

Научная статья

УДК 541.182; 532.7; 664.3

DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-20-27

Течение маслосодержащего материала в канале шнека маслопресса

А.С. Старков¹, Г.Е. Мельник^{2*}, К.А. Старков², Д.А. Лисицын²¹Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург²Всероссийский научно-исследовательский институт жиров, Россия, Санкт-Петербург, *genmelnik@yandex.ru

Аннотация. Исследовали канал локального шнека маслопресса с целью изучения распределения в нем скоростей течения маслосодержащего материала и влияния параметров канала на производительность маслопресса. Использовали метод математического моделирования процесса течения маслосодержащего материала в канале шнека. Из предложенных упрощающих предположений при течении маслосодержащего материала в канале шнека рассматриваются и развиваются три: градиент давления постоянен и направлен по оси канала, скорость движения любой точки шнека одинакова, шнек касается внутренней поверхности зеера. Сечение канала предполагается прямоугольным. Предложенная гидродинамическая модель, в отличие от ранее опубликованных работ, учитывает наличие зазора δ между кромкой спирали шнека и внутренней поверхностью зеера, а также неравномерность скорости движения точек на шнеке. Принципиально новым моментом в постановке задачи является то, что на боковых стенках канала скорость не предполагается постоянной. Представлена координатная зависимость скорости v_z на прямоугольных границах шнека. Поток вязкопластичного материала представлен в виде четырех составляющих, которые определяются градиентом давлений, течением материала вдоль оси канала шнека, движением боковых стенок канала и вязкопластичного материала через зазор между спиралью шнека и зеером. Получены простые аналитические выражения для скорости потока вязкопластичного материала, содержащие только простые элементарные функции. Найденные решения гидродинамики используют ньютоновскую модель течения материала, но могут быть легко обобщены на неньютоновскую Бингамовскую вязкопластичную реологию. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров шнеков маслопресса, повышения его производительности и выхода масла.

Ключевые слова: гидродинамическая модель; вязкопластичный материал; канал шнека; скорость течения; производительность маслопресса; неньютоновская реология

Original article

The flow of oil-containing material in the channel of the oil press screw

Alexander S. Starkov¹, Gennady E. Melnik^{2*}, Konstantin A. Starkov², Dmitry A. Lisitsyn²¹ITMO University, St. Petersburg, Russia²All-Russian Research Institute of Fats, St. Petersburg, Russia, *genmelnik@yandex.ru

Abstract. The paper presents an analysis of the basic operational concepts for the screw channel of the oil press. The channel is chosen by the authors as the object of research. The subject of the study is the the flow velocities distribution for the oil-containing material in the channel of the local auger of the second section of the oil press and the influence of the channel parameters on the performance of the press. The mathematical modeling of the flow of oil-containing material in the channel of the oil press screw is used as a research method. Of the proposed simplifying assumptions for the flow in the auger channel, three assumptions are considered and further developed. The cross section of the channel is assumed to be rectangular. The developed hydrodynamic model, in contrast to previously published works, takes into account the presence of a gap δ between the edge of the screw spiral and the inner surface of the pressing cage, as well as the non-uniformity of the movement velocity for points on the screw. A fundamentally new point in the formulation of the problem is that the velocity is not assumed to be constant on the side walls of the channel. The coordinate dependence of the velocity v_z on the rectangular boundaries of the screw is presented. The flow of viscoplastic material is obtained in the form of four components, which are determined by the pressure gradient, the flow of material along the axis of the screw channel, the movement of the side walls of the channel and the viscoplastic material through the gap between the screw spiral and the pressing cage. Simple analytical expressions containing only simple elementary functions are derived for the flow velocity of a viscoplastic material. The found solutions of hydrodynamics use the Newtonian model of fluid flow but can be easily generalized to non-Newtonian Bingham viscoplastic rheology. The results demonstrated can be employed to optimize the parameters of the oil press augers, increase its productivity and oil yield.

Keywords: hydrodynamic model; viscoplastic material; screw channel; flow rate; oil press performance; non-Newtonian rheology

Введение

В настоящее время для производства растительного масла применяются маслопрессы. Традиционный маслопресс содержит шнековый вал, составленный из витков (шнеков) и втулок, вращающийся в зерном цилиндре. Основной принцип действия шнекового пресса – перемещение материала и его сжатие при движении в прессе за счет последовательного уменьшения свободного объема шнеков. Под воздействием возрастающего давления частицы материала сближаются, воздух вытесняется, уменьшая промежутки между ними, которые заполняет масло и далее отфильтровывается по системе пор между частицами в зазоры между пластинами зеера [1].

При изучении процесса перемещения маслянистого материала в прессе и отжима из него масла исследователями отмечается наличие таких явлений, как «проворачивание» материала, возврат (обратный ход) его через межвитковые зазоры и в зазоры между кромкой спирали шнеков и внутренней поверхностью зеера [1, 2], что в конечном счете снижает производительность маслопресса и эффективность отжима масла. Для моделирования этого процесса специалисты в последнее время в качестве объекта исследования стали рассматривать канал шнеков [3, 4], образованный наружной поверхностью шнеков, втулок вместе с внутренней поверхностью зеера [1]. Такой подход позволяет смоделировать процесс прессования материала и отжима масла в маслопрессе и корректно описать его.

Задача точного описания процесса движения материала в канале шнека маслопресса является очень сложной. Изучению процесса течения маслянистого материала в канале шнека маслопресса предшествовали работы по экструзии полимеров [5–9], способствовавшие тому, что канал шнека и модели, описывающие течение полимера в нем, стали классикой. Однако конструкции шнека одношнекового экструдера для полимера и шнекового вала маслопресса существенно отличаются. Так, сравнение шнеков обоих устройств показывает, что в зоне плавления полимера и в зоне дозирования (выдавливания) расплава полимера шнек экструдера [8] имеет неразрывную сплошную спираль, а шнековый вал маслопресса состоит из ряда локальных шнеков, разделяемых друг от друга втулками – то есть спираль является прерывистой (дискретной) [10].

Винтовой канал для одношнекового экструдера достаточно полно описывается плоской двухмерной моделью, построенной в декартовой системе координат [11] (рисунок 1).

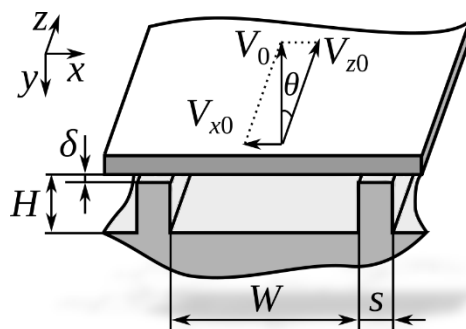


Рисунок 1 – Схема плоской двухмерной модели для одношнекового экструдера: W – ширина канала, H – высота канала, s – ширина гребня нарезки червяка, δ – зазор между гребнем и внутренней поверхностью цилиндра, V_o – окружная скорость шнека, θ – угол нарезки винтовой линии

Figure 1. The schematic representation of a flat two-dimensional model for a single screw extruder: W – the channel width, H – the channel height, s – the width of the worm cutting comb, δ – the gap between the comb and inner cylinder surface, V_o – the screw circumferential speed, θ – the helix cutting angle

Плоская двухмерная модель может быть получена при выполнении условия: винт, а цилиндр вращается, при этом винт развернут на плоскость; такое допущение позволяет заменить течение полимера в экструдере на течение в прямом канале прямоугольного поперечного сечения с подвижной верхней стенкой (цилиндром).

Изложенная сущность винтового канала одношнекового экструдера применима и к каналу шнеков маслопресса, но при выполнении важного условия – ширина канала W должна учитывать и втулку, расположенную непосредственно за шнеком. Рассмотренное конструктивное отличие шнека экструдера и шнекового вала маслопресса должно учитываться как в понятии канала шнеков маслопресса, так и при

построении его моделей. Одним из первых на эту особенность шнекового вала маслопресса обратил внимание В.В. Белобородов в своей ранней работе [2], представив ее как «...расстояние между фронтальной поверхностью спирали предыдущего шнекового витка и тыльной поверхностью спирали последующего шнекового витка». Несмотря на отсутствие в то время в научном обороте понятия «канал шнекового витка», тем не менее, приведенное определение соответствует понятию канала шнека для маслопресса. Строго говоря, если в теоретическом исследовании канала шнеков маслопресса применение различных трактовок его вполне допустимо, то в инженерных расчетах [12] следует применять точные параметры канала шнеков (и отдельного шнека) маслопресса.

Применение понятия канала шнеков маслопресса при моделировании процессов прессования и отжима масла вызывает необходимость в разделении шнеков маслопресса на группы в зависимости от состояния маслосодержащего материала в канале шнеков и их функционального назначения. Так, если в канале шнеков, расположенных в начальной зоне шнекового вала, частицы материала не консолидированы, то в канале последующих шнеков (второй зоне) материал консолидирован. Вторую зону шнеков маслопресса исследователи называют по-разному: длиной (участком) зерновой камеры [3], зерновые витки [12]. Для описания процесса движения (течения) материала в канале шнеков каждой из этих зон используются различные зависимости.

При изучении процесса течения маслосодержащего материала в канале шнеков маслопресса у исследователей сложился следующий подход к характеристике материала с точки зрения реологии. Авторы работы [1], рассматривая свойства материала в консолидированном (твердообразном) состоянии в рамках механики сплошных сред, от первоначальной схемы течения материала в прямоугольном канале шнеков как ньютоновской жидкости с постоянной плотностью, без стока масла, с прилипанием на границах, переходят далее к более сложной – неньютоновской жидкости, со стоком масла, скольжением и переменной плотностью. В поздних работах [12] процесс получения прессового масла в маслоотжимных агрегатах также рассматривается с учетом гидродинамики течения высоковязкого материала неньютоновской реологии.

Таким образом, несмотря на сложность процессов, происходящих в канале шнеков маслопресса, именно канал, как объект исследования, следует отнести к одной из современных возможностей для установления новых закономерностей прессования материала и отжима растительного масла.

Целью данного исследования является изучение распределения скоростей течения маслосодержащего материала в канале локального шнека второго участка маслопресса и влияние параметров канала на производительность маслопресса.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является канал шнека маслопресса. В качестве метода исследования авторами выбрано математическое моделирование процесса течения маслосодержащего материала в канале шнека второго участка маслопресса.

Результаты и их обсуждение

1. Течение материала в канале шнека маслопресса

1.1. Основные упрощающие предположения при течении материала в канале шнека

Несмотря на многочисленные работы, посвященные движению маслосодержащего материала в канале шнеков, задача точного описания движения его является чрезвычайно сложной. Получить аналитические выражения для скорости потока удастся только при выполнении ряда упрощающих предположений. Ниже перечислены основные из них.

1. К материалу в канале шнека маслопресса применимы законы сплошных сред, описываемые уравнениями неразрывности и движения.
2. Движение маслосодержащего материала в канале шнека не зависит от движения твердых частиц в его составе.
3. Материал в канале отдельно взятого шнека маслопресса является несжимаемым.
4. Сечением канала шнека является прямоугольник.
5. Скорость течения имеет только одну компоненту.

6. Градиент давления постоянен и направлен по оси канала.
7. Скорость движения любой точки шнека одинакова.
8. Шнек касается внутренней поверхности зеера.

В настоящей публикации рассматриваются и развиваются только предположения 6–8. Зависимость сжимаемости и вязкости материала, перемещаемого в канале, наличие нескольких компонент у градиента давления и скорости течения, трапецеидальную форму сечения канала в осесимметричной задаче движения материала предполагается рассмотреть в последующих работах.

1.1.2. Постановка задачи

Линеаризованное уравнение Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости (перемещаемого материала) в стационарном случае при малых числах Рейнольдса имеет вид

$$\eta \Delta v - \text{grad} p = 0, \tag{1}$$

где v – вектор скоростей, м/с;

p – давление, МПа;

η – (динамическая) вязкость, Па·с;

Δ – векторный оператор Лапласа.

К уравнению (1) нужно еще добавить условие несжимаемости, которое записывается в виде $v = 0$. Уравнение (1) будем рассматривать в декартовой системе координат (x, y, z) в канале $0 < z < L$, сечением которого является прямоугольник $0 < y < a, 0 < x < b$. Здесь a – высота канала, b – ширина канала, (в этом параметре учитывается не только шнек, но и втулка, расположенная непосредственно за этим шнеком) $a < b$, а L есть длина образующей винтовой линии. Данная модель неоднократно рассматривалась в литературе и позволяет рассчитывать распределение скоростей жидкости в канале шнека с точностью 8–10% [12, 13]. По сравнению с ранее опубликованными работами будем рассматривать более общий закон распределения давления и скоростей. Градиент давления будем считать направленным по оси z и постоянным, а отношение $\frac{|\text{grad} p|}{\eta} \equiv p_\eta$ будем считать линейной функцией координаты: $p_\eta = c_1 + c_2 z$, где $c_{1,2}$ известные постоянные. Данное предположение существенно облегчает нахождение распределения скорости, так как в этом случае имеется только одна компонента скорости (v_z), которая удовлетворяет скалярному уравнению Пуассона (1).

Принципиально новым моментом в постановке задачи является то, что на боковых стенках канала скорость не предполагается постоянной. График координатной зависимости скорости на прямоугольных границах шнека v_z изображен на рисунке 2.

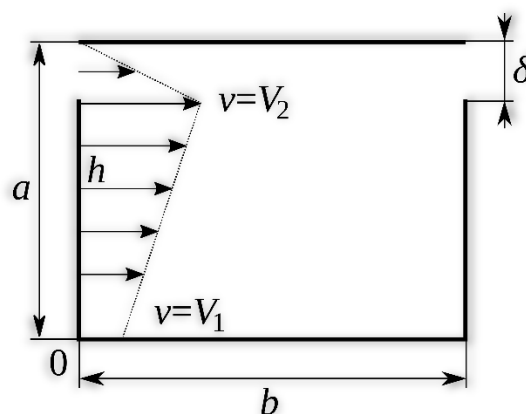


Рисунок 2 – Координатная зависимость скорости v_z на прямоугольных границах шнека
 Figure 2. The coordinate dependence of the velocity v_z at the rectangular boundaries of the screw

На участке от 0 до h скорость линейно возрастает от значения V_1 до значения V_2 . Величина h задается размером витка шнека. Скорость V_2 определяется угловой скоростью вращения вала и геометрическими параметрами шнека [1]. Скорость V_1 связана со скоростью V_2 и расстояниями R_1 и R_2 соответствующих точек до оси шнека соотношением $V_1 = V_2 \frac{R_1}{R_2}$. Это свойство является простым следствием зависимости

радиальной скорости от расстояния до оси вращения. На участке от h до a скорость на боковых стенках канала линейно убывает от значения V_2 до 0. Этот участок моделирует щель между шнеком и зером, размер которой обозначим через δ . Точное распределение скорости на ней неизвестно, поэтому выбрали линейную интерполяцию между известными значениями скорости на шнеке V_2 и на внутренней поверхности зеера. Наличие данного участка является важной особенностью предлагаемого распределения. В предыдущих моделях, в которых шнек касался поверхности зеера, возникала точка разрыва скоростей. При вычислении градиента скоростей в этой точке возникает особенность, от которой приходилось избавляться численными методами [14]. А в рассматриваемой модели такой особенности не возникает, что облегчает переход к модели Бингама.

Таким образом, граничные условия для нахождения вектора скорости можно записать в виде

$$v_z(x, 0, z) = V_1; \quad v_z(x, a, z) = 0; \quad v_z(0, y, z) = v_z(b, y, z) = V(y);$$

$$V(y) = V_1 + \frac{V_2 - V_1}{h} y; \quad y < h, \quad V(y) = \frac{b - y}{\delta} V_2; \quad h < y < a. \quad (2)$$

Ранее исследованные случаи получаются из (2) при равенстве скоростей $V_2 = V_1$ и отсутствии щели между шнеком и поверхностью зеера: $\delta = 0$. Значит данная модель является более общей и способна точнее описывать движение жидкости в канале шнека.

1.2. Нахождение распределения скорости

Течение материала в канале определяется как градиентом давления, так и движением шнека. Так как скорость задается различными уравнениями на нижней, верхней и боковых стенках канала, то представим скорость в виде суммы скоростей $v_z = v_1 + v_2 + v_3 + v_4$. Скорость v_1 определяется градиентом давления. Ее зададим в виде течения Пуазейля в плоском канале

$$v_1 = \frac{p_1}{2} x(x - b). \quad (3)$$

Так как v_1 удовлетворяет уравнению Пуассона (1), то оставшиеся скорости $v_{2,3,4}$ должны удовлетворять уравнению Лапласа. Скорость v_2 определяется только скоростью движения шнека V_2 [15]

$$v_2 = \frac{4V_2}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} v_{2k} \frac{\sinh(\pi(2k+1)\frac{y}{b})}{\sinh(\pi(2k+1)\frac{a}{b})} \sin\left(\pi(2k+1)\frac{x}{b}\right), \quad (4)$$

где коэффициенты Фурье задаются равенством $v_{2k} = \frac{1}{(2k+1)}$.

Скорость v_3 определяется скоростью движения боковых стенок. Выберем ее так, чтобы были выполнены граничные условия на боковых стенках

$$v_3(x, 0, z) = 0; \quad v_3(x, a, z) = 0; \quad v_3(0, y, z) = v_3(b, y, z) = V(y). \quad (5)$$

Решение уравнение Лапласа при граничных условиях (5) отыскиваем в виде ряда Фурье

$$v_3 = \sum_{n=0}^{\infty} v_{3n} \frac{\cosh(\pi n \frac{2x-b}{2a})}{\cosh(\pi n \frac{b}{2a})} \sin\left(\pi n \frac{y}{a}\right), \quad (6)$$

При записи (6) использована симметрия граничных условий для v_3 . Коэффициенты Фурье v_{3n} находятся при разложении скорости $V(y)$ в тригонометрический ряд Фурье и имеют вид

$$v_{3n} = \frac{2V_2 l^2}{\pi^2 n^2 h \delta} \sin \frac{\pi n h}{a} + \frac{V_1}{2\pi n} + \frac{(V_2 - V_1)a}{\pi^2 n^2 h} \sin \frac{\pi n h}{a} - \frac{V_2}{2\pi n} \cos \frac{\pi n h}{a}, \quad (7)$$

Так как течение Пуазейля v_1 не удовлетворяет граничным условиям на нижней и верхней границах канала, то необходимо ввести еще функцию v_4 , которая на этих стенках принимает значение v_1 . Отыскивая v_4 в виде, аналогичном (4)

$$v_4 = \frac{p_1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} v_{4k} \frac{\cosh \pi(2k+1)\frac{2y-a}{2b}}{\cosh \pi(2k+1)\frac{2b}{2b}} \sin\left(\pi(2k+1)\frac{x}{b}\right), \quad (8)$$

для коэффициентов Фурье v_{4k} получаем равенство

$$v_{4k} = \frac{8b^2}{\pi^3(2k+1)^3}. \quad (9)$$

Полученные формулы (3)–(9) полностью определяют распределение скорости v_z в рассматриваемой модели.

1.3. Поток материала через сечение канала шнека

Производительность маслопресса определяется потоком жидкости Π через поперечное сечение канала шнека

$$\Pi = \int_0^b \int_0^a v_z dy dx. \tag{10}$$

Поскольку скорость v_z есть сумма четырех скоростей, то и поток Π также есть сумма четырех потоков $\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4$. Значение потока Π_1 известно, $\Pi_1 = \frac{-v_{\eta} ab^3}{12}$. Вычисление оставшихся трех потоков также не вызывает никаких трудностей. После вычислений элементарных интегралов получаем

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= \frac{2b^2 v_2}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{\cosh \pi(2k+1) \frac{a}{b} - 1}{(2k+1)^3 \sinh \pi(2k+1) \frac{a}{b}}; \\ \Pi_3 &= \frac{2a}{\pi} \sum_0^{\infty} \tanh \pi(2k+1) \frac{b}{2a} v_{3(2k+1)}; \\ \Pi_4 &= \frac{2b}{\pi} \sum_0^{\infty} \tanh \pi(2k+1) \frac{a}{2b} v_{4(2k+1)}. \end{aligned} \tag{11}$$

На основе полученных формул (10), (11) в программе Matlab были произведены численные расчеты зависимости потока Π от соотношения параметров шнека a и b . В ширине канала b учитывалась втулка. В процессе вычислений использовались следующие значения параметров: частота вращения шнека – $0,133 \text{ с}^{-1}$, $\delta = 0,0005 \text{ м}$, радиус зеера $0,06 \text{ м}$, радиус ступицы $0,032 \text{ м}$. Поскольку величина градиента давления ∇P значительно меняется в процессе отжима и ее значение известно только приближенно, то при проведении расчетов слагаемые в потоке, содержащие градиент давления, не учитывались. На рисунке 3 представлена зависимость потока Π и его составляющих Π_2, Π_3 от параметра a при неизменной площади поперечного сечения канала шнека. Поток Π_4 как показали численные расчеты пренебрежимо мал и поэтому не изображается на рисунке.

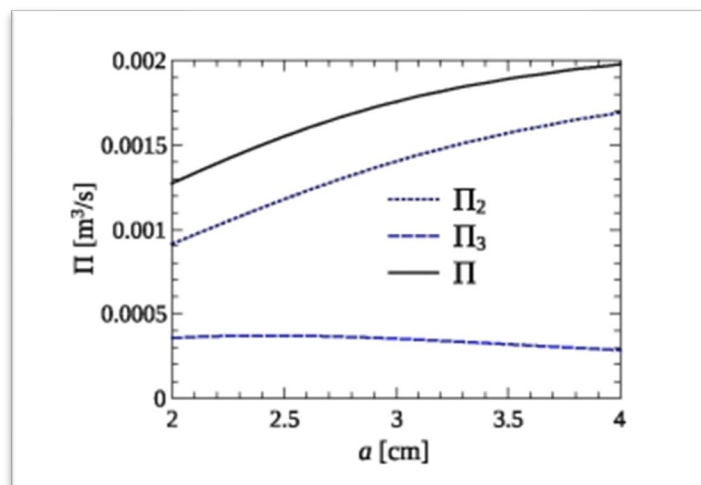


Рисунок 3 – Зависимость потока Π и его составляющих Π_2, Π_3 от параметра a при неизменной площади поперечного сечения канала шнека

Figure 3. The dependence of the flow Π and its components Π_2, Π_3 on the parameter a at a constant cross-sectional area of the screw channel

Выводы

Выведенные в работе аналитические выражения для координатной зависимости скорости течения в прямоугольном канале шнека второго участка маслопресса позволяют анализировать расходно-напорные характеристики в процессе отжима растительного масла в маслопрессе. Предложенная гидродинамическая модель учитывает наличие расстояния δ между шнеком и внутренней поверхностью зеера, а также неравномерность скорости движения точек на шнеке. Поток через сечение канала шнека определяется размерами этого канала a и b (причем в параметре b должна учитываться и втулка,

расположенная после шнека), минимальным расстоянием δ между шнеком и зером, скоростями движения шнека V_1 и V_2 . В свою очередь, эти скорости задаются частотой вращения шнека и углом наклона спирали шнека. Найденные зависимости позволяют оптимизировать пропускную способность канала шнека маслопресса.

Полученные решения уравнений гидродинамики используют ньютоновскую модель течения материала, но могут легко быть обобщены на неньютоновскую Бингамовскую вязкопластичную реологию [14]. В рассматриваемой модели этот переход осуществляется проще, так как градиент скорости течения не имеет никаких особенностей.

Важным преимуществом предлагаемой модели является возможность ее дальнейшего совершенствования в направлении учета течения материала в зазоре δ между шнеком и внутренней поверхностью зеера, разрушения материала в канале шнека и пр. Например, реальный канал шнека в поперечном сечении представляет собой геометрическую фигуру, которая более походит на трапецию, чем на прямоугольник. Используя малое отличие трапеции от прямоугольника, можно обобщить полученные в работе формулы и на случай канала шнека с поперечным сечением в виде трапеции.

Литература

1. Толчинский Ю.П., Ключкин В.В., Геращенко В.Н. Экструдеры и двухфазные среды. СПб.: Масложирпром, 1992, 576 с.
2. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел. М.: Пищевая промышленность, 1966. 478 с.
3. Петров И.А., Славнов Е.В. Моделирование шнек-прессового отжима как совокупности процессов течения вязкой несжимаемой смеси и фильтрации жидкости сквозь пористую среду // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6. № 3. С. 277–285. DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.3.31>
4. Косачев В.С., Гукасян А.В. Аналитика скорости сдвига в прямоугольном канале с неподвижной крышкой // Образование и наука в современных реалиях: сб. тр. Чебоксары: Изд-во Интерактив плюс, 2017. С. 146–148.
5. Снигерёв Б.А. Неизотермическое двухслойное течение неньютоновских жидкостей в плоском канале // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. № 4. С. 104–111.
6. Янков В.И., Боярченко В.И., Перевадчук В.П. Переработка волокнообразующих полимеров. В 7 т. Т. 2. Течение полимеров в шнековых насосах. М.–Ижевск: Изд-во Регулярная и хаотическая динамика, 2005. 998 с.
7. Раувендааль К. Экструзия полимеров. СПб.: Профессия, 2008, 768 с.
8. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. М.: Химия, КолосС, 2005. 568 с.
9. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Ершов С.В. Численный анализ влияния потоков утечек на процессы течения и теплообмена в условиях пластицирующей экструзии // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 4. С. 434–443. DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2014.7.4.41>
10. Кошевой Е.П. Технологическое оборудование производства растительных масел. М.: Юрайт, 2019. 365 с.
11. Субботин Е.В., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Численные исследования течений полимерных жидкостей в канале шнекового экструдера на основе одно- и двухмерных моделей // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. № 4. С. 452–460. DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2012.5.4.53>
12. Гукасян А.В., Шилько Д.А. Построение инженерной модели процесса прессования растительных масел с учетом гидродинамики винтовых потоков // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2020. № 3. С. 39–56. DOI: [10.47404/2619-0605_2020_3_39](https://doi.org/10.47404/2619-0605_2020_3_39)
13. Кошевой Е.П., Гукасян А.В., Косачев В.С. Двумерная модель течения материала в канале шнека с неподвижной крышкой // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 1. С. 20–24.
14. Гукасян А.В. Модель слоистого течения вязкопластичной Бингамовской жидкости в канале экструдера // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 2. С. 58–63. DOI: [http://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-58-63](https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-58-63)
15. Будаков Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. М.: Физматлит, 2004. 688 с.

References

1. Tolchinsky Yu.P., Klyuchkin V.V., Gerashchenko V.N. *Extruders and two-phase media*. St. Petersburg, Maslozhirprom Publ., 1992, 576 p. (In Russian)
2. Beloborodov V.V. *Basic processes for the production of vegetable oils*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1966. 478 p. (In Russian)

3. Petrov I.A., Slavnov E.V. Simulation of screw–press oil extraction as a set of two processes: incompressible viscous mixture flow and fluid filtration in porous medium. *Computational Continuum Mechanics*. 2013, V. 6, no. 3, pp. 277–285. DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.3.31> (In Russian)
4. Kosachev V.S., Gukasyan A.V. Shear rate analytics in a rectangular channel with a fixed lid. Education and Science in the Modern Context. *Collection of work*. Cheboksary, Interactiv plus Publ., 2017, pp. 146–148. (In Russian)
5. Snigerev B.A. Non-isothermal two layer flow of non-newtonian fluid in flat channel. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2013, no. 4, pp. 104–111. (In Russian)
6. Yankov V.I., Boyarchenko V.I., Perevadchuk V.P. Processing of fiber-forming polymers. 7 V. *The flow of polymers in screw pumps*. V. 2. Moscow–Izhevsk, Regular and Chaotic Dynamics Publ., 2005. 998 p. (In Russian)
7. Rauwendaal K. *Extrusion of polymers*. St. Petersburg, Profession Publ., 2008, 768 p. (In Russian)
8. Kim V.S. *Theory and practice of polymer extrusion*. Moscow, Chemistry, KolosS Publ., 2005, 568 p. (In Russian)
9. Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Ershov S.V. Numerical analysis of the influence of leakage flows on flow and heat transfer processes under plastifying extrusion. *Computational Continuum Mechanics*. 2014, V. 7, no. 4, pp. 434–443. DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2014.7.4.41> (In Russian)
10. Koshevoi E.P. *Technological equipment for the production of vegetable oils*. Moscow, Urait Publ., 2019. 365 c. (In Russian)
11. Subbotin E.V., Trufanova N.M., Shcherbinin A.G. Numerical study of polymer fluid flows in the channel of a screw extruder using one-and two-dimensional models. *Computational Continuum Mechanics*. 2012, V. 5, no. 4, pp. 452–460. DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2012.5.4.53> (In Russian)
12. Gukasyan A.V., Shilko D.A. Construction of an engineering model of the pressing process of vegetable oils taking into account the hydrodynamics of screw flows. *Bulletin of Kerch State Marine Technological University*. 2020, no. 3, pp. 39–56. DOI: 10.47404/2619-0605_2020_3_39 (In Russian)
13. Koshevoi E.P., Gukasyan A.V., Kosachev V.S. Two-dimensional model of material flow in a channel screw with a fixed lid. *Proceeding of the Voronezh State University Engineering Technologies*. 2018, V. 80, no. 1, pp. 20–24. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-1-20-24 (In Russian)
14. Gukasyan A.V. Model of layered flow of viscous-plastic Bingham fluid in the extruder channel. *Proceeding of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018, V. 80, no. 2, pp. 58–63. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-2-58-63 (In Russian)
15. Budak B.M., Samarskii A.A., Tikhonov A.N. *Collection of problems in mathematical physics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 688 p. (In Russian)

Информация об авторах

Александр Сергеевич Старков – канд. физ.-мат. наук, доцент факультета систем управления и робототехники
Геннадий Ефимович Мельник – канд. техн. наук, вед. научный сотрудник
Константин Александрович Старков – вед. специалист
Дмитрий Александрович Лисицын – мл. науч. сотрудник

Information about the authors

Alexander S. Starkov, Ph.D., Associate Professor of the Department of Control Systems and Robotics
Gennady E. Melnik, Ph.D., Leading Researcher
Konstantin A. Starkov, Leading Specialist
Dmitry A. Lisitsyn, Junior Researcher

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 20.04.2022

Одобрена после рецензирования 01.06.2022

Принята к публикации 06.06.2022

The article was submitted 20.04.2022

Approved after reviewing 01.06.2022

Accepted for publication 06.06.2022