

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ЧЕРЕЗ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОЦЕССУ ШНЕК-ПРЕССОВОГО ОТЖИМА МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР\*

Е.В. Славнов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

О.И. Скульский, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

И.А. Петров, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

С.Д. Анферов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

И.А. Судаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Н.В. Шакиров, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Представлены экспериментально-теоретические результаты исследования процесса движения жидкости через пластически деформируемые пористые среды в приложении к процессу отжима масличных культур. Показано существенное изменение фильтрующих свойств в зависимости от объемной концентрации и давления. Выполнен анализ влияния скорости нагружения на выход масла. Дана оценка минимального остаточного содержания масла. Обсуждены вопросы математического моделирования процесса.

**Ключевые слова:** деформируемая пористая среда, отжим масличных культур, проницаемость, математическое моделирование.

Ограниченность мировых запасов органических топлив вызывает интерес к поиску других источников. Одним из заменителей может служить биотопливо, обладающее возможностью ежегодного воспроизводства за счет практически неиссякаемого поступления на поверхность Земли солнечной энергии. За последние 10 лет произошел резкий подъем производства биоэтанола и биодизеля [17]. Рост производства биодизеля в этот период был достигнут преимущественно за счет использования масличных культур [7], в том числе рапса. Кроме того, рапсовое масло характеризуется высоким со-

держанием полезных полиненасыщенных жирных кислот, что существенно отличает его от других видов растительных масел. Его применяют в пищевой, полиграфической, лакокрасочной, мыловаренной промышленности. В семенах озимого рапса содержится 35–45% масла. Наиболее современным способом получения масел является экструзионный отжим через зерную камеру, представляющую собой часть шнека (рис. 1).

Камера состоит из набора тонких стальных пластин, малые зазоры между которыми препятствуют проникновению измельченной обрабатываемой маслич-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-96006).

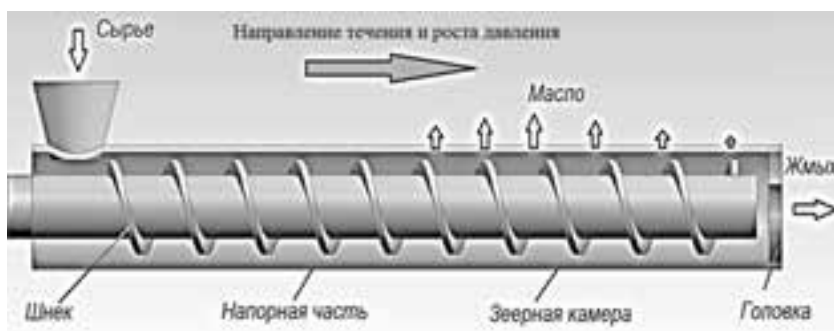


Рис. 1. Схема движения смеси и отжимаемого масла в экструдере

ной культуры, но свободно пропускают масло [5]. Вращение шнека-винта внутри корпуса экструдера обеспечивает продвижение смеси по направлению к головке, гидродинамическое сопротивление которой вызывает встречный перепад давления по длине. Фильтрация масла через пластически деформируемую пористую смесь и отжим масла за пределы канала экструдера через зерновую камеру вызывает радиальный перепад давления в масле.

Математические модели фильтрации жидкостей через недеформирующиеся пористые среды широко известны и хорошо разработаны. Менее изучены процессы фильтрации в упругодеформирующихся средах. Для фильтрации жидкостей и газов в условиях развитого пластического движения пористых сред общеприняты математические модели не так многочисленны. Выбор режимов производится исключительно исходя из опыта использования шнек-прессового отжима и на основании экспериментальных данных для конкретного оборудования. Существующие коммерческие пакеты программ не позволяют моделировать течения неньютоновских жидкостей, осложненных процессами условной сжимаемости, фильтрации и массопереноса.

Создание конкурентоспособного оборудования, нахождение удачных технических решений, определение наилучших технологических режимов связаны с моделированием процесса, включая адекватное описание изменения свойств перерабатываемого материала в процессе отжима.

**Экспериментальные наблюдения и теоретические построения.** Отжим жидкой фазы изменяет структуру смеси и массовое соотношение (концентрацию) между компонентами, в результате чего изменяются реологические и фильтрующие свойства смеси.

В качестве исходных образцов в эксперименте был использован экструдат семян рапса, полученный на лабораторном экструдере без внешнего нагрева.

Исследование сжимаемости насыщенных маслом образцов рапса проводилось в цилиндрической камере. Камера имела проницаемое для масла дно, сверху располагался поршень, движущийся с заданной скоростью. В эксперименте замерялись и регистрировались значения изменения объема образца и объем отжатого масла. Результаты исследования (рис. 2) показали, что в замкнутом объеме насыщенная смесь несжимаема, а изменение объема смеси обусловлено только отжимом масла за границы области.

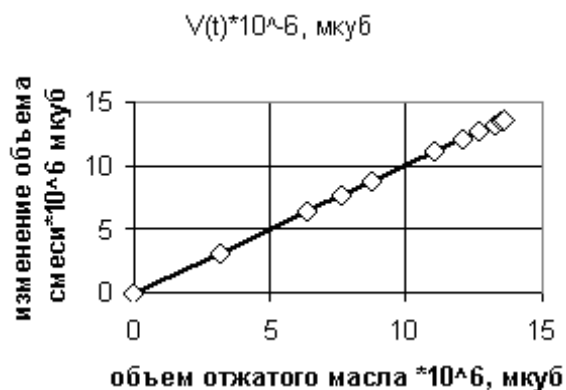


Рис. 2. Соотношение между изменением объема смеси и количеством отжатого масла

Измерение реологических свойств экструдатов рапса проводилось на установке, разработанной в Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь) [11]. В измерительном узле установки использована схема ротационной вискозиметрии. Рабочая камера имеет боковые стенки и два диска. Диски имеют рифления для уменьшения эффекта скольжения исследуемого материала по их поверхностям. Установка позволяет задавать и контролировать в рабочей камере необходимое давление, температуру, скорость нижнего диска и измерять на нем момент нагрузки. Определены зависимости изменения реологических свойств от концентрации, температуры и давления [12, 16]. На рис. 3 в качестве примера приведены полученные кривые течения (зависимость напряжения от скорости сдвига) при концентрации масла  $C=0,23$  и температуре  $25^{\circ}\text{C}$ . Экспериментальные точки с высокой степенью приближения описываются степенным законом с пределом текучести.

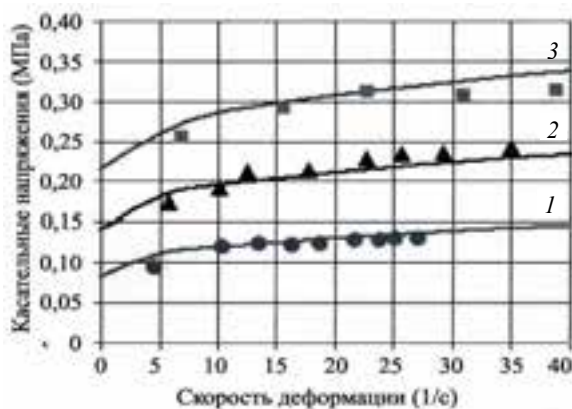


Рис. 3. Кривые течения экструдата при  $T = 25^{\circ}\text{C}$  и различных давлениях поджатия, МПа: 0 (кривая 1); 15 (2); 34 (3)

Отличительной особенностью отжима от традиционной фильтрации является замещение жидкой компоненты деформируемым скелетом. Для определения в этом случае коэффициента фильтрации и его зависимости от давления и массовой доли компонентов (концентрации) был предложен метод, в основе которого лежит динамическое нагружение [15]. Об-

разец помещался в замкнутую цилиндрическую полость между поршнем, создающим давление, и проницаемым для жидкости дном. Для обеспечения давления использовалась испытательная машина с программным управлением в циклическом режиме. В процессе эксперимента регистрировались во времени изменение давления, длины образца и временной промежуток снижения давления на цикле разгрузки, а также объем отжатой жидкости. По данным эксперимента рассчитывалась зависимость коэффициента фильтрации от концентрации и уровня давления. При проведении эксперимента и его обработке образец экструдата предлагается рассматривать как двухкомпонентную среду, представляющую смесь жидкости (масла) и деформируемую пористую основу, состоящую в основном из клетчатки. Следует отметить, что давление в образце смеси и масле отличается. Учитывая, что касательные напряжения на боковых стенках замкнутого объема соответствуют режиму жидкостного трения, а создаваемое в образце давление не ниже 6 МПа, в образце смеси создается напряженное состояние, близкое к однородному. Для жидкой фазы при наличии нижней проницающей стенки имеет место градиент давления, определяющий фильтрацию масла. При расчете эффективного коэффициента фильтрации градиент давления для масла определялся как отношение давления в образце смеси к высоте образца. Эффективный коэффициент фильтрации определен как отношение коэффициента фильтрации к вязкости масла. Знание зависимости вязкости масла от температуры позволяет определить температурную зависимость собственно коэффициента фильтрации. Подробнее метод определения изменения коэффициента фильтрации представлен в [13].

В результате эксперимента было установлено, что интенсивность процесса отжима со временем падает вне зависимости от уровня приложенного давления (рис. 4). С отжимом масла эффективный коэффициент фильтрации смеси снижает-

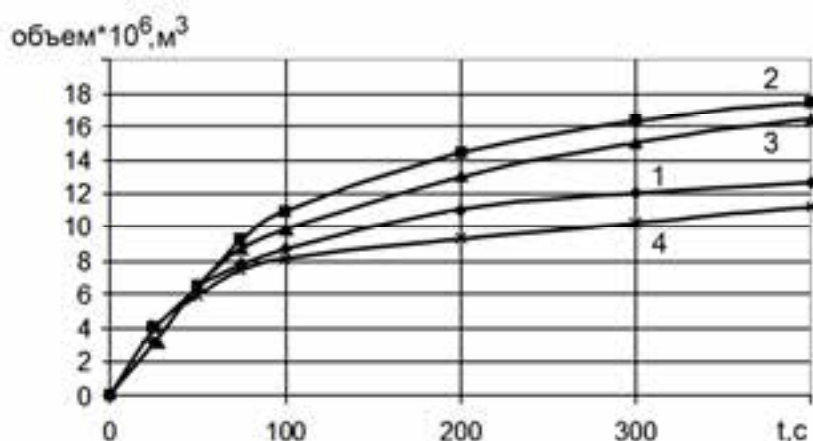


Рис. 4. Количество отжатого масла в зависимости от времени процесса при различных уровнях давления в образце смеси: 1 – 6,3 МПа; 2 – 12,6 МПа; 3 – 18,9 МПа; 4 – 37,8 МПа

ся. Массовое соотношение компонент, как косвенный показатель структуры смеси, в основном определяет эффективный коэффициент фильтрации. Однако этот показатель интенсивности процесса отжима зависит не только от соотношения компонент, но и от приложенного давления. Так повышение уровня давления от 6,3 МПа до 12,6 МПа существенно повышает коэффициент фильтрации, но дальнейшее увеличение уровня давления приводит к значительному снижению проницаемости образца. Именно этим объясняется то, что зависимость объема отжатого

масла от уровня давления имеет немонотонный характер. Описанные зависимости иллюстрируются рис. 5.

Была найдена аппроксимирующая зависимость изменения эффективного коэффициента фильтрации от массового содержания масла и уровня давления, с хорошей точностью описывающая данные эксперимента [10]. Следует отметить, что при изменении концентраций в диапазоне 0,45–0,23 эффективный коэффициент фильтрации изменяется на полтора–два десятичных порядка в зависимости от приложенного уровня давления.

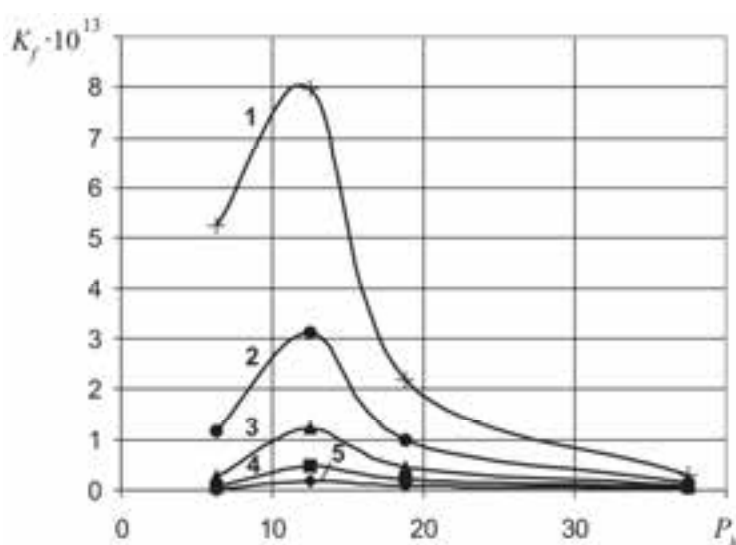


Рис. 5. Изменение коэффициента фильтрации в зависимости от уровня давления и массовой концентрации: 1 – C = 0,45; 2 – C = 0,425; 3 – C = 0,4; 4 – C = 0,375; 5 – C = 0,35.  $K_f, м^4/Н с$ ;  $P_h, МПа$

Проведен анализ влияния скорости объемной деформации на интенсивность процесса отжима масла. Показано, что на определенном диапазоне скоростей нагружения (скорость поршня) скорость отжима масла существенно увеличивается с понижением скорости нагружения, но в дальнейшем рост практически прекращается (рис. 6). Создается впечатление, что механический отжим имеет предел по остаточному содержанию масла.

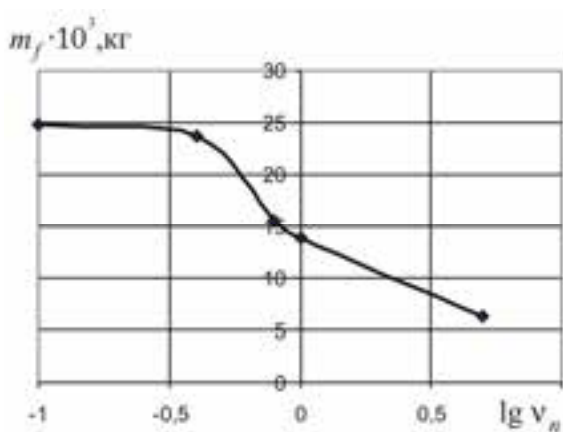


Рис. 6. Масса отжатого в эксперименте масла.  $m_f \cdot 10^3, \text{ кг}$ ;  $\lg v_n$  безразмерная;  $v_n, \text{ мм/мин}$

Выполнена оценка минимального остаточного содержания масла в образце при механическом отжиме с использованием результатов структурной механики дисперсно-наполненных систем [6, 14, 18]. Без введения в образец дополнительной влаги минимальное остаточное массовое содержание масла составляет 0,230–0,235.

Методом теории размерностей можно получить безразмерный комплекс, который представляет отношение характерного времени нагружения к характерному времени реакции (отжиму). Зависимость скорости отжима от безразмерного комплекса в логарифмических координатах, построенная с использованием данных всех экспериментов, с хорошей достоверностью описывается линейной зависимостью [14, 18].

Предложены три математических модели экструзионного отжима: в терминах интегральных характеристик; гидродинамическая модель; в рамках гидродинами-

ки двухфазных сред [1–4].

В терминах интегральных характеристик проведено моделирование с учетом экспериментальных зависимостей коэффициента проницаемости от массового содержания масла и давления, а также вязкости смеси от давления, скорости сдвига и температуры [9]. Произведено обобщение модели для учета встречной фильтрации масла [8].

Гидродинамическая модель основана на законах сохранения импульса, масс и энергии. Сформулирована краевая задача, содержащая в качестве независимых переменных давление в смеси, давление в масле, скорости движения смеси, фильтрации масла и температуру. С учетом экспериментально найденных реологических и фильтрационных зависимостей разработан алгоритм численного решения задачи на основе метода конечных элементов. Получены поля давлений смеси и масла, скорости их движения в винтовом канале экструдера, снабженного зеерной камерой.

В рамках гидродинамики двухфазных сред выполнена постановка задачи, разработан алгоритм, отлажена программа и получено решение задачи отжима при постоянной вязкости пористого скелета и его проницаемости. Определяющее соотношение проницаемости пористой среды скорректировано в соответствии с результатами эксперимента. В результате решения определены поля давлений смеси и масла, их скорости движения.

Сравнительный анализ трех рассматриваемых подходов показал, что все они имеют право на существование и дают качественно сопоставимые между собой и экспериментом результаты. Однако каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Решение в интегральных характеристиках не позволяет получить поля скоростей, давлений, температуры и концентрации. В то же время в этом случае наиболее полно используются все экспериментальные данные, описывающие свойства перерабатываемого материала. В результате решения плоских задач получаем дополнительную информацию в виде

полей указанных величин. Но при использовании классической постановки задачи фильтрации принимается часто используемая гипотеза о том, что пористость (объемная концентрация) пропорциональна давлению в смеси, в то время как в эксперименте объемная концентрация аналог содержания масла. Использование подхода динамики многофазных сред требует определения условий на границе раздела фаз. Обходить эту трудную задачу приходится коррекцией условий из сравнения результатов решения и эксперимента плунжерной экструзии.

На рис. 7 представлены результаты эксперимента ( $n = 10$  об/мин, противодействие 7,5, 10 и 15 МПа, сплошные линии) и результаты моделирования в терминах интегральных характеристик (штриховые линии), конечно-элементная реализация гидродинамической модели (точки) и с использованием подхода динамики многофазных сред (штрихпунктирные линии). Наиболее близки к эксперименту

результаты, полученные с использованием интегральных характеристик. Распределение количества отжатого масла вдоль оси экструзии в зависимости от давления экструзии имеет различный характер (нарастающий или с максимумом). Снижение оборотов шнека приводит к возрастанию отжатого масла на единицу переработанного продукта.

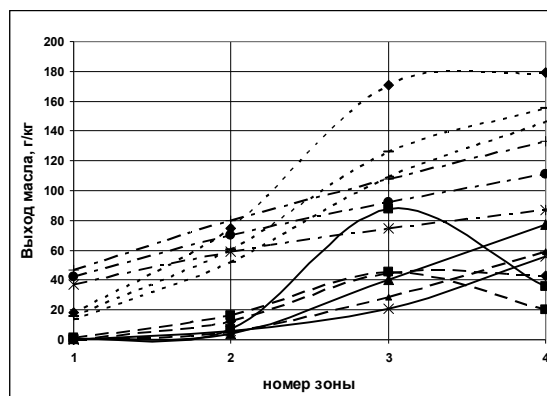


Рис. 7. Удельный выход масла по зонам (эксперимент и расчет)

#### Библиографический список

1. Анферов С.Д., Скульский О.И. Моделирование фильтрации жидкости через пластически деформируемую пористую среду в процессе экструзионного отжима // Вест. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2014. – № 2. – С. 29–47.
2. Анферов С.Д., Скульский О.И., Славнов Е.В. Математическая модель деформирования насыщенной пористой среды при механическом отжиме // XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. докл. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. – С. 191–193.
3. Анферов С.Д., Скульский О.И., Славнов Е.В. Математическое моделирование процесса прямого отжима масличной культуры // Вест. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2014. – № 1. – С. 31–56.
4. Анферов С.Д., Скульский О.И., Славнов Е.В. Модель экструзионного отжима масла из семян рапса // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 144–152.
5. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 240 с.
6. Берлин А.А., Ротенбург Л., Басэрст Р. Особенности деформации неупорядоченных полимерных и неполимерных тел // Высокомолекулярные соединения. – 1992. – Т. 34. – № 7. – С. 6–32.
7. Вольхин В.В., Шкляев Ю.В., Зернина И.А., Казаков Д.А. Биодизель второго поколения: некоторые особенности физико-химических процессов при его производстве // Вест. Перм. науч. центра. – 2010. – № 3. – С. 41–49.
8. Петров И.А. Моделирование процесса шнек-прессового отжима с учетом осевой фильтрации жидкой компоненты перерабатываемого материала // Перспективы науки. – 2015. – № 8(71). – С. 108–113.
9. Петров И.А., Славнов Е.В. Моделирование шнек-прессового отжима как совокупности процессов течения вязкой несжимаемой смеси и фильтрации жидкости сквозь пористую среду // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6. – № 3. – С. 277–285.
10. Славнов Е.В. Изменение проницаемости масличных культур в процессе отжима масла на примере экструдата рапса // Докл. Рос. акад. сельскохозяйственных наук. – 2014. – № 3. – С. 58–60.
11. Славнов Е.В. Способ определения зависимости пищевой ценности биопродукта от параметров физико-механического воздействия на него и устройство для этого // Патент РФ № 2385665. Оpubл. 10.01.2011. – Бюл. № 1.

12. Славнов Е.В., Петров И.А. Изменение вязкости экструдата рапса в процессе отжима масла // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 6. – С. 42–44.
13. Славнов Е.В., Петров И.А. Метод определения изменения фильтрационных свойств масличных культур в процессе отжима масла на примере экструдата рапса // ИФЖ. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С. 860–864.
14. Славнов Е.В., Петров И.А. Влияние скорости объемной деформации на интенсивность отжима масличных культур на примере экструдата рапса // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 4. – С. 827–832.
15. Славнов Е.В., Петров И.А. Способ определения зависимости коэффициента проницаемости пластически деформируемого пористого материала как функции от массового содержания и давления жидкости // Патент РФ №2524046. Оpubл. 27.07.2014. – Бюл. № 21.
16. Славнов Е.В., Петров И.А., Анферов С.Д. Изменение вязкости экструдата рапса в процессе отжима масла (влияние давления) // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 10. – С. 16–19.
17. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Мишууров Н.П., Тухомиров В.С. Развитие биоэнергетики, экологическая и продовольственная безопасность. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 114 с.
18. Slavnov E.V., Petrov I.A. Influence of Volume Deformation Rate on the Intensity of Oil-Bearing Crop Pressing-out in Relation to Rape Extrudate // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88. – № 4. – P. 854–858. DOI 10.1007/s10891-015-1260-0.

**STUDY OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ASPECTS OF FLUID MOTION THROUGH PLASTICALLY DEFORMABLE POROUS MEDIA AS AN APPLICATION TO OILSEED EXTRACTION PROCESS BY THE SCREW PRESS**

E.V. Slavnov<sup>1</sup>, O.I. Skul'skiy<sup>1</sup>, I.A. Petrov<sup>2</sup>, S.D. Anferov<sup>2</sup>, A.I. Sudakov<sup>1</sup>, N.V. Shakirov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University

The paper presents the results of an experimental and theoretical investigation of fluid motion through plastically deformable porous media during oilseed extraction process by the screw press. It is shown that filtering properties change significantly due to bulk concentration and pressure. The influence of loading rate on the process of oil extraction is analyzed. The minimum residual oil content is evaluated. Some aspects concerning mathematical modeling of the examined process are discussed.

*Keywords:* deformable porous medium, oilseed extraction, permeability, mathematical modeling.

**Сведения об авторах**

*Славнов Евгений Владимирович*, доктор технических наук, заведующий лабораторией механики термопластов, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: slavnov@icmm.ru

*Скульский Олег Иванович*, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории механики термопластов, ИМСС УрО РАН; e-mail: skul@icmm.ru

*Петров Илья Андреевич*, доцент кафедры прикладной математики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: uralmaster85@gmail.com

*Анферов Сергей Дмитриевич*, старший преподаватель кафедры прикладной математики, ПНИПУ; e-mail: anferovsergey@gmail.com

*Судаков Андрей Иванович*, ведущий инженер лаборатории механики термопластов, ИМСС УрО РАН; e-mail: sudakov@icmm.ru

*Шакиров Нагим Вагизович*, ведущий инженер лаборатории механики термопластов, ИМСС УрО РАН; e-mail: shakirov@icmm.ru

*Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.*