

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НЕОДНОРОДНОСТИ СКОРОСТИ НА СТЕПЕНЬ РАЗБУХАНИЯ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ СОЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ

Долгин Д.С.¹, Гуданов И.С.¹, Лебедев А.Е.¹, Ватагин А.А.¹, Мурашов А.А.²

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль;

²Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
имени Маршала Советского Союза Л.А. Говорова, Ярославль

Ключевые слова: постэкструзионное разбухание, полимерные материалы, усиленная зона контакта, зубец, численная математическая модель, МКЭ.

Аннотация. В статье выявлено влияние коэффициента неоднородности скорости на степень разбухания резиновых смесей при соэкструзии полимеров, а так же определена рациональная длина зоны совместного течения полимерных материалов в канале соэкструзионной головки. Выполнено численное моделирование процесса течения полимерных материалов в соэкструзионной головке и области со свободной поверхностью, позволяющее получать изделия с усиленной поверхностью контакта материалов заданной формы. Моделирование проводилось в программно-вычислительном комплексе ANSYS с использованием МКЭ. В качестве реологического уравнения использовано степенное уравнение состояния Оствальда-де Вилля. В ходе численного моделирования получены картина распределения скоростей и форма готового изделия с учетом постэкструзионного разбухания и на их основе выявлено влияние коэффициента неоднородности скорости на степень разбухания.

THE EFFECT OF THE COEFFICIENT OF VELOCITY INHOMOGENEITY ON THE DEGREE OF SWELLING OF RUBBER COMPOUNDS DURING POLYMER CO-EXTRUSION

Dolgin D.S.¹, Gubanov I.S.¹, Lebedev A.E.¹, Vatagin A.A.¹, Murashov A.A.²

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl;

²Yaroslavl Higher Military School of Air Defense
named after Marshal of the Soviet Union L.A. Govorov, Yaroslavl

Keywords: post-extrusion swelling, polymer materials, reinforced contact zone, tooth, numerical mathematical model, FEM.

Abstract. The article reveals the influence of the coefficient of velocity inhomogeneity on the degree of swelling of rubber compounds during polymer extrusion, as well as the rational length of the zone of joint flow of polymer materials in the channel of the coextrusion head. Numerical simulation of the flow of polymer materials in a coextrusion head and a region with a free surface is performed, which allows to obtain products with a reinforced contact surface of materials of a given shape. The simulation was carried out in the ANSYS software and computing complex using FEM. The Ostwald-de Ville power equation of state is used as a rheological equation. In the course of numerical modeling, a velocity distribution pattern and the shape of the finished product were obtained, taking into account post-extrusion swelling, and based on them, the influence of the velocity inhomogeneity coefficient on the degree of swelling was revealed.

Введение. С увеличением объемов и скорости развития производства комбинированных изделий на полимерной основе возрастают требования к качеству получаемой продукции. В современных реалиях соответствовать большому спектру разнообразных требований к изготавливаемой продукции могут только агрегированные материалы, в которых каждому слою будут присущи только часть требований [1]. Такие многослойные изделия находят применение в различных отраслях промышленности: химической, строительной, военной и т.д. Большинство изделий имеют длинномерную форму. Поэтому особое внимание следует уделить длинномерным комбинированным изделиям многослойного исполнения: полимерные гусеницы, резиновые трамвайные вкладыши и плиты, полотна ручек эскалаторов, рабочие органы транспортерных лент, протекторы автомобильных шин, уплотнительные шнуры, прокладки и др.

Постановка задачи и цели исследования

Приведенные выше изделия изготавливают методом соэкструзии. Соэкструзия – это процесс, в котором два или более полимерных материала совместно продавливаются через формообразующее отверстие (фильеру) для получения заданного профиля [2].

Несмотря на достаточный уровень развитости техники и технологии процесса соэкструзии остаётся не до конца решённой проблема неустойчивости формы (искажения наружной поверхности экструдата, изменение формы готового продукта). Эта проблема проявляется из-за различных реологических свойств полимеров, в которых в процессе течения их по каналам соэкструзионной головки накапливаются различные упругие напряжения. После выхода экструдата из головки эти напряжения высвобождаются и происходит разбухание резиновых смесей [3, 4].

Для решения этой проблемы предложено формировать в зоне контакта материалов искусственные неровности – зубцы [5]. Эти элементы позволяют не только увеличить площадь контакта, но и приводят к перераспределению материала внутри головки, что вызывает перераспределение скорости внутри потока и уменьшает количество упругих напряжений, что в свою очередь уменьшает степень разбухания экструдата [6].

Для получения готового изделия заданного качества необходимо разработать математическую модель, позволяющую учитывать процесс постэкструзионного разбухания. Это необходимо для ускорения процесса проектирования оснастки при изготовлении новой номенклатуры получаемых изделий.

Математическая модель процесса соэкструзии

За основу возьмем математическую модель, приведенную в [7, 8]. Рассмотрим трехмерную схему течения полимерных материалов в каналах соэкструзионной головки и в зоне со свободной поверхностью для получения прямоугольных двухслойных изделий с усиленной поверхностью контакта (рис. 1) в численной постановке.

Зададим граничные условия.

Выходное сечение «S1» (выходная поверхность экструдата) характеризуется установившимися однородными профилями скоростей и напряжений:

$$\begin{cases} V_x = V_y = 0, \\ \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \\ p = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где V_x , V_y , V_z – проекции вектора результирующей скорости; p – давление в головке.

На входе в головку (поверхности «S2») задаются начальные скорости для материалов I и II (V_0^I и V_0^{II} соответственно) направленные нормально к поверхности:

$$\begin{cases} V_x^I = V_y^I = 0, \\ V_z^I = V_0^I, \\ V_x^{II} = V_y^{II} = 0, \\ V_z^{II} = V_0^{II}. \end{cases} \quad (2)$$

Граничные условия на твердых стенках «S3»:

$$V_x = V_y = V_z = 0. \quad (3)$$

Граничные условия для межфазной поверхности «S4»:

– кинематическое условие (обеспечение непрерывности скоростного профиля и отсутствие проскальзывания материалов относительно друг друга):

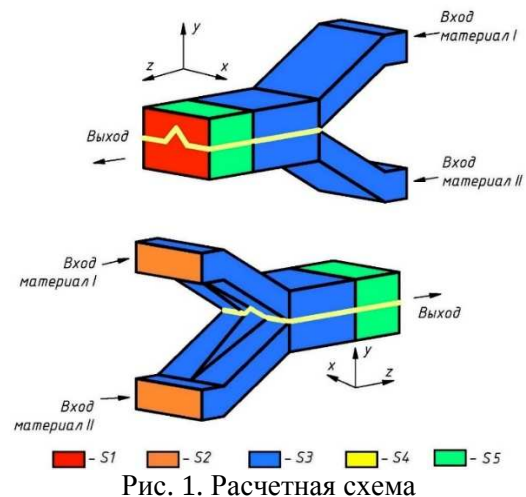


Рис. 1. Расчетная схема

$$\begin{cases} \vec{V}^I \cdot \vec{n}^I = \vec{V}^II \cdot \vec{n}^II = \vec{V}^\Sigma \cdot \vec{n}^\Sigma = 0, \\ \vec{V}^I \cdot \vec{t}^I = \vec{V}^II \cdot \vec{t}^I, \\ \vec{V}^I \cdot \vec{t}^II = \vec{V}^II \cdot \vec{t}^II, \end{cases} \quad (4)$$

где $\vec{V}^I$, $\vec{V}^II$, $\vec{V}^\Sigma$ – векторы скоростей материалов I, II и поверхности раздела «S4» соответственно; $\vec{n}^I$, $\vec{n}^II$, $\vec{n}^\Sigma$ – единичные векторы нормалей к поверхностям материалов I, II и поверхности раздела «S4» соответственно; $\vec{t}^I$, $\vec{t}^II$ – единичные векторы касательных к поверхностям материалов I и II соответственно;

– динамическое условие (обеспечивает свободное деформирование границы раздела и непрерывность поля напряжений):

$$\begin{cases} \tau^I \cdot \vec{t}^I = \tau^{II} \cdot \vec{t}^I, \\ \tau^I \cdot \vec{t}^II = \tau^{II} \cdot \vec{t}^II, \\ \tau^I \cdot \vec{n}^\Sigma = \tau^{II} \cdot \vec{n}^\Sigma, \end{cases} \quad (5)$$

где τ^I , τ^{II} – полные тензоры напряжений для материалов I и II соответственно.

Зона «S5» – это свободная поверхность, где в последующем будет наблюдаться явление постэкструзионного разбухания:

– кинематическое условие (условие непроницаемости, заключающееся в исключении случаев выхода частиц за свободную поверхность):

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = 0, \quad (6)$$

где $\vec{V}$ – вектор скорости материалов; $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности «S5»;

– динамическое условие:

$$\begin{cases} \tau \cdot \vec{n} = 0, \\ \tau \cdot \vec{t} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $\vec{t}$ – единичный вектор касательной к поверхности «S5».

При математическом моделировании приняты следующие допущения: течение установившееся; процесс протекает при постоянной температуре; материалы несжимаемы; резиновые смеси при течении не смешиваются; массовые и инерционные силы малы по сравнению с силами внутреннего трения; отсутствие проскальзывания материалов на поверхности раздела слоев, а также по стенкам формирующих каналов; равенство температур резиновых смесей на поверхности раздела слоев; отсутствие теплообмена между экструдатом и окружающей средой.

Математическая модель с учетом допущений состоит из системы уравнений:

1) уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0, \quad (8)$$

где ρ – плотность резиновой смеси; t – время;

2) уравнения сохранения количества движения в проекции на оси x , y и z соответственно:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x, \\ \rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y, \\ \rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z, \end{cases} \quad (9)$$

где g_x , g_y , g_z – проекции главного вектора массовых сил, действующих на каждую частицу материала;

3) реологическое уравнение Оствальда де Виля:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n, \quad (10)$$

где τ – тензор напряжений, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, K – степень консистенции, n – индекс течения.

Полимерные материалы, используемые для опыта

Для эксперимента были использованы полимерные материалы с реологическими и материальными константами, представленными в таблице 1.

Табл. 1. Реологических константы полимеров

Параметр	Значение	
Материал	I	II
Индекс течения n	0,311	0,374
Степень консистенции K , МПа·с ⁿ	35069	43558
Плотность ρ , кг·м ³	1110	1130

Форма каналов

В первую очередь создаем 3D-модель каналов течения резиновых смесей в новой модельной соэкструзионной головке (рис. 2). На рисунке 2 приведены размеры новой модельной соэкструзионной головки с усиленной поверхностью контакта материалов. Все размеры указаны относительно одного параметра – высоты слоя h . Рекомендованные соотношения длин зон согласно [9]. Для численных опытов высота канала принята близкой к реальным размерам заготовок – $h = 10$ мм.

Форму зубцов для головки выберем рациональную, определенную в [10], т.е. два зубца в виде треугольника, со значением относительной высоты зубца $z' = 0,4$, углом зубца $\gamma = 60^\circ$ и расстоянием между ними $s' = 1,5$ (рис. 3).

Реализуем численную модель с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS. Для ускорения расчета моделируем только половину канала. В ходе моделирования получены картина распределения скоростей и давлений (рис. 4, а), а также форма изделия с учетом постэкструзионного разбухания (рис. 4, б).

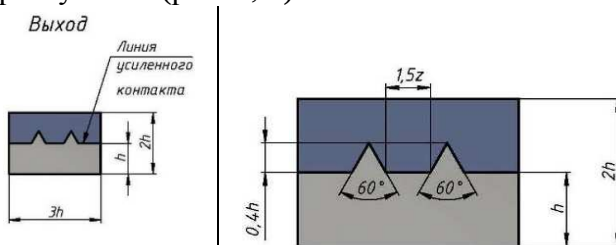
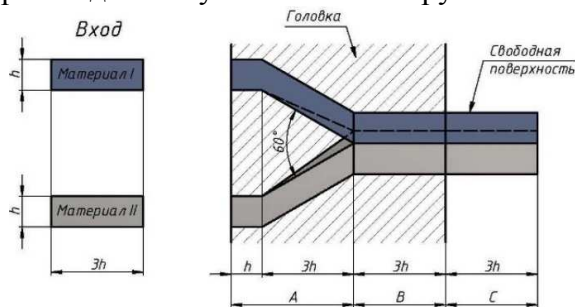


Рис. 2. Модель течения резиновых смесей с учетом разбухания

Рис. 3. Форма и размеры зубцов

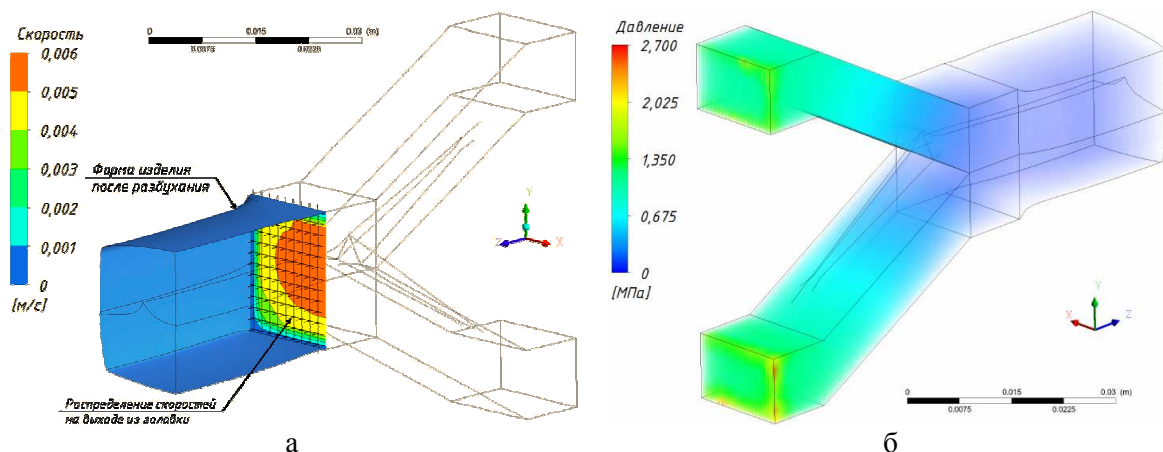


Рис. 4. Результаты численного моделирования

Обработка полученных результатов

Для оценки качества получаемой продукции используем управляемые параметры – коэффициент неоднородности скорости для сечения на выходе из соэкструзионной головки (E) и максимальный перепад давления в головке (Δp).

Для расчета E необходимо полученные поля распределения скоростей на выходе из головки разделить на q участков (рис. 4, а), на каждом из которых определено значение скорости v_i . Тогда E определяется по формуле:

$$E = v_{cp}^{-1} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q (v_i - v_{cp})^2}{q-1}}, \quad (11)$$

где v_{cp} – средняя скорость в выходном сечении:

$$v_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^q v_i}{q}. \quad (12)$$

Перепад давления определяем из рисунка 4, б.

В качестве управляющего параметра предлагается использовать относительную длину зоны совместного течения L' (рис. 5), которая определяется по следующей формуле:

$$L' = L / h, \quad (13)$$

где L – длина зоны совместного течения полимеров.

Для оценки влияния коэффициента неоднородности скорости на степень разбухания введем параметр – относительная площадь сечения получаемого экструдата после разбухания $S_{отн}$ (рис. 6). Этот параметр измеряется в процентах и определяется по следующей формуле:

$$S_{отн} = \frac{S_{\phi} - S_z}{S_z} \cdot 100, \quad (14)$$

где S_{ϕ} – фактическая площадь сечения экструдата после разбухания; S_z – площадь выходного сечения головки.

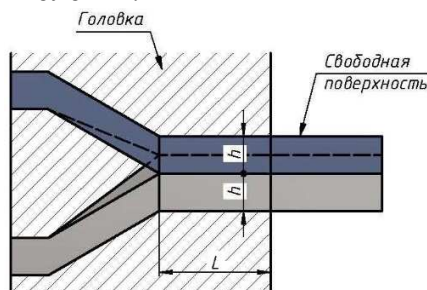


Рис. 5. Относительная длина зоны совместного течения полимеров

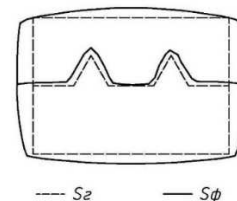


Рис. 6. Фактическая площадь сечения экструдата и площадь выходного сечения головки

Анализ результатов численного моделирования разбухания

Вначале определим основной геометрический параметр соэкструзионной головки – рекомендованную длину зоны совместного течения материалов. Для этого параметр L' разделим следующим образом: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 и 20. Для каждого значения относительной длины определяем значения коэффициента неоднородности скорости и значения максимального перепада давления и наносим точки на график (рис. 7). Анализ графика показывает, что при значении $L' = 1$ наблюдается максимальное значение коэффициента неоднородности скорости 0,726 и минимальное значение перепада давления в головке 2,700 МПа. При увеличении длины зоны совместного течения от 1 до 5 наблюдается резкое уменьшение коэффициента неоднородности скорости до значения 0,519. При дальнейшем увеличении длины зоны совместного течения коэффициент неоднородности скорости почти не меняется. При этом давление на всём участке измерения длины зоны совместного течения линейно возрастает.

Таким образом, изготовление головок с относительной длиной зоны совместного течения полимеров от 3 до 4 наиболее рационально, поскольку при дальнейшем увеличении значительно возрастает перепад давления в головке, что приведет к значительному увеличению мощности червячной машины.

Далее из этого численного опыта выявим влияние коэффициента неоднородности скорости на степень разбухания экструдата. Для этого построим графики зависимости коэффициента неоднородности скорости и относительной площади сечения получаемого экструдата после разбухания от длины зоны совместного течения полимерных материалов (рис. 8). Анализ графика показывает, что зависимость относительной площади аналогична зависимости коэффициента неоднородности. При увеличении значения относительной длины канала до 5 наблюдается резкое уменьшение относительной площади, до значения 3,5%. При дальнейшем увеличении длины зоны совместного течения относительная площадь почти не меняется.

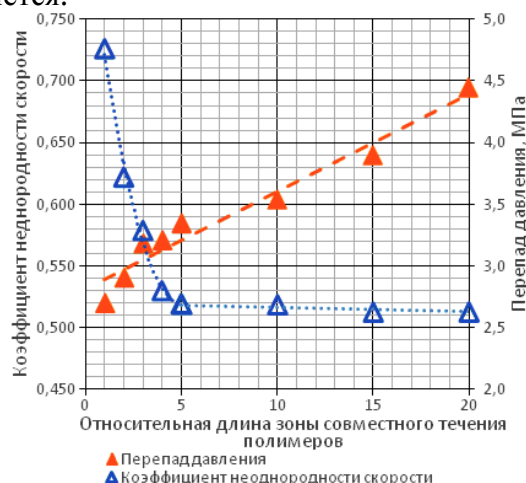


Рис. 7. Зависимость коэффициента неоднородности скорости и перепада давления от относительной длины зоны совместного течения полимеров

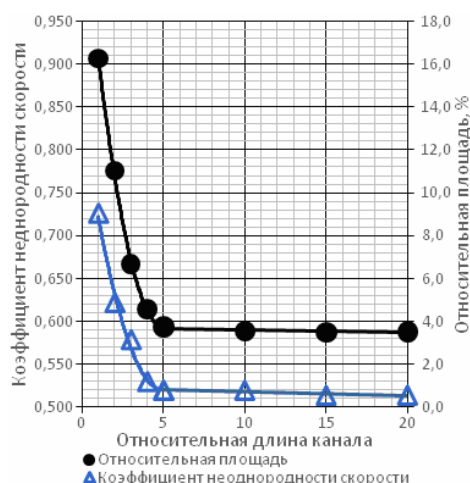


Рис. 8. Зависимость коэффициента неоднородности скорости и относительной площади сечения от относительной длины зоны совместного течения полимеров

Таким образом, зная коэффициент неоднородности скорости из графика (рис. 8) можно определить значение относительной площади получаемого экструдата.

Основные результаты и выводы

1. Представлена численная математическая модель процесса соэкструзии с целью выявления влияния коэффициента неоднородности скорости на форму получаемого изделия путем добавления зоны со свободной поверхностью, в которой и протекает процесс постэкструзионного разбухания.

2. Из численного опыта определены границы применения основного геометрического параметра соэкструзионной головки – рациональной относительной длины зоны совместного течения полимеров, который составляет от 3 до 4 высот канала.

3. Выявлено влияние коэффициента неоднородности скорости и относительной площади сечения получаемого экструдата после разбухания от длины зоны совместного течения полимерных материалов. Построен график зависимости, позволяющий по значению коэффициента неоднородности определить степень разбухания материала.

Список литературы

1. Тихонов Н.Н., Шерышев М.А. Современные технологии и оборудование экструзии полимеров. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2019. – 256 с.
2. Володин В.П. Технологическая оснастка в производстве профильных изделий. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2021. – 520 с.
3. Соколов М.В., Клинков А.С., Беляев П.С., Скуратов В.К., Однолько В.Г. Методология расчета оборудования для производства длинномерных резинотехнических заготовок заданного качества. – М.: Машиностроение, 2009. – 352 с.

4. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчеты. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2018. – 472 с.
5. Долгин Д.С., Лаврентьев Ю.Б., Гуданов И.С., Лебедев А.Е., Ватагин А.А. Выявление рациональной формы зубца полимерных многослойных изделий // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №24. – С. 74-80.
6. Залунаев М.Ю. Метод расчета процесса экструзии резиновых смесей и оптимизация геометрии профилирующих каналов: дисс. ... канд. техн. наук. – Ярославль, 2001. – 128 с.
7. Долгин Д.С., Лаврентьев Ю.Б., Гуданов И.С., Лебедев А.Е., Ватагин А.А., Веткин Ю.А. Проверка адекватности математической модели процесса течения полимеров в дуплексных экструзионных головках // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №26. – С. 73-79.
8. Hao X., Zhang G., Deng T. Improved optimization of a coextrusion die with a complex geometry using the coupling inverse design method // Polymers. 2023, vol. 15, no. 15, p. 3310.
9. Гуданов И.С. Метод расчета соэкструзии резиновых смесей и мультиплексных формующих головок: дисс. ... канд. техн. наук. – Ярославль, 2009. – 184 с.
10. Долгин Д.С., Гуданов И.С., Лебедев А.Е., Екимов Я.В. Численное определение рациональных размеров формообразующего канала при соэкструзии изделий или профилей с усиленной зоной контакта материалов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2023. – №3. – С. 46-48.

References

1. Tikhonov N.N., Sheryshev M.A. Modern technologies and equipment for polymer extrusion. – SPb.: PSC "Profession", 2019. – 256 p.
2. Volodin V.P. Technological equipment in the production of profile products. – SPb.: PSC "Profession", 2021. – 520 p.
3. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyaev P.S., Skuratov V.K., Odnolko V.G. Methodology for calculating equipment for the production of long-length rubber blanks of a given quality. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – 352 p.
4. Mikaëli V. Extrusion heads for plastics and rubber: Designs and technical calculations. – SPb.: PSC "Profession", 2018. – 472 p.
5. Dolgin D.S., Lavrentiev Yu.B., Gudanov I.S., Lebedev A.E., Vatagin A.A. Identification of the rational shape of the tooth of polymer multilayer products // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 24, pp. 74-80.
6. Zalunaev M.Yu. Method of calculating the process extrusion of rubber compounds and optimization of the geometry of profiling channels: diss. ... cand. of tech. sc. – Yaroslavl, 2001. – 128 p.
7. Dolgin D.S., Lavrentiev Yu.B., Gudanov I.S., Lebedev A.E., Vatagin A.A., Vetkin Yu.A. Verification of the adequacy of the mathematical model of the polymer flow process in duplex extrusion heads // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 26, pp. 73-79.
8. Hao X., Zhang G., Deng T. Improved optimization of a coextrusion die with a complex geometry using the coupling inverse design method // Polymers. 2023, vol. 15, no. 15, p. 3310.
9. Gudanov I.S. Calculation method for co-extrusion of rubber compounds and multiplex forming heads: diss. ... cand. of tech. sc. – Yaroslavl, 2009. – 184 p.
10. Dolgin D.S., Gudanov I.S., Lebedev A.E., Ekimov Ya.V. Numerical determination of the rational dimensions of the forming channel during co-extrusion of products or profiles with a reinforced contact zone of materials // Chemical and oil and gas engineering. 2023, no. 3, pp. 46-48.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Долгин Дмитрий Сергеевич – старший преподаватель кафедры технологические машины и оборудования	Dolgin Dmitry Sergeyevich – senior lecturer at the Department of technological machines and equipment
Гуданов Илья Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологические машины и оборудования	Gudanov Ilya Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department of technological machines and equipment
Лебедев Антон Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологические машины и оборудования	Lebedev Anton Evgenievich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of technological machines and equipment
Ватагин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологические машины и оборудования	Vatagin Aleksandr Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of technological machines and equipment
Мурашов Анатолий Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры математики	Murashov Anatoly Aleksandrovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of mathematics
dim_dol.94@mail.ru	

Получена 03.12.2024