As a result of the experiment were obtained by the value of the pressure in the channels, temperature, time and mass of the materials, used the last to determine the flow rate of materials for the three extruders. In this investigation was used a properties of three materials for creation insulations of cable. The Polyethylene Borealis LE 0592 was used for shield 1 (channel 1), Borealis LE 4205 for insulation (channel 2) and Borealis LE 0505 for shield 2 (Channel 3). The experimental results were taken as input for mathematical modeling processes of flow and heat transfer in the channels investigated extruders. A developed three-dimensional mathematical model of heat and mass transfer has been realized by using the finite element method in ANSYS software package. During the numerical research have been defined rheological characteristics that are included in the power law, and the temperature coefficient. The effect of each of the parameters on the material consumption for each of extruders was estimated. The conclusion about the significant influence of parameter anomalies and the initial viscosity for flow rate, and the small effect of the temperature coefficient for the considered flow regimes was made. The consumables-pressure characteristics of the cable heads on the basis of numerical and experimental investigations have been built, the comparison of which was showed a good consistency of the results.

**Keywords:** numerical and experimental research, rheology, polymer, forming tool, multilayer coating, polyethylene, extrusion, mathematical modeling, abnormally viscous liquid, power law.

Экструзионный метод наложения пластмассовой изоляции широко применяется в кабельной промышленности, в том числе при изготовлении кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Одной из задач при его производстве является сохранение определенного температурного диапазона в канале экструдера и формирующем инструменте при заданных значениях величин слоев трехслойной изоляции кабеля. Поскольку экспериментальный подбор технологических параметров процесса наложения невозможен, используются методы математического моделирования. Для описания процессов движения и теплопереноса при экструзии сшиваемого полиэтилена необходимо знать реологические свойства полимера непосредственно в канале экструдера и кабельной головки.

Определение реологических свойств полимерных материалов позволяет сформулировать условия для получения конечного изделия требуемого качества. Следовательно, реологические свойства материалов тесно связаны с условиями переработки, в частности температурой расплава и давлением [1]. Знание реологических свойств позволяет правильно выбрать технологическое оборудование [2, 3].

Одним из наиболее распространенных реологических законов, описывающих состояние вязкой жидкости, является степенной закон [4, 5]. Цель работы – на основе результатов натурных и численных

экспериментов получить реологические параметры, входящие в степенной закон (начальная вязкость  $\mu_0$ , показатель аномалии вязкости  $n$ , температурный коэффициент  $\beta$ ), для трёх материалов, образующих трехслойную изоляцию кабеля.

Для анализа процессов течения полимеров в каналах кабельных головок было принято решение использовать численное моделирование [6, 7], которое ранее применялось весьма успешно как зарубежными, так и российскими авторами в одномерной [8], двухмерной [9–12] и трехмерной постановке [13, 14].

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились для трех экструдеров, предназначенных для наложения трех слоев общей изоляции кабеля: экрана по жиле, изоляционного слоя и экрана по изоляции. Геометрия формирующих инструментов экструдеров приведена на рис. 1. В ходе эксперимента изменялись частоты вращения шнека, фиксировались значения давлений в каналах, температура, масса и время истечения материалов. Затем материал взвешивался и вычислялся расход. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

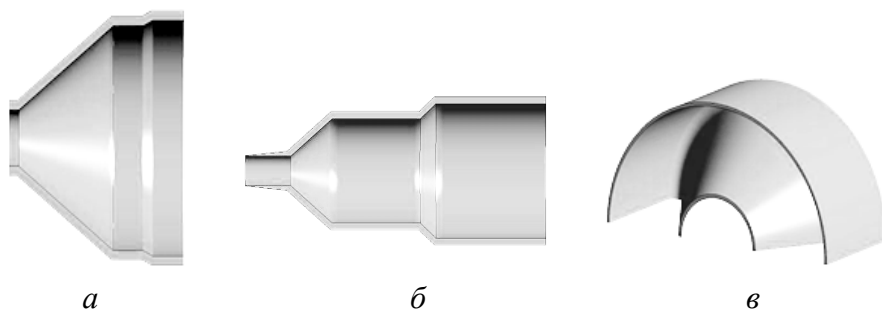


Рис. 1. Геометрия формирующих инструментов: *a* – канал 1 (для наложения экрана по жиле); *б* – канал 2 (для наложения изоляции); *в* – канал 3 (для наложения экрана по изоляции)

По данным эксперимента были построены расходно-напорные характеристики формирующих кабельных головок (рис. 2).

Из графика видно, что напорно-расходные кривые имеют нелинейный характер, что свидетельствует о существенной нелинейности свойств вязких полимерных материалов.

Таблица 1

Экспериментальные данные (при  $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Экран по жиле (канал 1)		Изоляция (канал 2)		Экран по изоляции (канал 3)	
Давление $p_{\text{вх}} \cdot 10^7$ , Па,	Расход $Q$ , кг/с	Давление $p_{\text{вх}} \cdot 10^7$ , Па,	Расход $Q$ , кг/с	Давление $p_{\text{вх}} \cdot 10^7$ , Па,	Расход $Q$ , кг/с
2,97	0,016	1,6	0,05	2,54	0,023
3,67	0,021	1,84	0,06	2,87	0,033
4,47	0,037	3,84	0,09	3,56	0,064

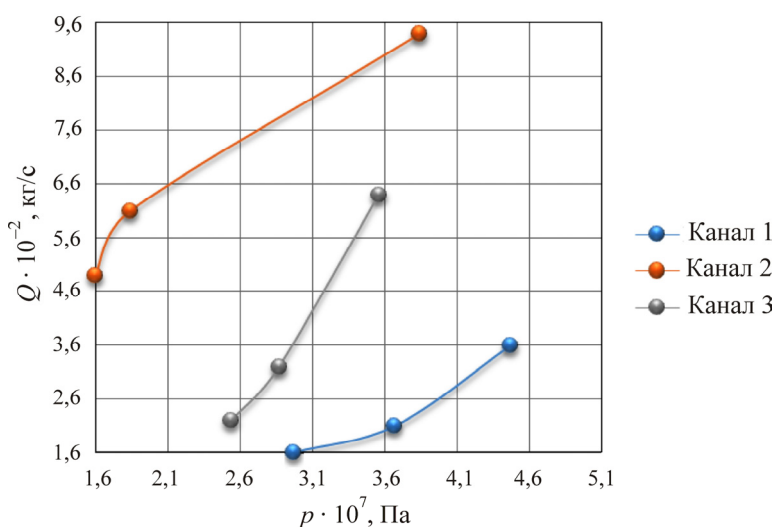


Рис. 2. Расходно-напорные характеристики материалов

### Численный эксперимент

При описании процессов течения и теплообмена в каналах кабельных головок был сделан ряд допущений:

- процесс стационарный;
- массовые силы малы;
- среда несжимаемая, без упругих свойств;
- теплофизические характеристики постоянны.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений в трехмерной постановке для каждого из каналов примет следующий вид [15]:

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho_m v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_m v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_m v_z)}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

– уравнения движения

$$\rho_m \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\rho_m \left( v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\rho_m \left( v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}; \quad (4)$$

– уравнение энергии

$$\rho_m C_m \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \tau_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} +$$

$$+ \tau_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tau_{xy} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \tau_{zx} \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right); \quad (5)$$

– реологические уравнения состояния

$$\tau_{xx} = 2\mu_3 \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\mu_3 \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \tau_{zz} = 2\mu_3 \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu_3 \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right), \quad (6)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu_3 \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right), \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu_3 \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right),$$

здесь  $\mu_3$  – эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры и определяющаяся степенным законом [4]

$$\mu_3 = \mu_0 \exp(-\beta(T - T_0)) \left( \frac{I_2}{2} \right)^{\frac{(n-1)}{2}}; \quad (7)$$

$\mu_0$  – начальная вязкость;  $I_2$  – второй инвариант тензора скоростей деформации;  $n$  – показатель аномалии вязкости;  $v_x, v_y, v_z$  – компоненты вектора скорости;  $\tau_{i,j}$  ( $i, j = x, y, z$ ) – компоненты тензора напряжений;  $T$  – температура;  $\beta$  – температурный коэффициент вязкости.

Граничные условия:

- на твердых непроницаемых стенках задано условие прилипания;
- температура стенок 120 °С;
- температура материала на входе каналов 120 °С;
- на входе в каналы задавалось значение давлений из эксперимента;
- на выходе из всех каналов – атмосферное давление.

В табл. 2 представлены теплофизические характеристики материала.

Таблица 2

Теплофизические характеристики материалов

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(кг · К)
Экран Borealis LE 0592	1080	0,182	1974
Изоляция Borealis LE 4205	779	0,182	2368
Экран Borealis LE 0505	1010	0,17	2000

Представленная математическая модель реализована с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS [6].

Анализ сходимости численного решения был проведен для всех трех геометрий. Было определено необходимое количество элементов и число итераций. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

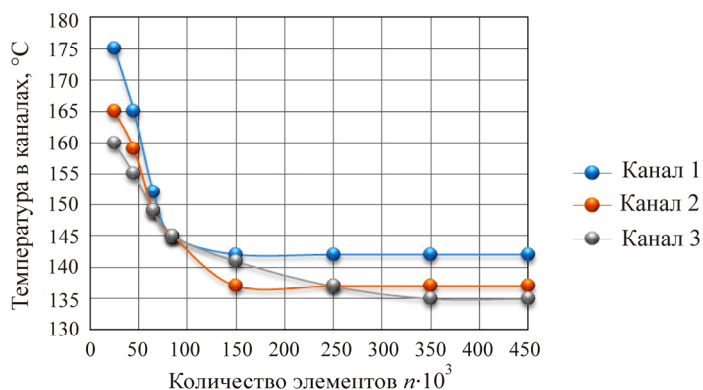


Рис. 3. График зависимости сходимости температуры от числа элементов модели

Из графика, представленного на рис. 3, следует, что при количестве элементов свыше 300 000 значение температур для каждой из геометрий не изменяется.

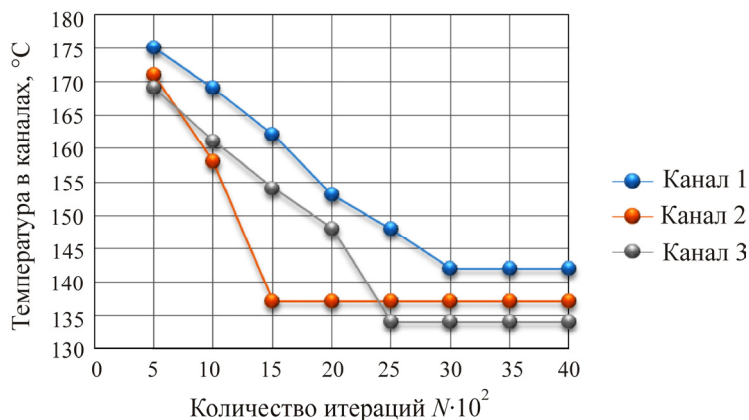


Рис. 4. График зависимости сходимости температуры от количества итераций

При количестве итераций свыше 3000 процесс можно считать установившимся для каждого канала, так как значения температуры, скорости и вязкости остаются неизменными.

Для определения параметров реологического уравнения для каждого из каналов был проведен ряд численных экспериментов, в ходе которых варьировались значения начальной вязкости, показателя аномалии и температурного коэффициента и оценивалась близость полученных величин расходов экспериментальным данным (для каждой точки расходно-напорной кривой).

Поскольку характер численных экспериментов для трех каналов был одинаков, то в табл. 3 приведены результаты численных и экспериментальных исследований течения изоляционного полимера в канале 2 для одной из заданных величин расхода и давления.

Подобные результаты были получены и для двух других каналов.

В результате проведенных численных исследований было определено влияние каждого из параметров реологического закона на величину расхода материала в канале формирующего инструмента.

Таблица 3

Результаты численных и экспериментальных исследований для канала 2 ( $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{вх}} = 1,6 \cdot 10^7 \text{ Па}$ , экспериментальное значение  $Q = 0,0496 \text{ кг/с}$ )

Номер варианта	$Q$ , кг/с, расчетное значение	$\mu_0$	$n$	$\beta$
1	0,15	30 000	0,4	0,012
2	0,0453	49 000	0,4	0,012
3	0,0465	49 000	0,4	0,015
4	0,0479	49 000	0,4	0,018
5	0,043	50 000	0,4	0,012
6	0,039	52 000	0,4	0,012
7	0,0747	60 000	0,3	0,012
8	0,048	68 700	0,3	0,012
9	0,047	69 000	0,3	0,012
10	0,045	70 000	0,3	0,012
11	0,276	70 000	0,2	0,012
12	0,042	71 000	0,3	0,012
13	0,079	90 000	0,2	0,012
14	0,0468	100 000	0,2	0,012

Было установлено, что величина температурного коэффициента оказывает наименьшее влияние на значение расхода: максимальное отличие численного значения от полученного в эксперименте не превышало 13 %. Из рис. 5 видно, что при увеличении  $\beta$  на 40 % увеличение расхода у изоляции не превышает 6 %, а у экранов – 10 и 13 %.

Показатель аномалии и начальная вязкость имеют существенное влияние на расход, величина которого может изменяться в несколько раз.

Зависимость расхода от величины начальной вязкости материала при разных коэффициентах аномалии представлена на рис. 6.



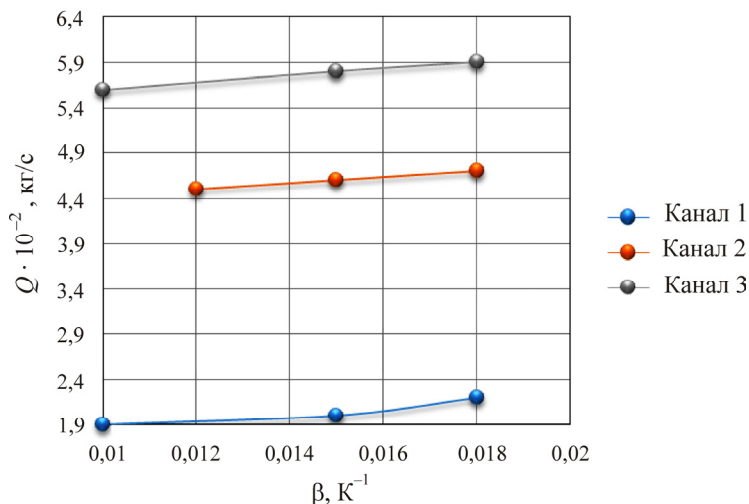
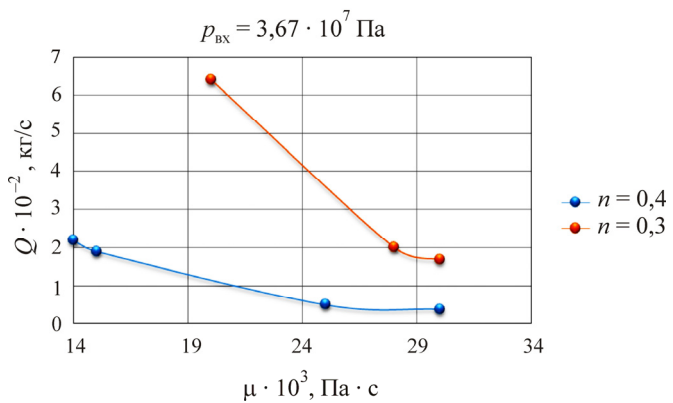


Рис. 5. Зависимость вязкости от температурного коэффициента

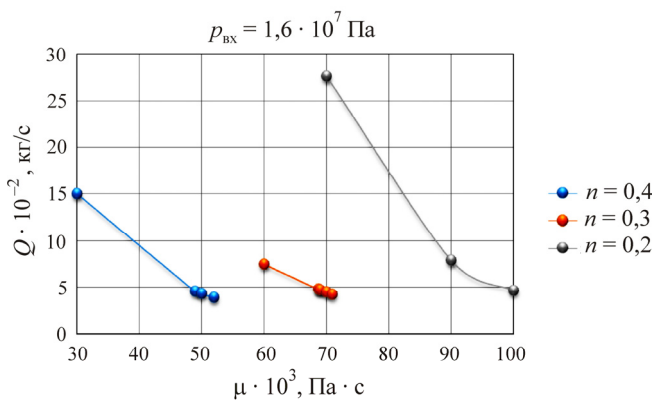
Нужно отметить, что изменение величины аномалии при заданных значениях начальной вязкости не позволяло получить близкие к эксперименту значения расходов одновременно для трех значений давлений (из эксперимента). При уменьшении значений аномалии до 0,3 и 0,2 величины расходов в несколько раз превышали экспериментально определенные значения расходов. Поскольку наиболее плавная зависимость расхода от начальной вязкости соответствовала показателю аномалии 0,4, то именно это значение было выбрано в качестве параметра реологического закона.

Из рис. 6 видно, что наиболее близкими к экспериментальным значениям являются численные значения расхода, полученные для следующих значений начальной вязкости: материал изоляции – 49 000, материала для экрана по жиле – 14 000, экрана по изоляции – 17 500. Для подтверждения справедливости сделанного выбора был проведен ряд численных исследований для каждого из значений эксперимента (расход – давление), результаты которых представлены в табл. 4.

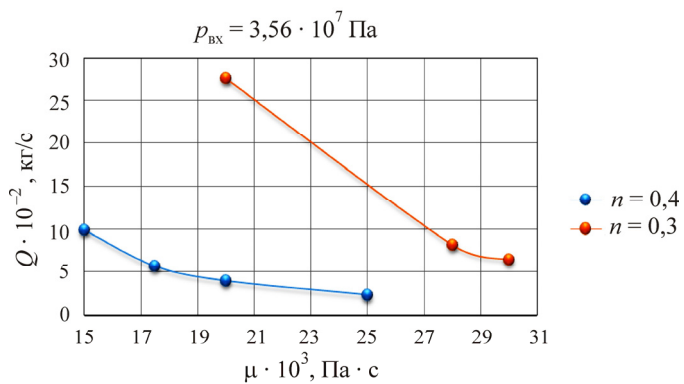
На рис. 7–9 приведены графики расходно-напорных характеристик, построенных по экспериментальным и численным данным для трех каналов. Реологические параметры материалов для расчетного варианта представлены в табл. 4. Анализ полученных зависимостей показал хорошее соответствие численных и экспериментальных значений, наибольшее отличие для канала 3 не превысило 13 %.



*a*



*б*



*в*

Рис. 6. Зависимость расхода от вязкости при различных значениях аномалии  $n$ : *a* – канал 1; *б* – канал 2; *в* – канал 3

Таблица 4

Результаты численных и экспериментальных исследований ( $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Канал	Результаты эксперимента		Результаты моделирования	
	$p_{\text{вх}} \cdot 10^7, \text{ Па,}$	$Q, \text{ кг/с}$	$p_{\text{вх}} \cdot 10^7, \text{ Па,}$	$Q, \text{ кг/с}$
Канал 1 (экран по жиле)*	2,97	0,0162	2,97	0,0122
	3,67	0,021	3,67	0,022
	4,47	0,0366	4,47	0,0389
Канал 2 (изоляция)**	1,6	0,0496	1,6	0,0453
	1,84	0,06157	1,84	0,0646
	3,84	0,09435	3,84	0,09436
Канал 3 (экран по изоляции)***	2,54	0,0227	2,54	0,0238
	2,87	0,0327	2,87	0,0322
	3,56	0,0644	3,56	0,056

\*  $n = 0,4; \beta = 0,01; \mu_0 = 14\ 000$ ; \*\*  $n = 0,4; \beta = 0,012; \mu_0 = 49\ 000$ ; \*\*\*  $n = 0,4; \beta = 0,01; \mu_0 = 17\ 500$ .

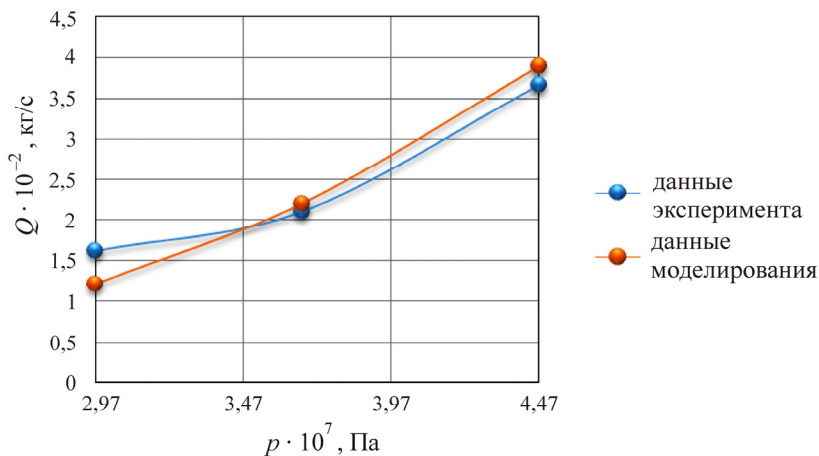


Рис. 7. Зависимость расхода от давления для канала 1

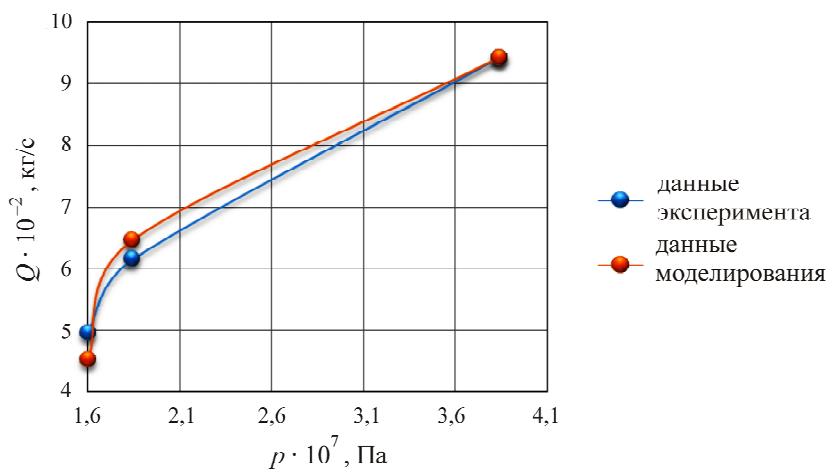


Рис. 8. Зависимость расхода от давления для канала 2

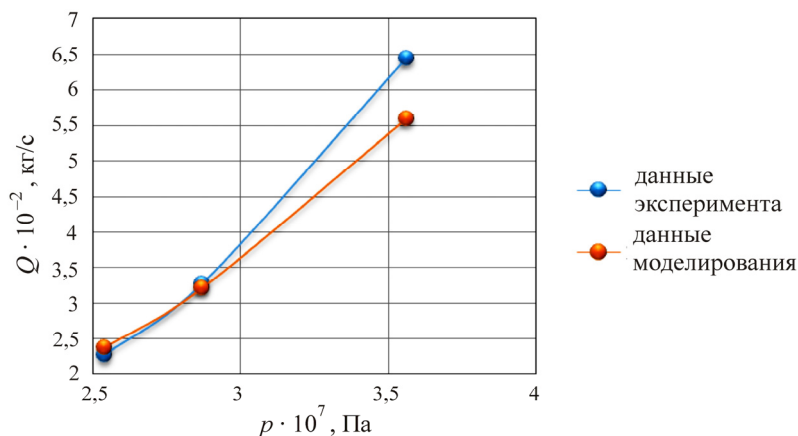


Рис. 9. Зависимость расхода от давления для канала 3

### Заключение

В результате проведенных численных экспериментов были определены реологические характеристики степенного закона для трех различных материалов и исследовано влияние этих параметров (начальной вязкости, показателя аномалии, температурного коэффициента) на расходы в каналах с заданной геометрией. Построены расходно-напорные характеристики кабельных экструзионных головок.

### Список литературы

1. Кутузова М.А., Кутузов А.Г., Кутузова Г.С. Влияние температуры экструзионной головки на качество получаемого изделия // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – № 21. – С. 130–132.
2. Хан Ч.Д. Реология в процессах переработки материалов. – М.: Химия, 1979. – 368 с.
3. Труфанова Н.М. Переработка полимеров: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 158 с.
4. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
5. Переработка волокнообразующих полимеров / В.И. Янков, В.И. Боярченко, В.П. Первадчук, И.О. Глот. – М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. – 268 с.
6. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1979. – 541 с.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
8. Han C.D., Chin H.B. Theoretical prediction of the pressure gradients in coextrusion of non-Newtonian fluids // Polymer Engineering and Science. – 1979. – № 16. – P. 1156–1162.
9. Митрошин В.Н. Математическое моделирование процесса течения расплава полимера в канале кабельной головки // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 1. – С. 198–201.
10. Гуданов И.С., Лаврентьев Ю.Б., Гончаров Г.М. Анализ методов расчета стратифицированного течения аномально вязких жидкостей в мультиплексных формирующих головках // Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51, № 8. – С. 68–69.
11. Han C.D. A study on the interfacial instability in the stratified flow of two viscoelastic fluids through a rectangular duct // Trans. Soc. Rheol. – 1977. – Vol. 21. – P. 101–131.
12. Бачурина М.В., Казаков А.В., Труфанова Н.М. Численное исследование закономерностей течения аномально вязких жидкостей // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 298–309.
13. Математическое моделирование соэкструзии длинномерных кольцевых изделий из резиновых смесей / П.П. Юрьгин, И.С. Гуданов, Г.М. Гончаров, А.А. Ломов // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 267–271.
14. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: конструкции и технические расчеты. – СПб.: Профессия, 2007. – 472 с.
15. Казаков А.В., Ершов С.В. Математическое моделирование и численное исследование процессов тепломассопереноса в канале дозирующего экструдера // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 31–34.

### References

1. Kutuzova M.A., Kutuzov A.G., Kutuzova G.S. Vliianie temperature ekstruzionnoi golovki na kachestvo poluchaemogo izdeliia [Influence of temperature of an extrusive

head on quality of the received product]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, no. 21, pp. 130–132.

2. Khan Ch.D. Reologiya v protsessakh pererabotki materialov [Rheology in processes of processing of materials]. Moscow, Khimiia, 1979, 368 p.

3. Trufanova N.M. Pererabotka polimerov: uchebnoe posobie [Processing of polymers: manual]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, 158 p.

4. Tadmor Z., Gogos K. Teoreticheskie osnovy pererabotki po-limerov [Theoretical bases of processing of polymers]. Moscow, Khimiia, 1984, 632 pp.

5. Iankov V.I., Boiarchenko V.I., Pervadchuk V.P., Glot I.O. Pererabotka voloknoobrazuyushchikh polimerov [Processing voloknoobrazuyushchikh of polymers]. Moscow, Izhevsk, Reguliarnaia i khaoticheskaia dinamika, 2005, 268 p.

6. Zenkevich O.S. Metod konechnykh elementov v tekhnike [Method of final elements in the equipment]. Moscow, Mir, 1979, 541 p.

7. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of a method of final elements]. Moscow, Mir, 1979, 392 p.

8. Han C.D., Chin H.B. Theoretical prediction of the pressure gradients in coextrusion of non-Newtonian fluids. *Polymer Engineering and Science*, 1979, no. 16, pp. 1156–1162.

9. Mitroshin V.N. Matematicheskoe modelirovanie protsessa techeniia rasplava polimera v kanale kabel'noi golovki [Mathematical modeling of process of a current of fusion of polymer in the channel of a cable head]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 1, pp. 198–201.

10. Gudanov I.S., Lavrent'ev Iu.B., Goncharov G.M. Analiz metodov rascheta stratifitsirovannogo techeniia anomal'no вязких жидко-стеi v mul'tipleksnykh formuiushchikh golovkakh [The analysis of methods of calculation of the stratified current of abnormally viscous liquids in the multiplex molding heads]. *Khimiia i khimicheskaiia tekhnologiya*, 2008, vol. 51, no., pp. 68–69.

11. Han S.D. A study on the interfacial instability in the stratified flow of two viscoelastic fluids through a rectangular duct. *Trans. Soc. Rheol.*, 1977, pp. 101–131.

12. Bachurina M.V., Kazakov A.V., Trufanova N.M. Chislennoe is-sledovanie zakonornostei techeniia anomal'no вязких жидкостей [Numerical research of regularities of a current of abnormally viscous liquids]. *Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 298–309.

13. Iurygin P.P., Gudanov I.S., Goncharov G.M., Lomov A.A. Matematicheskoe modelirovanie soekstruzii dlinnomernykh kol'tsevykh izdelii iz rezinovykh smesei [Mathematical modeling of a soekstruziya of lengthy ring products from rubber mixes]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2013, no. 2, pp. 267–271.

14. Mikaeli V. Ekstruzionnye golovki dlia plastmass i reziny: konstruksii i tekhnicheskie raschety [Extrusive heads for plastic and rubber: designs and technical calculations]. Saint-Petersburg, Professiiia, 2007, 472 p.

15. Kazakov A.V., Ershov S.V. Matematicheskoe modelirovanie i chislennoe issledovanie protsessov teplomassoperenosa v kanale doziruiushchego ekstrudera [Mathematical

cal modeling and numerical research of processes of a heatmass transfer in the channel of the dosing extruder]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2013, no. 3, pp. 31–34.

Получено 12.09.2016

#### **Об авторах**

**Козицына Мария Владимировна** (Пермь, Россия) – аспирантка, ассистент кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: bachurinamaria@gmail.com.

**Труфанова Наталия Михайловна** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: trufanova@pstu.ru.

**Рябкова Наталья Андреевна** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: nataha170694@yandex.ru.

#### **About the authors**

**Maria V. Kozitsyna** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Assistant, Department of Design and Technology in Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: bachurinamaria@gmail.com.

**Nataliia M. Trufanova** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Design and Technology in Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ktei@pstu.ru.

**Natal'ia A. Ryabkova** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Design and Technology in Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: nataha170694@yandex.ru.