

DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.2.12

УДК 532.546.2

МОДЕЛЬ ЭКСТРУЗИОННОГО ОТЖИМА МАСЛА ИЗ СЕМЯН РАПСА

С.Д. Анфёров¹, О.И. Скульский², Е.В. Славнов²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Предложена гидродинамическая модель экструзионного отжима масла из семян рапса. Модель базируется на законах сохранения импульса, масс и энергии. Исходный продукт представляется как сырье, состоящее из пластически деформируемой пористой насыщенной маслом среды. Сформулирована краевая задача, содержащая в качестве независимых переменных давление в сырье, давление в масле, скорость движения сырья и распределение температуры. Получено приближенное аналитическое решение задачи при постоянных коэффициентах вязкости и фильтрации. Показано, что аналитическое решение с постоянными параметрами описывает возрастание давления и скорости отжима масла по длине зерновой камеры как монотонное, что противоречит экспериментальным данным. С учетом экспериментально найденных реологических и фильтрационных зависимостей разработан алгоритм численного решения задачи на основе метода конечных элементов. Определены поля давлений в сырье и масле, скорости движения сырья и фильтрационных потоков в винтовом канале экструдера, снабженного зерновой камерой. Обнаружено, что увеличение давления в сырье приводит к уменьшению скорости отжима масла, а распределение скорости отжима масла по длине зерновой камеры имеет максимум, что согласуется с экспериментальными данными. Созданная модель может служить основой для конструирования и нахождения оптимальных технологических режимов экструзионного отжима.

Ключевые слова: математическая модель, пластически деформируемая пористая среда, экструзионный отжим, фильтрация, масло, семена рапса, аналитические и численные методы

MODEL OF EXTRUSION PRESSED OILS FROM RAPESEED

S.D. Anferov¹, O.I. Skul'skiy² and E.V. Slavnov²¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation²Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

This paper presents a hydrodynamic model for rapeseed oil extrusion-pressing, which is based on the laws of conservation of momentum, mass and energy. We examine a raw material that is a plastically deformed, porous oil-saturated medium. A boundary-value problem that includes such independent variables as medium pressure, oil pressure, medium velocity and temperature distribution is formulated. An approximate analytical solution to the problem is found for constant viscosity and filtration coefficients. The solution describes pressure growth and an increase in the oil extraction rate along the extracting box as monotonic, and this does not coincide with the experimental data. Based on the experimental data for rheological and filtration dependencies, a numerical algorithm is developed using a finite element method. Pressure fields for medium and oil, medium velocity and filtration flow velocity in the extruder channel equipped with extracting box are obtained. It has been found that the increase of pressure in the raw material reduces oil extraction rate, and the distribution of oil extraction rate along the extracting box exhibits a maximum, which coincides with the experimental data. Our model can form the basis for determining optimum extrusion-pressing conditions.

Key words: mathematical model, plastically deformed porous medium, extrusion-pressing, filtration, oil, rape seeds, analytical and numerical methods

1. Введение

Растительное масло, полученное из высококачественных семян рапса, характеризуется высоким содержанием полезных полиненасыщенных жирных кислот, что существенно отличает его от других видов растительных масел. В семенах озимого рапса содержится 35–45% масла. Масло используется в пищу, применяется в полиграфической, лакокрасочной, мыловаренной промышленности и в производстве биотоплива.

Одним из способов получения растительного масла является экструзионный отжим через зерновую камеру, представляющую собой часть корпуса шнека. Камера состоит из набора тонких продольных стальных пластин, малые зазоры между которыми препятствуют проникновению измельченной обрабатываемой масличной культуры, но свободно пропускают масло [1]. Вращение шнека-винта внутри корпуса экструдера обеспечивает продвижение сырья по направлению к головке, гидродинамическое сопротивление которой создает встречный перепад давления по длине. Фильтрация масла через пластически деформируемую пористую смесь и отжим масла за пределы канала экструдера через зерновую камеру вызывают радиальный перепад давления в масле (см. Рис. 1).

Математические модели фильтрации жидкостей через недеформирующиеся пористые среды широко известны и хорошо разработаны [2, 3]. Менее изучены процессы фильтрации в средах, деформирующихся упруго [4, 5]. Не так многочисленны и общеприняты математические модели фильтрации жидкостей и газов в условиях развитого пластического движения пористых сред, хотя в природе и технологических

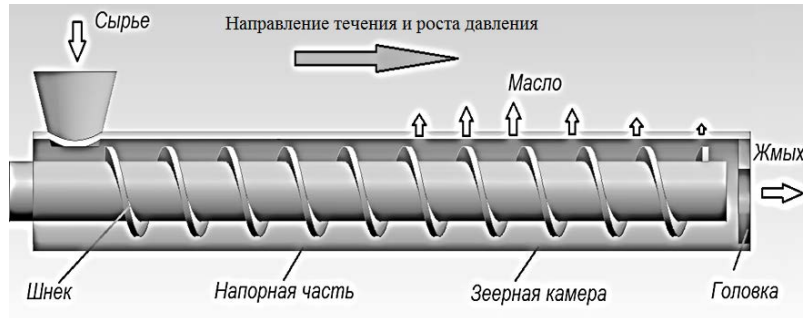


Рис. 1. Схема движения сырья и отжимаемого масла в экструдере

процессах такие явления существуют, например, при течении расплавленной газонасыщенной лавы при извержении вулканов [6], при отжиме масла из масличных зерновых культур и при производстве биотоплив [7]. Обращение к существующим коммерческим пакетам программ показывает, что и они не позволяют моделировать течения неньютоновских жидкостей, осложненных процессами сжимаемости, диффузии и массопереноса.

Целью данной работы является построение математической модели, дающей возможность применять современные математические методы расчета и анализировать процесс отжима пластически деформируемой пористой насыщенной маслом среды при экструзионной переработке масличных культур.

2. Экспериментальное исследование свойств экструдата рапса

Для исследования свойства сжимаемости насыщенных маслом образцов экструдата семян рапса применялась цилиндрическая камера, в которой с одной стороны с заданной скоростью двигался поршень, а с другой стороны находилась сетка, проницаемая для масла, но препятствующая движению пористого сырья. Образцы получались на лабораторном экструдере с диаметром шнека 32 мм при частоте вращения $(2 \cdot \pi) \text{ сек}^{-1}$ (60 об/мин) без внешнего нагрева.

В эксперименте замерялись величины изменения объемов образца и отжатого масла. Представленные на рисунке 2 результаты показывают, что в замкнутом объеме сырье, насыщенное маслом, несжимаемо, а изменение объема сырья обусловлено только отжимом масла и выходом его за границы области.

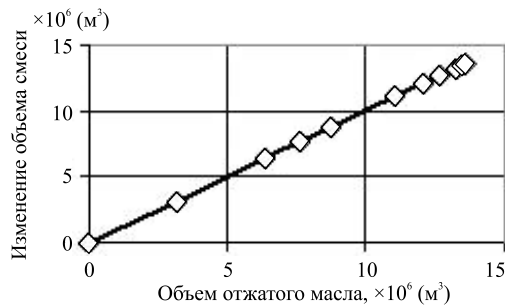


Рис. 2. Соотношение между изменением объема сырья и количеством отжатого масла при перепадах давления от 0 до 5 МПа

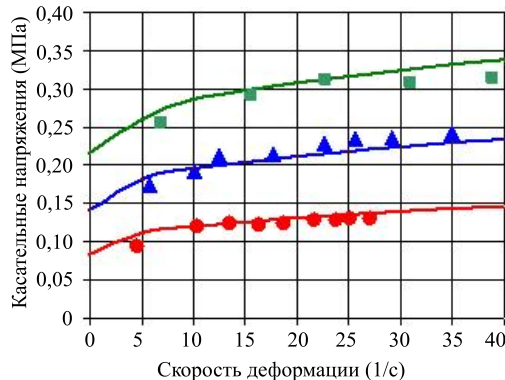


Рис. 3. Кривые течения экструдата при $T_0 = 25^\circ \text{C}$ и различных значениях давления поджатия P : 0 (кривая 1); 15 (2); 34 (3)

Регистрация реологических свойств экструдатов рапса проводилась на установке, разработанной в Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь) [8]. Измерительный узел установки основывается на схеме ротационной вискозиметрии. Рабочая камера ограничивается боковыми стенками и двумя дисками. Диски имеют рифления для уменьшения эффекта скольжения исследуемого материала по их поверхностям. Установка позволяет задавать и контролировать в рабочей камере давление поджатия, температуру, скорость нижнего диска и контролировать величину крутящего момента, возникающего на верхнем диске.

На рисунке 3 приведены кривые течения (зависимости напряжения $\tau(P, \Delta T) = \tau_0(P, \Delta T) + \mu_0(P, \Delta T) \dot{\gamma}^n$ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$), полученные с высокой степенью приближения путем аппроксимации экспериментальных точек степенным законом:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 8,5 \cdot 10^4 (1 + 0,045P)(1 - 0,018\Delta T), \\ \mu_0 &= 1,4 \cdot 10^4 (1 + 0,035P) \exp(-0,0921\Delta T), \\ n &= 0,4, \quad \Delta T = T - T_0, \end{aligned}$$

где T — температура в эксперименте, T_0 — температура поступающего сырья.

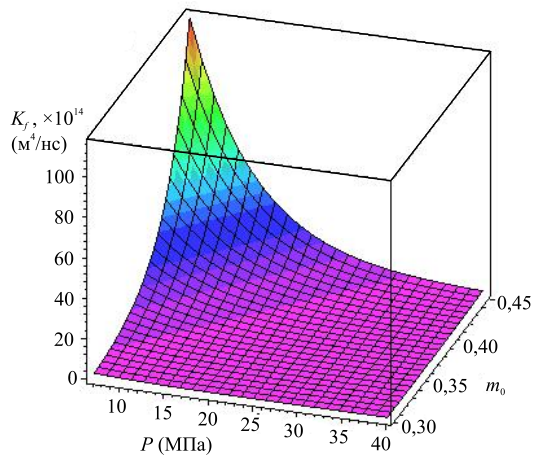


Рис. 4. Зависимость коэффициента фильтрации от давления и пористости сырья

При определении коэффициента фильтрации K_f и его связи с давлением P и пористостью m экструдата использовался метод, в основе которого лежит динамическое нагружение. Образец помещался в замкнутую цилиндрическую полость между поршнем, создающим давление, и проницаемым для жидкости дном. Для поддержания давления в циклическом режиме использовалась испытательная машина с программным управлением. В процессе эксперимента регистрировались во времени изменения давления, длины образца и временной промежуток снижения давления на цикле разгрузки, а также объем отжатой жидкости. По данным эксперимента определялся коэффициент фильтрации как функция пористости и уровня давления (подробнее метод представлен в [9]).

Зависимость коэффициента фильтрации (Рис. 4) от давления и пористости с хорошей степенью точности аппроксимируется выражением

$$K_f = 1,48 \cdot 10^{-3} \exp(-1,376 \cdot 10^{-7} P) \exp(27,2m).$$

3. Постановка задачи

Задача течения материала в винтовом экструдере ставится для «обращенного движения» (шнек неподвижен, а корпус вращается). Винтовой канал разворачивается на плоскость, и выделяется продольное срединное сечение. Нижняя граница полученного плоского канала остается неподвижной, а верхняя движется с заданной скоростью под углом к продольной оси. Продольная составляющая потока в этом случае является результатом тянущего движения стенки и встречного градиента давления, возникающего за счет сопротивления головки экструдера. Концевая часть верхней подвижной границы развернутого на плоскость канала представляет собой область контакта материала с зерной камерой, через которую происходит отжим масла. Высота канала H соответствует глубине нарезки шнека, ширина канала b — расстоянию между витками по нормали к винтовой линии, длина L — длине образующей винтовой линии в середине глубины нарезки [10–13].

В исходном сырье масло содержится в семядолях и движется совместно с клетчаткой. Под действием сжимающих деформаций разрушаются оболочки семядолей, и масло в каждом представительном объеме выдавливается в межзеренное пространство. Далее, под действием градиента давления свободное масло движется по закону Дарси со скоростью, отличающейся от скорости движения клетчатки. Источником масла является поступающее на вход экструдера сырье с заданным начальным содержанием связанного масла. Свободное масло в этот момент отсутствует.

Клетчатка и масло имеют практически одинаковую плотность, химически не реагируют между собой. Обе фракции представляются несжимаемыми средами. В то же время из-за отжима свободного масла за пределы канала сырье проявляет свойство сжимаемости, которое однозначно связано с фильтрационными свойствами пористой среды. Сила, действующая на клетчатку со стороны свободного масла, не учитывается, так как вязкость масла значительно меньше вязкости сырья. В силу же, действующей на свободное масло со стороны клетчатки, не принимается во внимание эффект, связанный с движением клетчатки относительно экструдера, так как скорость движения сырья значительно меньше скорости движения масла.

В общем случае система дифференциальных уравнений, описывающих процесс экструзионного отжима масла, включает:

– уравнения движения сырья с остаточным содержанием связанного масла

$$\rho_0 \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}; \quad (1)$$

– определяющие соотношения для маслосодержащего сырья

$$\boldsymbol{\sigma} = -PI + 2\mu \mathbf{D} + \lambda \mathbf{I}(\text{tr } \mathbf{D}), \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v}^T + \nabla \mathbf{v}); \quad (2)$$

– уравнение Дарси движения свободного масла в пористом сырье

$$\mathbf{w} = -K_f \nabla P_w; \quad (3)$$

– уравнение баланса энергии

$$\rho_0 C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T \right] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \Phi. \quad (4)$$

В (1)–(4) приняты обозначения: ρ_0 — плотность сырья; $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений в сырье; \mathbf{D} — симметричная часть градиента скорости; \mathbf{v} — вектор скорости сырья; \mathbf{w} — вектор скорости фильтрации масла; \mathbf{I} — единичный тензор; P — давление в сырье; P_w — давление в масле; μ — динамическая вязкость сырья; K_f — коэффициент фильтрации масла; T — искомое распределение температуры; C_p — теплоемкость сырья; λ — теплопроводность сырья; Φ — функция диссипации; верхним индексом «Т» показана операция транспонирования.

Поскольку камера проницаема только для свободного масла, поля давления в свободном масле и сырье не совпадают. Скорость изменения элементарного объема отжатого масла определяет скорость изменения элементарного объема сырья

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = -\nabla \cdot \mathbf{w}. \quad (5)$$

Комбинация уравнения (5) и уравнения Дарси (3) приводит к уравнению для нахождения поля давления для свободного масла

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot [K_f \nabla P_w]. \quad (6)$$

Двумерная стационарная краевая задача ставится в декартовой системе координат, при этом ось x направлена вдоль нижней непроницаемой стенки канала, а ось y — по его высоте.

Во входном сечении канала ($x=0, \forall y$) давление равняется атмосферному, которое принимается за отчетное: $P=0, P_w=0$. Температура поступающего сырья и корпуса считается заданной и составляет $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

В выходном сечении канала ($x=L, \forall y$) приложена распределенная нагрузка $P_0 = P_L(Q_L)$, действующая навстречу тянущему движению стенки. Нагрузка вычисляется как сопротивление экструзионной головки, где $P_L(Q_L)$ — расходно-напорная характеристика головки. Граничные условия по температуре в выходном сечении — это отсутствие теплового потока. На сплошной неподвижной стенке канала выполняются условия прилипания для сырья и условия непроницаемости для масла

$$\forall x, y = 0: v_x = 0; v_y = 0; w_y = 0 \rightarrow \frac{\partial P_w}{\partial y} = 0,$$

а на проницаемой подвижной верхней стенке — условия прилипания только для сырья и условия свободного проникновения масла

$$\forall x, y = H: v_x = v_0, v_y = 0, P_w = 0.$$

На выходе из зерновой камеры давление в масле заранее неизвестно и является искомым. Аналитическое автомодельное решение для него ищется в виде $P_w = P_m e^{kx} g(y)$, и условия на выходе из экструдера (как и в любой промежуточной точке $x \in [0, L]$) полностью определяются граничными условиями

$$\forall x, y = 0: \frac{\partial P_w}{\partial y} = 0, \forall x, y = H: P_w = 0.$$

При итерационном численном решении для замыкания краевой задачи используется условие баланса расходов масла

$$\int_0^H m_0 v_x dy \Big|_{x=0} - \int_0^H m_L v_x dy \Big|_{x=L} = \int_0^L w_y dx \Big|_{y=H},$$

где m_0, m_L — пористости сырья на входе и выходе канала.

Уравнения (1)–(6) с граничными условиями представляют собой замкнутую краевую задачу.

4. Аналитическое решение

Экспериментальные данные [1] и аналитические решения [14] показывают, что распределение давления по длине экструдера при зависимости вязкости от давления обычно представляет собой экспоненциально возрастающую функцию. В работе [15] приводится аналитическое решение задачи экструзионного отжима масла из семян рапса, в которой приняты следующие предположения:

- вследствие большой относительной длины канала зерновой камеры единственная ненулевая продольная компонента скорости сырья, благодаря сжимаемости из-за оттока свободного масла за границу расчетной области, является функцией двух координат $v_x(x, y)$;
- давление сырья $P(x)$ одномерное (но из-за нелинейности реологических свойств может быть нелинейным);
- плотности свободного масла и сырья почти одинаковы и при моделировании считаются равными;
- скорость объемного сжатия пропорциональна давлению в перерабатываемом сырье с обратным знаком $\partial v_x / \partial x = -\chi P$ [19], где коэффициент χ определяется фильтрационными свойствами пористого сырья;
- давление в масле $P_w(x, y)$ двумерно и отличается от давления сырья, а вектор скорости фильтрации масла имеет две компоненты: $w_x(x, y)$ и $w_y(x, y)$;
- теплофизические свойства, динамическая вязкость сырья и коэффициент фильтрации полагаются постоянными.
- не принимаются во внимание силы межфазного взаимодействия, зависящие от вязкости свободного масла, которая значительно меньше вязкости сырья.

Управляющая система уравнений в рамках принятых допущений имеет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}, \quad (7)$$

$$K_f \left(\frac{\partial^2 P_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_w}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\chi P. \quad (8)$$

Движение масла через пористую среду определяется по закону Дарси:

$$w_x = -K_f \frac{\partial P_w}{\partial x}, \quad w_y = -K_f \frac{\partial P_w}{\partial y}. \quad (9)$$

При заданном распределении давления в сырье система уравнений (7), (8) совместно с граничными условиями представляет собой замкнутую краевую задачу для независимых переменных P_w, v_x . Зависимые переменные w_x, w_y находятся из уравнений (9).

В результате интегрирования системы уравнений (7), (8) при заданном в виде $P(x) = P_{in} e^{kx}$ [15] распределении давления в сырье (здесь P_{in} — давление на входе в зерновую камеру), получено:

- распределение давления для масла:

$$P_w = P_{in} e^{kx} \cos(\pi y / (2H)); \quad (11)$$

- распределения скоростей фильтрации масла:

$$w_x = -K_f \frac{\partial P_w}{\partial x} = -K_f P_{in} k \cos(\pi y / (2H)) e^{kx}, \quad (12)$$

$$w_y = -K_f \frac{\partial P_w}{\partial y} = \frac{K_f P_{in} \pi \sin(\pi y / (2H)) e^{kx}}{2H}; \quad (13)$$

- объемный расход отжатого масла:

$$Q_y^w = b \int_0^x w_y(x, y) dx \Big|_{y=H} = \frac{\pi b}{2kH} K_f P_{in} e^{kx}. \quad (14)$$

Изменение объемной доли связанного масла в перерабатываемом сырье (что для насыщенных пористых сред совпадает с пористостью) определялось из условия баланса массы

$$m = m_0 \exp(-kx/2) \cos(\pi y/(2H)),$$

где параметр автомодельности определяется выражением $k = \ln(P_0/P_m)/L$.

Полученное аналитическое решение удовлетворяет системе уравнений поставленной краевой задачи отжима масла из натурального сырья с фильтрацией жидкой фракции за границу расчетной области. Сравнение результатов вычисления распределений скорости отжима и давления для масла по длине канала экструдера с экспериментальными данными показало, что в то время как аналитическое решение предсказывает экспоненциальное возрастание и давления в масле, и скорости фильтрации по длине канала зерновой камеры, замеренное в реальном процессе отжима распределение массового выхода отжатого масла по длине зерновой камеры имеет максимум [1], что связано с существенно нелинейными зависимостями вязкости и проницаемости от давления в перерабатываемом сырье [16, 17]. Решение краевой задачи с нелинейными свойствами может быть получено численно и является предметом дальнейшего исследования.

5. Численное моделирование

Построение квазитрехмерной (для трех компонент вектора скорости, зависящих от двух координат) математической модели процесса отжима масла и течения масла через пластически деформируемую пористую среду с оттоком его за границу расчетной области при экспериментально найденных нелинейных характеристиках материала базировалось на уравнениях баланса импульса массы, энергии и уравнении пьезопроводности. Разработан алгоритм и вычислительная программа, реализующая метод конечных элементов.

Согласно процедуре Галеркина краевая задача (1)–(7) в квазитрехмерной постановке преобразуется в полуслабую вариационную формулировку с естественными граничными условиями по напряжениям:

$$b \int_0^L \int_0^H \left\{ \rho u_x \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial u_x}{\partial x} P + \eta \left[2 \frac{\partial u_x}{\partial x} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right\} = b F_x \int_0^L u_x dy, \quad (15)$$

$$b \int_0^L \int_0^H \left\{ \rho u_y \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \frac{\partial u_y}{\partial y} P + \eta \left[2 \frac{\partial u_y}{\partial y} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] + \chi \frac{\partial u_y}{\partial y} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right\} = 0, \quad (16)$$

$$b \int_0^L \int_0^H \left\{ \rho u_z \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \eta \left[\frac{\partial u_z}{\partial x} \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \frac{\partial v_z}{\partial y} \right] \right\} dxdy = \int_0^L F_z \int_0^H u_z dxdy, \quad (17)$$

$$b \int_0^L \int_0^H \left\{ \varphi \left(\frac{\partial P_w}{\partial x} + \frac{\partial P_w}{\partial y} \right) \right\} dxdy = -b \int_0^L \int_0^H \chi P dxdy, \quad (18)$$

$$b \int_0^L \int_0^H \left\{ \varphi C_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \lambda \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} dxdy = b \int_0^L \int_0^H \Phi dxdy, \quad (19)$$

где u_x , u_y , u_z , φ — весовые функции; $\eta = \frac{\tau_0(P)}{I_2} + \mu_0(P)I_2^{n-1}$ — эффективная вязкость (I_2 — второй инвариант тензора скоростей деформаций); F_x , F_z — компоненты приложенной распределенной нагрузки; Φ — функция диссипации.

Решение полученной нелинейной системы сводится к решению последовательности линеаризованных задач, в которых нелинейные члены рассчитываются по результатам предыдущих итераций. Сначала решается линеаризованная задача течения с постоянной вязкостью. Затем, с учетом найденных на предыдущей итерации компонент вектора скорости, рассматривается задача конвективного теплопереноса. Далее по найденному температурному полю корректируется эффективная вязкость, а по полю скоростей вычисляются конвективные члены в температурной задаче. Процесс повторяется до достижения заданной точности вычислений.

На каждой итерации дискретизация уравнений линеаризованных задач производится с привлечением математического аппарата метода конечных элементов с линейной аппроксимацией компонент вектора скорости и температуры в элементе; давление принимается кусочно-постоянным в пределах четырехугольников, состоящих из двух треугольных элементов. Контроль сходимости итерационного процесса осуществляется по эффективной вязкости.

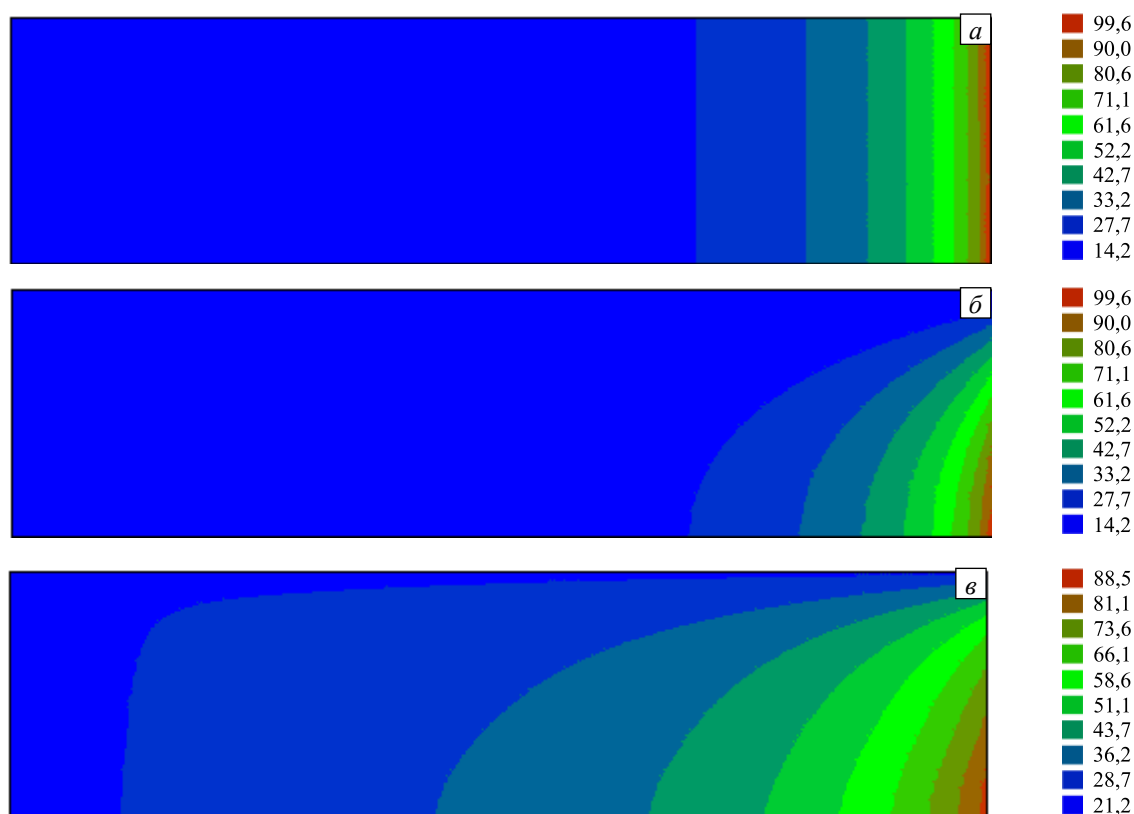


Рис. 5. Изополосы давления в сырье (а), масле (б); изополосы температуры в сырье (в)

Граничные условия первого рода для скорости и температуры удовлетворяются непосредственно присвоением заданных значений соответствующим переменным в граничных узлах.

В результате численного решения получены поля давлений в сырье (Рис. 5а) и масле (Рис. 5б), распределения температуры (Рис. 5в), распределение давления в сырье по длине винтового канала (Рис. 6а) и скорости отжима масла (Рис. 6б).

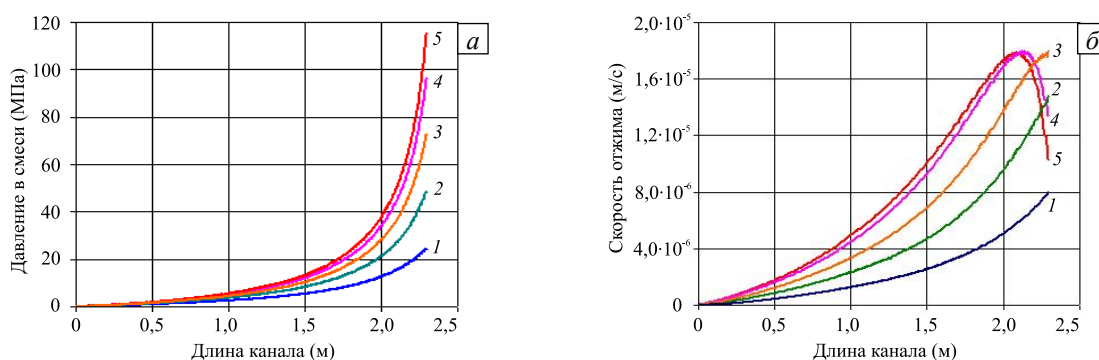


Рис. 6. Распределение давления в сырье по длине винтового канала (а) и скорости отжима масла (б) при сопротивлениях головки в диапазоне $(1 \div 12) \times 10^7$ Па (линии 1–5)

6. Заключение

Проведены экспериментальные исследования реологических и фильтрационных свойств экструдата, полученного из семян рапса, содержащих в своих семядолях до 45% масла. Получены выражения для эффективной вязкости как функции скорости деформации, а также соотношения, связывающие коэффициент фильтрации с приложенным давлением и объемной долей остаточного масла. С учетом экспериментально найденных реологических и фильтрационных зависимостей разработан алгоритм численного решения задачи методом конечных элементов. Получены поля давлений сырья и масла, скорости движения сырья и фильтрационных потоков в винтовом канале экструдера, снабженного зерной камерой.

Анализ решения показал, что изменение пористости материала, в рамках принятых в данной модели допущений, играет важную роль в процессе отжима и при высоких значениях давления экструзии приводит к уменьшению объема отжатого масла. Также было обнаружено снижение величины расхода отжатого масла после превышения определенного значения внешней нагрузки. Исследование влияния увеличения вязкости пористого сырья на отток масла при повышении давления показало, что рассчитанные значения расхода масла оказываются ниже, чем в случае постоянной вязкости. Показано, что рост давления в сырье приводит к уменьшению скорости отжима масла, а распределение скорости отжима масла по длине зерновой камеры имеет максимум, что совпадает с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-96006-р).

Литература

1. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 478 с.
2. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. – М.: Недра, 1970. – 336 с.
3. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах, – М.: Недра, 1984, 208 с.
4. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. – М.: Недра, 1996. – 446 с.
5. Костерин А.В., Березинский Д.А. Насыщенно-ненасыщенные состояния деформируемых пористых сред // ДАН. – 1998. – Т. 358, № 3. – С. 343-345.
6. Бармин А.А., Мельник О.Э. Скульский О.И. Модель стационарного неизотермического течения магмы в канале вулкана с учетом скольжения на границе // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 354-358. DOI
7. Славнов Е.В. Способ экструзии биопродукта и экструдер (варианты). Патент РФ № 2385665 от 10.04.2010.
8. 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. 16-18.
9. 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. (English version DOI).
10. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 628 с.
11. Рауендаль К. Экструзия полимеров. – СПб: Профессия, 2006. – 768 с.
12. Скульский О.И. Численное моделирование одночервячных экструдеров // Пластические массы. – 1997. – № 8. – С. 39-43.
13. Скульский О.И., Славнов Е.В. Диффузия влаги при экструзионной переработке увлажненного зерна // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2008. – Т. 1, № 2. – С. 74-80. DOI
14. Кузнецова Ю.Л., Скульский О.И., Ситникова М.А. Течение смазочного материала в напорных насадках при волочении в режиме гидродинамического трения // Трение и износ. – 2007. – Т. 28, № 4. – С. 375-380.
15. Анферов С.Д., Скульский О.И. Моделирование фильтрации жидкости через пластически деформируемую пористую среду в процессе экструзионного отжима // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – № 2. – С. 29-47.
16. Славнов Е.В., Шакиров Н.В., Судаков А.И., Бузмакова С.В. Определение эффективного коэффициента фильтрации двухкомпонентной смеси // Аграрный вестник Урала. – 2008. – № 9. – С. 58-60.
17. Славнов Е.В., Петров И.А. Изменение вязкости экструдата рапса в процессе отжима масла // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 6. – С. 42-44.
18. Славнов Е.В. Изменение проницаемости масличных культур в процессе отжима масла на примере экструдата рапса // Доклады Россельхозакадемии. – 2013. – № 3. – С. 58-60. DOI
19. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. – Киев: Наукова думка, 1972. – 152 с.

References

1. Beloborodov V.V. *Osnovnye protsessy proizvodstva rastitel'nykh masel* [Basic processes of vegetable oil production]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1966. 478 p.
2. Nikolaevskii V.N., Basniev K.S., Gorbunov A.T., Zotov G.A. *Mekhanika nasyshchennykh poristykh sred* [Mechanics of saturated porous media]. Moscow: Nedra, 1970. 336 p.
3. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Dvizhenie zhidkostej i gazov v prirodnykh plastakh* [The motion of fluids and gases in natural strata]. Moscow: Nedra, 1984. 208 p.
4. Nikolaevskii V.N. *Geomekhanika i fluiodinamika* [Geomechanics and fluid dynamics]. Moscow: Nedra, 1996. 446 p.
5. Kosterin A.V., Berezinskii D.A. Nasyshchenno-nenasyschennyye sostoianiya deformiruemykh poristykh sred [Saturated-unsaturated state of deformable porous media]. *Doklady Physics*, 1998, vol. 358, no. 3, pp. 343-345.
6. Barmin A.A., Melnik O.E. Skulskiy O.I. Model of a non-isothermal stationary magma flow in a volcanic conduit taking into account slip boundary conditions at the conduit wall. *Vycisl. meh. splos. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 354-358. DOI
7. Slavnov E.V. *Bioproduct extrusion technique and extruder (variants)*. RF Patent No. 2385665, 10 April 2010.
8. Slavnov E.V., Petrov I.A., Anferov S.D. Changes in the viscosity of rapeseed extrudates with pressure in oil extraction. *Agrarnyj vestnik Urala – Agrarian Bulletin of the Urals*, 2011, no. 10, pp. 16-18.
9. Slavnov E.V., Petrov I.A. Method of determining the filtration properties of oil-bearing crops in the process of their pressing by the example of rape-oil extrusion. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 4, pp. 888-892. DOI
10. Tadmor Z., Gogos C.G. *Principles of polymer processing*. Wiley-International, New York, 1979. 961 p.

11. Rauwendaal Ch. *Polymer extrusion*. Hanser Gardner Publisher, 2001. 804 p.
12. Skul'skiy O.I. Numerical modeling of single-screw extruders. *International Polymer Science and Technology*, 1998, vol. 25, no. 4, pp. 91-95).
13. Skul'skiy O.I., Slavnov E.V. Moisture diffusion in the process of extrusion of moistened coarse-broken grains. *Vycisl. meh. splos. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2008, vol. 1, no. 2, pp. 74-80. DOI
14. Kuznetsova J.L., Skul'skii O.I., Sitnikova M.A. Lubricant flow in pressure pipes during wire drawing in a hydrodynamic friction regime. *Journal of Friction and Wear*, 2007, vol. 28, no. 4, pp. 359-363.
15. Anferov S.D., Skul'skiy O.I. Modelling of fluid filtration through plastically deformed porous medium in the process of extrusion. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2014, no. 2, pp. 29-47.
16. Slavnov E.V., Shakirov N.V., Sudakov A.I., Buzmakova S.V. Opredelenie effektivnogo koeffitsienta fil'tratsii dvukhkomponentnoj smesi [Determination of effective filtering coefficient for binary mixture]. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2008, no. 9, pp. 58-60.
17. Slavnov E.V., Petrov I.A. Changes in the viscosity of rapeseed extrudates during mechanical oil extraction. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2011, no. 6, pp. 42-44.
18. Slavnov E.V. Changes in the permeability of oilseed crops during the process of oil extraction from rape extrudates. *Russian Agricultural Sciences*, 2013, vol. 39, no. 4, pp. 367-369. DOI
19. Skorokhod V.V. *Reologicheskie osnovy teorii spekaniya* [Rheological principles of sintering theory]. Kiev: Naukova dumka, 1972. 152 p.

Поступила в редакцию 21.11.2014; опубликована в электронном виде 30.06.2015

Сведения об авторах

Анферов Сергей Дмитриевич, асс., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); 614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: anferov@icmm.ru

Скульский Олег Иванович, дтн, вед. нс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН); 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; e-mail: skul@icmm.ru

Славнов Евгений Владимирович, дтн, проф., зав. лаб., ИМСС УрО РАН; e-mail: slavnov@icmm.ru