

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В ДУПЛЕКСНЫХ ЭКСТРУЗИОННЫХ ГОЛОВКАХ

Долгин Д.С., Лаврентьев Ю.Б., Гуданов И.С., Лебедев А.Е., Ватагин А.А., Веткин Ю.А.
Ярославский государственный технический университет, Ярославль

Ключевые слова: вкладыши трамвайных путей, полимерные материалы, усиленная зона контакта, зубец, численная математическая модель, МКЭ.

Аннотация. В статье приведено сравнение численных результатов, полученных с помощью математической модели с опытными экспериментальными данными процесса соэкструзии многослойных полимерных изделий, с усиленной поверхностью контакта материалов. В качестве примера такого многослойного изделия приведен резиновый вкладыш для виброизоляции трамвайных путей. Выполнено численное моделирование процесса течения полимерных материалах в соэкструзионной головке, позволяющей получать изделия с усиленной поверхностью контакта. Моделирование проводилось в программно-вычислительном комплексе ANSYS с использованием МКЭ. В качестве реологического уравнения использовано степенное уравнение состояния Оствальда-де Виля. В ходе численного моделирования получены картины распределения давлений и на их основе рассчитано теоретическое значение затрачиваемой мощности. Сравнение теоретических и опытных значений перепада давлений и мощности, затрачиваемой на процесс, показало хорошую сходимость предложенной математической модели.

VERIFICATION OF THE ADEQUACY OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE POLYMER FLOW PROCESS IN DUPLEX EXTRUSION HEADS

Dolgin D.S., Lavrentiev Yu.B., Gubanov I.S., Lebedev A.E., Vatagin A.A., Vetkin Yu.A.
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl

Keywords: tramway liners, polymer materials, reinforced contact zone, tooth, numerical mathematical model, FEM.

Abstract. The article presents a comparison of numerical results obtained using a mathematical model with experimental experimental data on the process of coextrusion of multilayer polymer products with a reinforced contact surface of materials. As an example of such a multilayer product, a rubber liner for vibration isolation of tram tracks is given. Numerical simulation of the flow of polymer materials in a coextrusion head is performed, which allows to obtain products with a reinforced contact surface. 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. During the numerical simulation, pressure distribution patterns were obtained and the theoretical value of the consumed power was calculated on their basis. A comparison of the theoretical and experimental values of the pressure drop and the power spent on the process showed good convergence of the proposed mathematical model.

Введение

В отрасли строительных материалов всё чаще возникает необходимость гашения шума и вибрации, а также повышения уровня фиксации трамвайных путей с целью уменьшения вибрационной нагрузки на близлежащие здания и сооружения [1]. С этой целью предлагается использовать резиновые вкладыши. Известна конструкция вкладышей фирмы «SEDRA» [2] (см. рис. 1).

В такой конструкции к трамвайной желобчатой рельсе 1 с боков устанавливаются многослойные вкладыши, полученные методом соэкструзии. Вкладыши состоят из нескольких слоёв, каждому из которых характерны свои свойства. Нижний подкладной слой 2

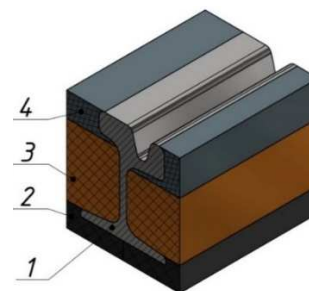


Рис. 1. Компоненты резиновых вкладышей для трамвайных путей:
1 – трамвайный желобчатый рельс;
2 – нижний слой; 3 – средний слой;
4 – верхний слой

должен быть выполнен из твердой резины, так как вся нагрузка будет приходиться именно на этот слой, который не должен смещаться, с целью сохранения геометрических размеров трамвайных рельс. Средний слой 3 выполняется из более мягкой резины и служит для гашения вибрации от трамвайных путей. Верхний слой 4 должен быть выполнен из износостойкой резины, сохраняющей свои свойства при различных температурных и погодных условиях, поскольку именно этот слой будет подвержен износу со стороны колесных пар трамвая и будет непосредственно контактировать с окружающей средой. Для такого вида изделий характерной проблемой является контакт между слоями. Таким образом, исследования способов укрепления слоев полимерных изделий является актуальной задачей.

Постановка задачи и цели исследования

Чтобы изготовить многослойное изделие наиболее часто применяют процесс соэкструзии. Часть слоев изготавливаются этим методом, а далее эти экструдаты приформовываются к металлическим профилям, получая готовый резиновый вкладыш для трамвайных путей.

Соэкструзия – это процесс, в котором два или более полимерных материала совместно продавливаются через формообразующее отверстие (фильеру) для получения заданного профиля [3].

Несмотря на достаточный уровень развитости техники и технологии процесса соэкструзии остаётся не до конца решённой проблема прочного соединения слоев. Эта проблема проявляется из-за различных реологических свойств полимеров. Для решения этой проблемы предложено формировать в зоне контакта материалов искусственные неровности – зубцы, позволяющие увеличить площадь контакта [4].

Для обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета необходимо разработать математическую модель, позволяющую рассчитывать течения полимеров в дуплексных соэкструзионных головках с усиленной поверхностью контакта материалов и проверить её адекватность.

Математическая модель процесса соэкструзии

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. 2) в численной постановке.

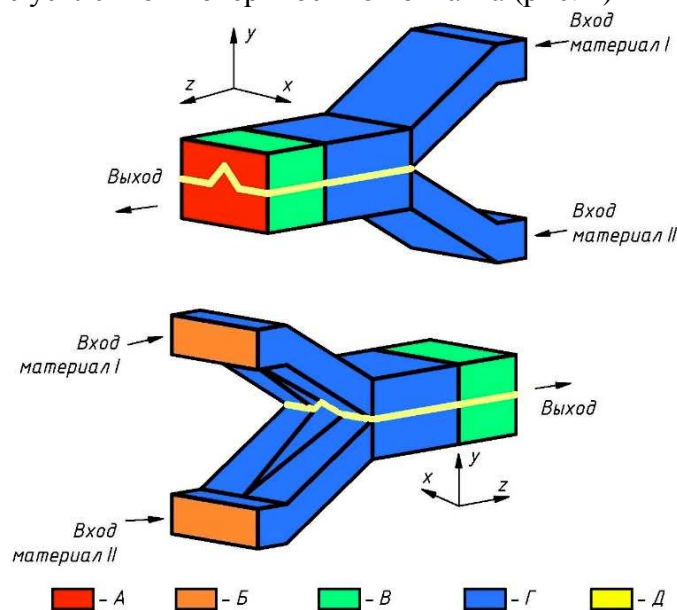


Рис. 2. Расчетная схема

Граничные условия задаются следующие, в поверхности «Б» нормально входят потоки экструдруемой резины I (верхний слой) и резины II (нижний слой), выход готового двухслойного прямоугольного изделия с усиленной поверхностью контакта осуществляется

из поверхности «А». Поверхность «Г» – это стенки каналов соэкструзионной головки, выход из которой находится в месте контакта поверхностей «В» и «Г». Зона «В» – это свободная поверхность, где в последствии и будет наблюдаться явление постэкструзионного разбухания. Поверхность «Д» является границей контакта материалов I и II.

Для анализа совместного слоистого течения полимерных веществ в каналах головки и зоне со свободной поверхностью для прямоугольных изделий с усиленной поверхностью контакта материалов необходимо решить систему уравнений, состоящую из классических уравнений сохранения неразрывности, движения и энергии, а так же реологического уравнения состояния для каждой жидкости с учетом допущений и граничных условий [5-7].

В качестве реологического уравнения выбрано уравнение состояния Оствальда-де Вилля:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

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

При математическом моделировании приняты следующие допущения, являющиеся общепринятыми для подобного рода задач:

- течение установившееся;
- процесс протекает при постоянной температуре (т.е. процесс термически стационарен, изменение температуры материала в процессе его движения уже не происходит);
- материалы несжимаемы ($\rho = \text{const}$);
- 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 (применяемые материалы обладают высокой адгезией, а давление, при котором протекает процесс, составляет порядка 5-40 МПа [8], вследствие чего материал прилипает к стенке);
- равенство температур резиновых смесей на поверхности раздела слоев (это объясняется малой продолжительностью контакта материалов в области совместного течения и, как правило, близкими значениями температуры экструдированных полимеров);
- отсутствие теплообмена между экструдатом и окружающей средой.

Реализуем численную модель с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS. Для проверки её адекватности проведен эксперимент соэкструзии с использованием лабораторной установки, описанной в работе [8].

Полимерные материалы, используемые для опыта

Для эксперимента были использованы полимерные материалы производства АО «Ярославль-Резинотехника»: материал I – смесь цис-бутадиенового синтетического каучука СКД и синтетического бутадиен-метилстирольного каучука СКМС 30 АРКМ-15, материал II – смесь цис-изопренового синтетического каучука СКИ и синтетического бутадиен-метилстирольного каучука СКМС 30 АРКМ-15. Эти резиновые смеси – материалы общего назначения, достаточно технологичные (хорошо перерабатываются) и недорогостоящие. Они могут быть широко использованы в шинной, резинотехнической, обувной и других отраслях промышленности.

К основным реологическим параметрам резиновых смесей относятся: плотность ρ , степень консистентности K и индекс течения n . Эти параметры приведены в таблице 1.

Табл. 1. Реологических константы полимеров

Параметр	Значение	
	I) СКД + +СКМС-30 АРКМ-15	II) СКИ + +СКМС-30 АРКМ-15
Материал		
Индекс течения n	0,311	0,374
Степень консистентности K , МПа·с ⁿ	35069	43558
Плотность ρ , кг/м ³	1110	1130

Средства контроля и измерения основных параметров процесса созкструзии при опытном исследовании

Исследование гидродинамики процесса на экспериментальной установке осуществлялось измерением давления в профилирующем инструменте (рис. 3). Этот параметр измерялся для каждого из полимеров в отдельности при помощи датчика давления 2, установленного в цилиндрах зоны нагнетания 1 и показывающего создаваемое усилие в наружных слоях резиновых смесей.

Датчик состоит из плунжерной пары, скобы и индикатора часового типа. Показания индикатора фиксировались при помощи видеоборудования, после чего, при помощи тарировочных графиков, переводились в МПа. До начала экспериментального исследования значения индикаторов выставлялись на ноль.

С целью измерения мощности, потребляемой приводом экспериментальной установки на осуществление процесса созкструзии резиновых смесей, и оценки энергосиловых затрат использовался счетчик электрической энергии «Меркурий 230», позволяющий выводить мгновенные значения мощности как в отдельных электрических фазах, так и суммарное значение по ним.

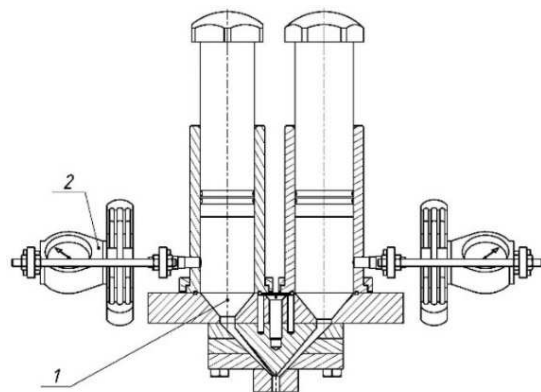


Рис. 3. Место установки датчика давления:
1 – профилирующий инструмент;
2 – датчик давления

Сравнение результатов гидродинамических картин течения

Проверка адекватности предложенной математической модели, описывающей течения полимерных материалов в созкструзионной головке с получением заготовок с усиленной поверхностью контакта, выполняется сравнением теоретических результатов численного расчета и экспериментальных данных, полученных в ходе лабораторного опыта.

В ходе численного решения использовалась следующая расчетная область течения полимерных материалах в каналах созкструзионной головки (рис. 4).

Гидродинамическую картину течения резиновых смесей в каналах созкструзионной головки с усиленной поверхностью контакта возможно оценить по распределению в них давления. Получившаяся картина распределения давления из численного расчета приведена ниже (рис. 5).

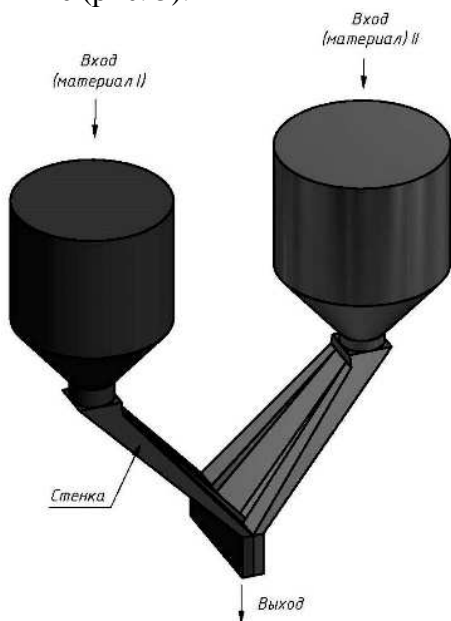


Рис. 4. Расчетная область течения полимерных материалов

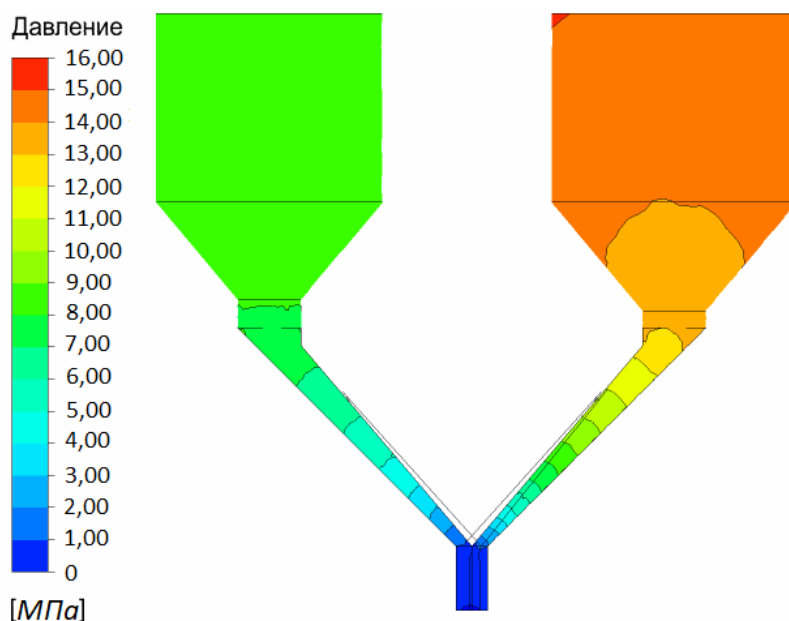


Рис. 5. Распределение давления в созкструзионной головке

Экспериментальные и теоретические данные по давлению сведены в таблицу 2.

Расхождение теоретических и численных значений давления в каналах соэкструзионной головки с усиленной поверхностью контакта материалов составляет не более 8,73%, что считается допустимым для технических расчетов.

Табл. 2. Экспериментальные и теоретические значения давлений в каналах головки

Канал с резиной	Давление P , МПа		Расхождение, %
	Эксперимент	Теория	
I	7,90	8,59	8,73
II	12,98	14,11	8,71

Сравнение результатов определения энергосиловых параметров установки

С целью сравнения теоретических и экспериментальных значений энергосиловых параметров установки выполним расчет мощности, потребляемой приводом лабораторной установки при соэкструзии резиновых смесей I и II через головку. При расчете мощности принимаем допущение [9], что потери на трение в парах плунжер-цилиндр пренебрежимо мало по сравнению с другими потерями, поскольку имеется постоянно-смазывающий слой. В связи с этим мощность N расходуется лишь на преодоление крутящего момента на ходовых винтах прессы и будет определяться по формуле [10]:

$$N = \frac{M_{кр} \cdot \omega}{\eta_{ч.р.}}, \quad (2)$$

где $M_{кр}$ – суммарный крутящий момент на ходовых винтах прессы; ω – угловые скорости ходовых винтов; $\eta_{ч.р.}$ – КПД червячных редукторов.

Крутящий момент $M_{кр}$ определяется по выражению [10]:

$$M_{кр} = \frac{Q_{\Sigma} \cdot d_{cp} \cdot tg(\beta + \theta) + Q_{\Sigma} \cdot d_{np} \cdot \mu_{кач}}{2}, \quad (3)$$

где Q_{Σ} – суммарное усилие, передаваемое от плунжеров к верхней траверсе прессы; d_{cp} – средний диаметр винтовой нарезки; β – угол подъема винтовой нарезки; θ – угол трения между винтом и гайкой ходовой части прессы; d_{np} – приведенный диаметр окружности трения в упорном подшипнике; $\mu_{кач}$ – приведенный коэффициент трения качения.

Суммарное усилие от двух плунжеров Q_{Σ} определяется следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = Q_I + Q_{II} = p_I \cdot S_I + p_{II} \cdot S_{II} = \frac{\pi \cdot (p_I \cdot d_I^2 + p_{II} \cdot d_{II}^2)}{4}, \quad (4)$$

где Q_I и Q_{II} – усилие, передаваемое от плунжера к верхней траверсе прессы на резину I и II соответственно; p_I и p_{II} – перепад давления в каналах I и II соответственно; S_I и S_{II} – площадь рабочей поверхности плунжера в каналах I и II соответственно; d_I и d_{II} – диаметры плунжера в каналах I и II соответственно.

Средний диаметр винтовой нарезки определяется по формуле

$$d_{cp} = 0,5 \cdot (d_{H.B.} + d_{B.B.}), \quad (5)$$

где $d_{H.B.}$ и $d_{B.B.}$ – наружный и внутренний диаметры нарезки ходового винта соответственно.

Угол подъема винтовой нарезки вычисляется по формуле:

$$\beta = \arctg \left(\frac{t_p}{\pi \cdot d_{cp}} \right), \quad (6)$$

где t_p – шаг нарезки винтовой линии.

Угол трения между винтом и гайкой ходовой части прессы вычисляется по формуле:

$$\theta = \arctg(\mu_{ск}), \quad (7)$$

где $\mu_{ск}$ – коэффициент трения скольжения между винтом и гайкой.

При расчете полной теоретической мощности принимаются следующие данные: $d_I = 0,072$ м, $d_{II} = 0,078$ м, $d_{H.B.} = 0,08$ м, $d_{B.B.} = 0,07$ м, $t_p = 0,01$ м, $\mu_{cx} = 0,1$ [10], $d_{np} = 0,1$ м [12], $\mu_{кач} = 0,003$ [11], $\omega = 6,2$ с⁻¹, $\eta_{ч.р.} = 0,65$ [11].

Определим суммарное усилие плунжеров:

$$Q_{\Sigma} = \frac{\pi \cdot (8,59 \cdot 10^6 \cdot 0,072^2 + 14,11 \cdot 10^6 \cdot 0,078^2)}{4} = 102397 \text{ Н.}$$

Рассчитаем средний диаметр винтовой нарезки:

$$d_{cp} = 0,5 \cdot (0,08 + 0,07) = 0,075 \text{ м.}$$

Вычислим угол подъема винтовой нарезки:

$$\beta = \arctg\left(\frac{0,01}{\pi \cdot 0,075}\right) = 2,43^\circ.$$

Вычислим угол трения между винтом и гайкой ходовой части прессы:

$$\theta = \arctg(0,1) = 5,71^\circ.$$

Тогда $M_{кр} = \frac{102397 \cdot 0,075 \cdot \text{tg}(2,43 + 5,71) + 102397 \cdot 0,1 \cdot 0,003}{2} = 565 \text{ Н} \cdot \text{м.}$

Полная мощность, потребляемая приводом установки:

$$N = \frac{565 \cdot 6,2}{0,65} = 5389 \text{ Вт.}$$

Сравнение теоретических ($N_{теор.} = 5389$ Вт = 5,39 кВт) и экспериментальных ($N_{эксп.} = 6,11$ кВт) значений энергосиловых затрат экспериментальной установки в процессе стационарного течения материалов показывает, что расхождение результатов не превышает 13,36%, что считается допустимым для технических расчетов.

Основные результаты и выводы

Изучены закономерности распределения гидродинамических и энергосиловых параметров течения. Получены теоретические и опытные значения давлений на входе в каналы с разной резиной и мощности, затрачиваемой на процесс соэкструзии. Отклонение по давлению составило не более 8,73%, а по мощность – 13,36%, что свидетельствует об адекватности математической модели.

Таким образом, сравнение представленной численной математической модели и проведенных опытов показывают хорошую сходимость результатов и подтверждают возможность использования численного метода расчета к решению подобных задач.

Список литературы

1. Романовская Н.В. Разработка технических условий на резиновые вкладыши для рельсов трамвайных путей // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2013. – Т. 3, №1. – С. 251-256.
2. Борисов Е.К., Алимов С.Г., Усов А.Г., Лысак Л.Г., Крылова Т.В., Степанова Е.А. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации: Монография. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 128 с.
3. Володин В.П. Технологическая оснастка в производстве профильных изделий. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2021. – 520 с.
4. 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.
5. Леонов А.И. Об описании реологического поведения упруго-вязких сред при больших упругих деформациях: Препринт N34. – М.: ИПМ АН СССР. – 1973. – 63 с.
6. Астарита Дж., Маруччи Дж. Основы гидромеханики не-newтоновских жидкостей. – М.: Мир, 1978. – 309 с.
7. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров – М.: Химия, КолосС, 2005. – 568 с.
8. Dolgin D.S., Goudanov I.S., Lebedev A.E., Kapranova A.B. Laboratory Design of Studying the Coextrusion Process of Profile Blanks from Rubber Compounds // Chemical and Petroleum Engineering. 2022, vol. 58, no. 1-2, pp. 159-164.

9. Юрыгин П.П. Исследование стратифицированного течения резиновых смесей в дуплексных головках для выпуска заготовок кольцевого профиля: дисс. ... кан. техн. наук: 05.17.18. – Ярославль, 2014. – 164 с.
10. Добровольский В. А., Заблонский К.И., Мак С.Л. Детали машин. – Киев: Машгиз, 1956. – 619 с.
11. Юдин В.А., Петрокас Л.В. Теория механизмов и машин: учебное пособие для ВУЗов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1977. – 527 с.
12. Подшипники качения: справочник-каталог / Под ред. В.Н. Нарышкина, Р.В. Коросташевского. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

References

1. Romanovskaya N.V. Development of technical specifications for rubber liners for tram rails // Modern problems of the Russian transport complex. 2013, vol. 3, no. 1, pp. 251-256.
2. Borisov E.K., Alimov S.G., Usov A.G., Lysak L.G., Krylova T.V., Stepanova E.A. Experimental dynamics of structures. Monitoring of transport vibration: monograph. – Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatSTU, 2007. – 128 p.
3. Volodin V.P. Technological equipment in the production of profile products. – SPb.: PSC "Profession", 2021. – 520 p.
4. 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.
5. Leonov A.I. On the description of rheological behavior of elastic-viscous media under large elastic deformations: Preprint N34. – М.: IPM of the USSR Academy of Sciences. – 1973. – 63 p.
6. Astarita J., Marucci J. Fundamentals of hydromechanics of non-Newtonian fluids. М.: World, 1978. – 309 p.
7. Kim V.S. Theory and practice of polymer extrusion – М.: Chemistry, KolosS, 2005. – 568 p.
8. Dolgin D.S., Goudanov I.S., Lebedev A.E., Kapranova A.B. Laboratory Design of Studying the Coextrusion Process of Profile Blanks from Rubber Compounds // Chemical and Petroleum Engineering. 2022, vol. 58, no. 1-2, pp. 159-164.
9. Yurygin P.P. Investigation of stratified flow rubber mixtures in duplex heads for the production of ring profile blanks: diss. ... cand. of tech. sc.: 05.17.18. – Yaroslavl, 2014. – 164 p.
10. Dobrovolsky V.A., Zablonsky K.I., Mack S.L. Machine parts. – Kiev: Mashgiz, 1956. – 619 p.
11. Yudin V.A., Petrokas L.V. Theory of mechanisms and machines: textbook for universities. – 2nd ed., reprint and additional. – М.: Higher School, 1977. – 527 p.
12. Rolling bearings: reference catalog / Edited by V.N. Naryshkin, R.V. Korostashevsky. – М.: Mechanical Engineering, 1984. – 280 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Долгин Дмитрий Сергеевич – старший преподаватель кафедры технологических машин и оборудования	Dmitry Sergeevich Dolgin – senior lecturer of the Department of technological machines and equipment
Лаврентьев Юрий Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики	Lavrentiev Yuri Borisovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of descriptive geometry and engineering graphics
Гуданов Илья Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологических машин 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 технологических машин 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 технологических машин и оборудования	Vatagin Aleksandr Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of technological machines and equipment
Веткин Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических машин и оборудования dim_dol.94@mail.ru	Vetkin Yuri Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of technological machines and equipment

Получена 10.06.2024