

Научная статья

УДК 541.182; 532.7; 664.3

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-3-37-44

Моделирование течения маслосодержащего материала в каналах прессующего тракта маслопресса. Часть 2. Распределение скоростей

Г.Е. Мельник*, К.А. Старков

ВНИИЖиров, Россия, Санкт-Петербург

*genmelnik@yandex.ru

Аннотация. Предложен метод расчета распределения скоростей в каналах маслопресса, содержащем конфузорные участки, на основе асимптотических разложений по малому параметру ε , характеризующему тангенс угла наклона границ канала. Показано, что в главном приближении течение описывается классическим профилем Пуазейля для цилиндрических участков, а медленное изменение геометрии учитывается через поправки к скорости и давлению. Условие постоянства потока позволяет определить и градиент давления, который оказывается наибольшим вблизи конфузоров. Для проверки асимптотической теории проведены численные расчеты в COMSOL Multiphysics для трех типов конфузоров: одиночного с постоянным внешним радиусом, одиночного с переменным радиусом и системы из двух конфузоров. Результаты демонстрируют хорошую корреляцию с асимптотическими предсказаниями, особенно для малых углов наклона. На графиках скорости выявлены области с повышенным градиентом давления, что объясняется обратной зависимостью между скоростью и площадью сечения канала. Исследовано влияние геометрии конфузоров на процесс измельчения частиц маслосодержащего материала. Показано, что увеличение скорости течения и наличие острой кромки конфузора способствуют интенсификации процесса за счет усиления трения и столкновения частиц.

Ключевые слова: механика течения материала; растительные пищевые масла; конфузорные каналы; распределение скорости; асимптотическое решение задачи; численное моделирование

Original article

Modeling of oil-containing material flow in the channels of the pressing path of an oil press. Part 2. Velocity distribution

Gennady E. Melnik*, Konstantin A. Starkov

All-Russian Research Institute of Fats, St. Petersburg, Russia

*genmelnik@yandex.ru

Abstract. The paper proposes a method for calculating the velocity distribution in the channels of an oil press containing confuser sections, based on asymptotic expansions in the small parameter ε , which characterizes the tangent of the angle of inclination of the channel boundaries. It is shown that in the main approximation the flow is described by the classical Poiseuille profile for cylindrical sections, and the slow change in geometry is taken into account through corrections to the velocity and pressure. The condition of constant flow allows to determine the pressure gradient, which is the highest near the confusers. Numerical calculations were performed in COMSOL Multiphysics to verify the asymptotic theory for three types of confusers: a single confuser with a constant outer radius, a single confuser with a variable radius, and a system of two confusers. The results show a good correlation with asymptotic predictions, especially for small tilt angles. The velocity graphs show the areas with an increased pressure gradient, which is explained by the inverse relationship between velocity and the cross-sectional area of the channel. The influence of confuser geometry on the process of grinding particles of an oil-containing material is investigated. It is shown that an increase in the flow velocity and the presence of a sharp confuser edge contribute to the intensification of the process due to increased friction and particle collisions.

Keywords: flow mechanics of material; vegetable edible oils; confuser channels; velocity distribution; asymptotic solution of the problem; numerical modeling

Введение

Точный расчет течения маслосодержащей жидкости по каналам прессующего тракта шнекового маслопресса, включающих конфузорные, является весьма непростой задачей даже для современных компьютеров. Данное обстоятельство вызвано сложной геометрией прессующего тракта, наличием движущихся (вращающихся) частей – шнеков и конусов, нелинейной зависимостью вязкости перемещаемого маслосодержащего материала от скорости. Ввиду этого несомненный интерес

представляют приближенные методы расчета полей давления и скоростей в каналах шнекового маслопресса. В настоящей работе предлагается для расчета конфузорных каналов использовать асимптотические методы, которые хорошо себя зарекомендовали при расчете волноводов [1, 2]. При расчете каналов маслопресса подобные методы ранее не использовались. Их преимуществом является возможность получения аналитических выражений для скорости и давления, что существенно облегчает процесс расчета маслопресса. Отпадает необходимость численного решения сложных уравнений гидродинамики. Условием применимости асимптотических разложений для канала маслопресса, содержащего конфузоры или диффузоры, является малость тангенса угла наклона границ канала к его оси, которое для реальных маслопрессов, как показано ниже, выполняется. Главный член асимптотики достаточно просто выводится из физически очевидного условия постоянства потока Q .

Ранее [3] было рассмотрено распределение давления при течении материала в конфузорных каналах прессующего тракта шнекового маслопресса. Изучение распределения скоростей и производительности в этих каналах является логическим продолжением работы [3], ряд положений которой является актуальным и для настоящего исследования.

Цель данной работы – исследование напорно-расходных характеристик при течении маслосодержащего материала в каналах прессующего тракта маслопресса, включающих конфузорный.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования приняты каналы прессующего тракта шнекового маслопресса, включающие конфузорные, в которых при движении материала происходит его измельчение. Схема модели каналов прессующего тракта шнекового маслопресса принимается такой же, как на рисунке 1 исследования [3]. Описание модели подробно представлено в [3]. Уточним, что конфузор – часть прессующего тракта шнекового маслопресса, состоящая из конуса и участка зерновой камеры по длине конуса, коническо-цилиндрические (или конические) поверхности которых образуют кольцевой канал, по которому перемещается маслосодержащий материал. Принятые для исследования условия и предположения, описание программного комплекса COMSOL Multiphysics v.6.1 (с модулем Laminar Flow), математические приемы описания, геометрические параметры модели каналов так же приведены в [3]. Особое внимание уделялось выбору решателя и параметров вычислений. Для интегрирования уравнений Навье–Стокса применялся метод конечных элементов с квадратичными базисными функциями для скорости и линейными – для давления (элементы P2-P1). Использовался прямой решатель MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Sparse) с относительным допуском сходимости 10^{-6} . Для учета нелинейности уравнений применялась метод Ньютона с автоматическим подбором шага. Временная дискретизация в нестационарной постановке осуществлялась по неявной схеме BDF (Backward Differentiation Formula) второго порядка с адаптивным шагом по времени.

Величина тангенса угла наклона границ конфузорного канала к его оси обозначена через ε . Для рассматриваемой модели каналов прессующего тракта (рисунок 1 [3]) нерегулярными участками являются два конфузора. Малый параметр для них равен $\varepsilon_1 = 0,155$ и $\varepsilon_2 = 0,072$ соответственно. В данной работе ограничимся нахождением только главных членов асимптотических рядов по степеням ε . Наличие скачка радиуса на границе конфузора формально приводит к неприменимости асимптотики, но в главном порядке она сохраняется из-за универсальности закона сохранения потока. Нахождение последующих членов никаких трудностей не вызывает [1, 2]. Они не приведены из-за их громоздкости, которая затрудняет понимание физической сути. Для проверки асимптотических разложений приводится численное решение задачи. Текущий в каналах прессующего тракта маслосодержащий материал моделировали вязкой ньютоновской жидкостью, поскольку это существенно упрощает последующие расчеты, слабо влияя на поведение характеристик течения материала в прессующем тракте маслопресса для неньютоновской модели [3–6].

Результаты и их обсуждение

1. Асимптотическое решение задачи о течении жидкости между цилиндрами переменного радиуса

Течение вязкой жидкости осуществляли между двумя соосными цилиндрами, радиусы которых $R_1(x)$ (внутренний) и $R_2(x)$ (внешний) медленно меняются вдоль оси x . Здесь ε – малый параметр, характеризующий медленное изменение геометрии. Искали решение уравнений Навье–Стокса,

зависящее только от расстояния r до оси цилиндров и слабо зависящее от координаты x (т. е. осесимметричное течение без завихренности). Для осесимметричного течения, где имеется только продольная и радиальная компоненты скорости $u = (u_x, u_r, 0)$, уравнения для вязкой жидкости упрощали. Уравнение неразрывности и уравнение Навье–Стокса в продольном направлении x в этом случае имеют вид

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (ru_r)}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} = \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

где η – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

p – давление, Па.

На границах канала будем считать выполненными условия прилипания

$$u_x(x, R_1) = 0, \quad u_x(x, R_2) = 0. \quad (3)$$

Более общий случай наличия проскальзывания рассмотрен в [1]. Давление должно удовлетворять уравнению Лапласа

$$\Delta u(x, r) = 0. \quad (4)$$

Данное уравнение является следствием уравнения Навье–Стокса и обычно не приводится, но в рассматриваемом случае позволяет более просто определять давление.

Если $u_r = 0$, то $\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$, т. е. u_x не зависит от x . Однако в нашем случае радиусы цилиндров

медленно меняются с x , поэтому u_x может слабо зависеть от x . Для учета медленного изменения границ введем медленную переменную $X = \varepsilon \cdot x$, тогда радиусы цилиндров будут функциями X : $R_1 = R_1(X)$, $R_2 = R_2(X)$. Будем искать решение для компонент скорости и давления в виде формального асимптотического разложения по малому параметру ε

$$\begin{aligned} u_x(r, X) &= u_0(r, X) + \varepsilon u_1(r, X) + \varepsilon^2 u_2(r, X) + \dots \\ u_r(r, X) &= q_0(r, X) + q_1(r, X) + O(\varepsilon^2), \\ p(x, r) &= p_0(r, X) + \varepsilon p_1(r, X) + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

Параметры $u_{0,1,2\dots}(r, X)$, $q_{0,1}(r, X)$, $p_{0,1\dots}(r, X)$ являются членами разложения асимптотического ряда при разных степенях малого параметра ε . Подстановка разложений (5) в уравнения (1)–(3) и приравнивание коэффициентов при одинаковых степенях ε дают рекуррентную последовательность задач для определения коэффициентов рядов. Условия прилипания (4) должны быть выполнены для всех членов ряда скоростей.

Выпишем уравнение неразрывности в терминах медленной переменной X

$$\varepsilon \frac{\partial u_x}{\partial X} + \frac{1}{r} \frac{\partial (ru_r)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

Это означает, что u_r должно компенсировать изменение u_x вдоль X . Проинтегрируем обе части полученного уравнения по радиусу. Вначале рассмотрим уравнения в главном приближении, т. е. полученные приравниванием выражений, не содержащих ε . Из уравнения неразрывности (6) вытекает $q_0 = 0$. Уравнение Навье–Стокса в нулевом порядке имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_0}{\partial r} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{dp_0}{dX}, \quad (7)$$

где $\mu = \rho \cdot \eta$ – есть динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

$\frac{dp_0}{dX}$ – градиент давления, $\text{Па}/\text{м}$.

Отсутствие зависимости p_0 от r есть простое следствие уравнения (3) в растянутых координатах. Решение (7) описывает классическое течение Пуазейля между цилиндрами с фиксированными радиусами $R_1(X)$ и $R_2(X)$

$$u_0(r, X) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_0}{dX} (r^2 + C_1 \ln r + C_2).$$

Константы C_1 и C_2 определяются из условий прилипания на стенках. В результате для осевой скорости в главном приближении получаем

$$u_0(r, X) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_0}{dX} \left(r^2 - R_1^2 \frac{\ln\left(\frac{r}{R_2}\right)}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} - R_2^2 \frac{\ln\left(\frac{r}{R_1}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \right). \quad (8)$$

Неизвестной величиной в приведенной формуле является только градиент поляризации. Для его нахождения перейдем к рассмотрению уравнений первого порядка по ε , когда учитывается медленное изменение геометрии. Из уравнения неразрывности (6) вытекает равенство

$$\frac{\partial u_0}{\partial X} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rq_1)}{\partial r} = 0.$$

Интегрируя это равенство, находим q_1

$$q_1(r, X) = -\frac{1}{r} \int_{R_1(X)}^r \frac{\partial u_0}{\partial X} r' dr'. \quad (9)$$

Отметим, что для линейного закона изменения радиусов, справедливого для конфузоров, интеграл (9) вычисляется явно. Для произвольных зависимостей $R_1(X)$ и $R_2(X)$ он может быть найден численными методами.

Переход к уравнению Навье–Стокса в радиальном направлении (первый порядок) приводит к уравнению

$$u_0 \frac{\partial q_1}{\partial X} + q_1 \frac{\partial u_0}{\partial r} = \eta \left(\frac{\partial^2 q_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial q_1}{\partial r} - \frac{q_1}{r^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial r}.$$

При его интегрировании получаем выражения для второго члена ряда (давления) в виде интеграла

$$p_1(r, X) = \int \left[\mu \left(\frac{\partial^2 q_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial q_1}{\partial r} - \frac{q_1}{r^2} \right) - \rho \left(u_0 \frac{\partial q_1}{\partial X} + q_1 \frac{\partial u_0}{\partial r} \right) \right] dr.$$

Неопределенный интеграл в полученном выражении указывает на то, что поправка $p_1(r, X)$ определена с точностью до произвольной функции растянутой переменной, которая определится на следующем этапе вычислений при рассмотрении членов порядка ε^2 .

Для нахождения оставшегося неопределенным давления $p_0(X)$ вычислим объемный поток Q

$$Q = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} u_x r dr = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} (u_0 + \varepsilon u_1) r dr + O(\varepsilon^2).$$

Поскольку u_x зависит от координаты X , то и поток Q тоже может зависеть от X . Для нахождения зависимости потока от X проинтегрируем обе части уравнения (6) по радиусу, вычислим производную и получим

$$\frac{\partial Q}{\partial X} = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} \frac{\partial u_x}{\partial X} r dr = -2\pi \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} r dr = -2\pi [ru_r]_{R_1}^{R_2}.$$

Из условия непротекания на стенках следует, что $u_r(R_1) = u_r(R_2) = 0$, поэтому $Q = \text{const}$. Таким образом, постоянство потока автоматически выполняется во всех порядках асимптотического разложения. В дальнейшем ограничимся исследованием только главного слагаемого в интегральном представлении для потока

$$Q_0 = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} u_0 r dr.$$

Проинтегрировав обе части равенства (8) по радиусу, получаем

$$Q_0 = \frac{\pi}{2\mu} \frac{dp_0}{dX} \left[\frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{4 \ln(R_2/R_1)} + \frac{R_1^4 - R_2^4}{4} \right]. \quad (10)$$

Поскольку поток Q_0 есть постоянная величина, то из полученного соотношения находим $\frac{dp_0}{dX}$, а после интегрирования и само давление $p_0(X)$. Аналогичным образом из условия постоянства потока могут быть найдены и последующие члены асимптотического ряда для давления. Коэффициенты асимптотики радиальной скорости u_r находятся из уравнения неразрывности, а для продольной скорости u_x – из уравнения Навье–Стокса.

2. Численные расчеты скорости течения материала в каналах

Для оценки возможностей использования асимптотической теории для нахождения распределения давления и скоростей течения материала в каналах проведены численные расчеты в вычислительной системе COMSOL Multiphysics v.6.1 [3]. Рассмотрены три канала различной геометрии (рисунок 1 [3]): канал I, канал II и последовательно соединенные каналы I и II – вместе составляющие канал III. В каналы I, II, III включены соответствующие конфузорные каналы I, II, I и II. Для корректного описания физического процесса применялась нестационарная постановка задачи, где в начальный момент времени скорость течения жидкости во всей расчетной области принималась равной нулю. Граничные условия включали задание фиксированного давления на входе в каждый канал $P_{in} = 1$ кПа, на выходе $P_{out} = 3$ кПа. Расчет продолжали до достижения стационарного режима течения, при котором расход материала через поперечное сечение канала стабилизировался.

В результате вычислений получены распределения скорости течения материала в каналах. На рисунках 1 и 2 представлены зависимости скорости для канала I и канала II.

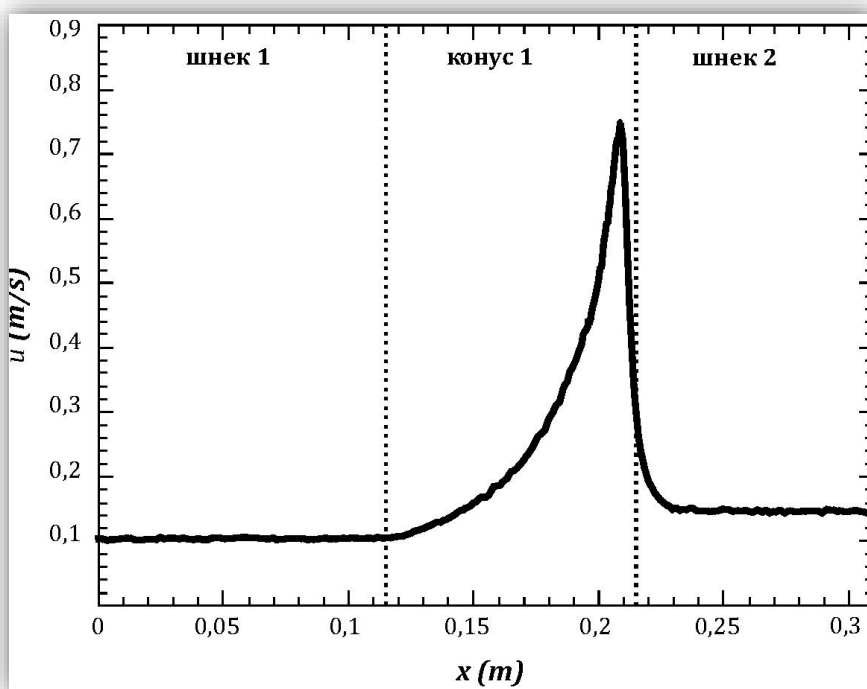


Рисунок 1 – Распределение скорости в канале I (с одним конфузорным каналом I)
Figure 1. Velocity distribution in channel I (with one convergent channel I)

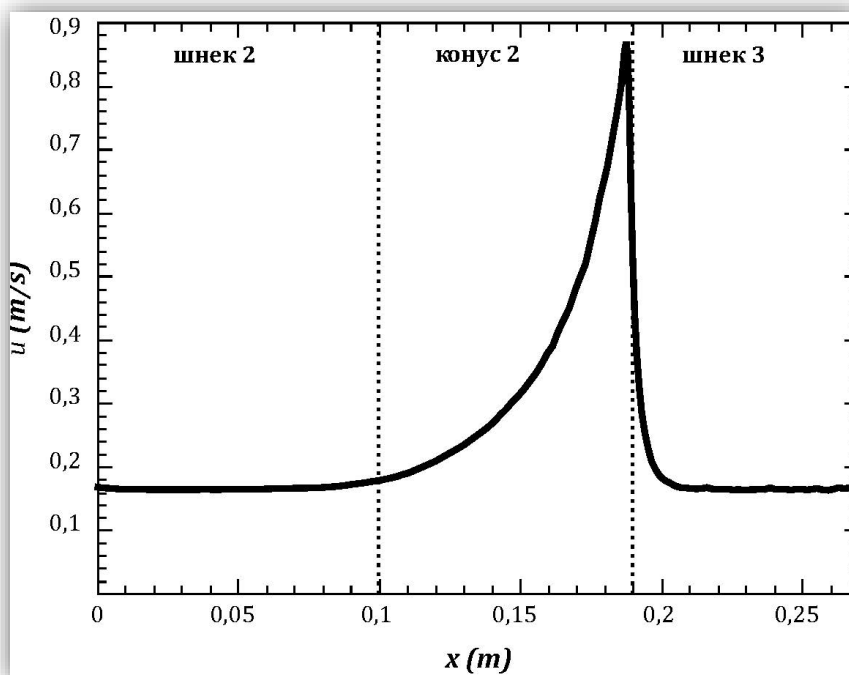


Рисунок 2 – Распределение скорости в канале II (с одним конфузторным каналом II)
Figure 2. Velocity distribution in channel II (with one convergent channel II)

Наличие конфузора приводит к усилению процесса измельчения частиц, что связано с увеличением скорости движения маслосодержащего материала по каналу и усилением столкновений между частицами. Максимально процесс измельчения ускоряется на выходе из конфузторного канала. Но основное влияние на процесс измельчения, на наш взгляд, оказывает наличие областей с повышенным градиентом давления. Существование таких областей вытекает из условия постоянства потока, т. е. обратной пропорциональности градиента давления средней по сечению продольной скорости (10).

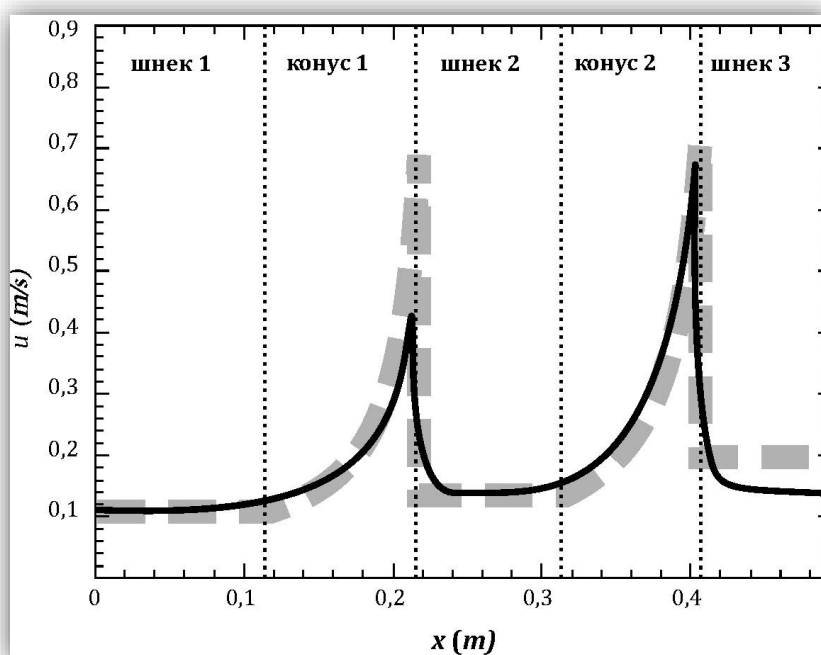


Рисунок 3 – Сравнение скоростей, рассчитанных из условия постоянства потока (пунктирная линия), и при численном решении (непрерывная линия) в канале III (с конфузторными каналами I и II)
Figure 3. Comparison of velocities calculated from the constant flow condition (dashed line) and from the numerical solution (continuous line) in channel III (with convergent channels I and II)

На рисунке 3 представлено сравнение скоростей, рассчитанных различными способами. Один из них (пунктирная линия) получен из условия постоянства потока $uS = \text{const}$, где S – площадь поперечного сечения канала прессующего тракта маслопресса, а второй (непрерывная линия) – численным решением уравнения Навье–Стокса. Из приведенного рисунка видно, что приближенная формула достаточно близка к более точной почти всюду в канале. Отличия наблюдаются только вблизи наиболее узкого места канала. Причем увеличение скорости в приближенной формуле вблизи окончания конфузора компенсируется ее уменьшением в области, расположенной сразу за ним. Из сравнения следует вывод о применимости приближенной формулы для расчета скорости в канале маслопресса.

На рисунке 4 график изменения максимальной скорости потока по длине конфузурного канала I. Он указывает на линейную зависимость $u_{\max}$ от угла наклона конфузурного канала к оси маслопресса для углов наклона менее 45° . При $l_2 > 0,1$ м коэффициент детерминации линейной регрессии (рисунок 4) равен 0,985. Линейный характер данной зависимости начинает нарушаться только при очень больших углах наклона, близких к прямому углу.

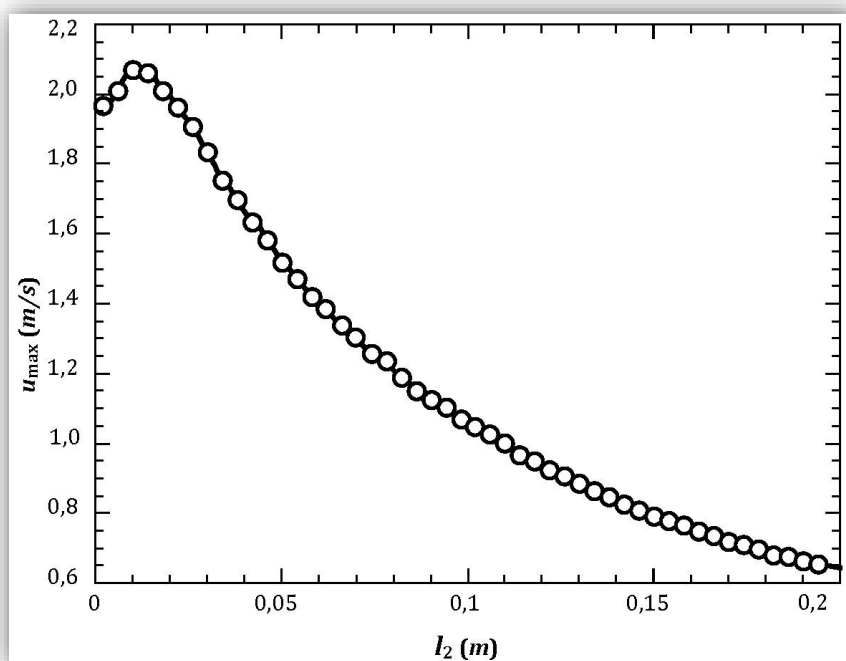


Рисунок 4 – Изменение максимальной скорости потока по длине конфузурного канала I. Для визуализации нанесена область проведения расчета линейной регрессии

Figure 4. Change of maximum flow velocity along the length of the confuser channel I. The area in which the linear regression calculation is performed is shown for visualization

Заключение

Установлено, что величина скорости материала в каналах прессующего тракта маслопресса, содержащих конфузурные, определена из условия сохранения постоянства потока и описывает локальное течение Пуазейля с заданным градиентом давления. Наличие конфузурных каналов вследствие возрастания скорости движения частиц материала приводит к увеличению трения как между отдельными частицами, так и между границами каналов и частицами. В результате ускоряется процесс измельчения частиц, определяющим фактором которого является возникновение в конфузурном канале областей со значительным градиентом давления.

Предложенный асимптотический метод расчета течения вязкой жидкости в каналах с медленно меняющейся геометрией, основанный на разложении по малому параметру ε , показал высокую эффективность для анализа конфузурных каналов прессующего тракта маслопресса. Важным его преимуществом является универсальность – он применим не только для идеальных цилиндрических каналов, но и для каналов сложных геометрий, характерных для реальных промышленных устройств.

Показано, что в конфузурных каналах формируются зоны с повышенным градиентом давления. Авторы это объясняют сохранением постоянства расхода потока материала при течении его в сложном

канале прессующего тракта с изменяющейся площадью сечения. Оно играет ключевую роль в процессе измельчения частиц маслосодержащего материала, так как увеличение скорости течения и локальных напряжений приводит к усилению трения и столкновению между частицами.

Научная новизна исследований, выполненных в настоящей публикации (и ранее в Части 1 [3]), заключается в том, что разработанные методы расчета и анализа основных напорно-расходных характеристик течения маслосодержащего материала в каналах прессующего тракта маслопресса, включая конфузорные, позволяют не только описать происходящие при этом явления, но и объяснить закономерности механизма измельчения в конфузорных каналах. При этом практическая значимость состоит в том, что предложенные методы позволяют сократить время и вычислительные ресурсы при инженерных расчетах шнековых маслопрессов, заменяя трудоемкие численные расчеты аналитическими оценками. Это особенно актуально для задач, связанных с оптимизацией геометрии каналов и выбором режимов работы маслопресса. Полученные результаты могут использоваться в областях науки, изучающих течения вязких сред в каналах сложной геометрии.

Литература

1. Щитов И.Н. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Физматлит. 2013. 173 с.
2. Диваков Д.В., Ловецкий А.Л., Севастьянов А.Л., Тютюнник А.А. Адиабатические водноводные моды трехслойного интегрально-оптического волновода // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 4. С. 453–457. DOI: 10.21883/JTF.2023.04.55031.292-22
3. Старков И.А., Мельник Г.Е., Старков А.С., Лисицын Д.А. Моделирование течения маслосодержащего материала в каналах прессующего тракта маслопресса. Часть 1. Распределение давления // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2025. № 3. С. 27–36. DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-3-27-36
4. Ерофеев И.В., Коржов Е.Н., Шашкин А.И., Иванов А.В., Добросокая М.В. Математическое моделирование турбулентного течения жидкости в кольцевом конфузоре под действием перепада давления // Вестник Воронежского гос. ун-та. Серия: Физика. Математика. 2011. № 1. С. 138–146.
5. Sarukhanyan A.A., Vardanyan Y. V., Vermishyan G.B. Study of changes in hydrodynamic parameters patterns of viscous fluid flow in a flat diffuser. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022, V. 333, no. 10, pp. 169–199. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3698
6. Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей. М.: Техносфера. 2022. 284 с.

References

1. Shchitov I.N. Asymptotic expansions of solutions of singularly perturbed problems for ordinary differential equations. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 173 p. (In Russian)
2. Divakov D.V., Lovetskiy K.P., Sevastyanov A.L., Tiutiunnik A.A. Adiabatic aqueous modes of a three-layer integrated optical waveguide. *Technical Physics*. 2023, V. 68, Is. 4, pp. 423–426. DOI: 10.21883/TP.2023.04.55931.292-22. (In Russian)
3. Starkov I.A., Melnik G.E., Starkov A.S., Lisitsyn D.A. Modeling of oil-containing material flow in the channels of the pressing path of an oil press Part 1. Pressure distribution. *Processes and Food Production Equipment*. 2025, no. 3, pp. 27–36. DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-3-27-36. (In Russian)
4. Yerofeev I.V., Korzhov E.N., Shashkin A.I., Ivanov A.V., Dobrosokaya M.V. Mathematical modelling of the turbulent flow of liquid in the annular confusor under the pressure. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*. 2011, no. 1, pp. 138–146. (In Russian)
5. Sarukhanyan A.A., Vardanyan Y. V., Vermishyan G.B. Study of changes in hydrodynamic parameters patterns of viscous fluid flow in a flat diffuser. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022, V. 333, no. 10, pp. 169–199. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3698
6. Kirsanov E.A., Matveenko V.N. Viscosity and elasticity of structured liquids. Moscow, Technosphere Publ., 2022. 284 p. (In Russian)

Информация об авторах

Геннадий Ефимович Мельник – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
Константин Александрович Старков – ведущий специалист

Information about the authors

Gennady E. Melnik, Ph. D., Principal Researcher
Konstantin A. Starkov, Principal Specialist

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

Статья поступила в редакцию 09.07.2025
Одобрена после рецензирования 30.08.2025
Принята к публикации 10.09.2025

The article was submitted 09.07.2025
Approved after reviewing 30.08.2025
Accepted for publication 10.09.2025