

DOI: 10.7242/1999-6691/2013.6.3.31  
УДК 532.5+678

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ШНЕК-ПРЕССОВОГО ОТЖИМА КАК СОВОКУПНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ СМЕСИ И ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ СКВОЗЬ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

И.А. Петров<sup>1</sup>, Е.В. Славнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УРО РАН, Пермь, Россия

В терминах интегральных характеристик построена модель шнек-прессового отжима, учитывающая связанность задач течения вязкой смеси и фильтрации образующейся жидкой компоненты через массив перерабатываемого материала. Построен план численного эксперимента в соответствии с методом ортогонального центрального композиционного планирования. С использованием экспериментально полученной зависимости коэффициента проницаемости экструдата рапса от массовой концентрации выжимаемого масла и уровня давления в экструдере проведено моделирование отжима при различных значениях параметров шнек-пресса. Найдены коэффициенты уравнений регрессии для функций часового массового выхода масла, удельной энергии и остаточной массовой концентрации масла, определена степень влияния геометрических параметров и скорости вращения шнека на указанные величины.

*Ключевые слова:* шнек-пресс, отжим, экструзия, коэффициент проницаемости, рапс, рапсовое масло, математическая модель

## SIMULATION OF SCREW-PRESS OIL EXTRACTION AS A SET OF TWO PROCESSES: INCOMPRESSIBLE VISCOUS MIXTURE FLOW AND FLUID FILTRATION IN POROUS MEDIUM

I.A. Petrov<sup>1</sup> and E.V. Slavnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

<sup>2</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

A model of oil extraction with a screw extruder has been developed in terms of integral characteristics. The model considers the process of oil extraction as a set of two processes: the flow of viscous mixture and the filtration of the liquid component in the processed material. The design of numerical experiment has been worked out in accordance with an orthogonal central composite design. Simulation of rapeseed oil extraction has been carried out for different parameters of the screw extruder using the experimentally obtained dependence of the rape permeability coefficient on oil concentration and pressure level of the extruder. The coefficients of regression equations have been found for the functions of oil output, specific energy and residual mass oil concentration. The effects of the geometrical parameters of the extruder and the rotational speed of the screw on the values examined have been estimated.

*Key words:* screw extrusion machine, extraction, extrusion, permeability coefficient, rape, rape oil, mathematical model

### 1. Введение

Технология шнек-прессового отжима широко используется в переработке масличных культур. При этом число теоретических моделей, изображающих этот процесс, крайне невелико [1–4], ввиду чего выбор оптимальных режимов производится исключительно исходя из имеющегося опыта использования шнек-прессового отжима и на основании экспериментальных данных. Актуальные результаты исследований в данном направлении можно найти в работах [5–8].

Малое количество адекватных теоретических моделей во многом обусловлено сложностью задачи, естественным подходом при решении которой является рассмотрение процесса как течения двухкомпонентной вязкой сжимаемой среды. При таком подходе главную трудность составляет учет взаимодействия между компонентами при их относительном движении и отводе жидкой компоненты (масла) из области течения смеси. Один из способов преодоления возникающих сложностей заключается в рассмотрении отжима как процесса фильтрации жидкой компоненты смеси сквозь пористую среду, который подчиняется закону Дарси. Подобное решение уже нашло отражение в некоторых математических моделях, описывающих процессы, похожие на отжим. Отметим, например, модель «миграции» жидкой фазы в фармацевтических пастах при поршневой экструзии [9]. С помощью этой модели вычисляется коэффициент проницаемости матрикса пасты исходя из результатов опытов по установлению содержания жидкой фазы. Дальнейшее развитие модель нашла в статьях [10, 11]. Стоит оговориться, что приведенный пример относится к плунжерной экструзии и не осложнен выходом жидкой компоненты за границы расчетной области задачи.

В данной статье предлагается модель, представляющая шнек-прессовый отжим в интегральных характеристиках и учитывающая изменения массовой концентрации жидкости и коэффициента проницаемости, неизотермичность процесса и уход жидкой компоненты за стенки канала. Приводятся результаты моделирования отжима рапса с использованием экспериментально полученных данных о коэффициенте проницаемости экструдата рапса [12, 13] и результатов вискозиметрии экструдата при различных скоростях сдвига и массовых концентрациях масла [14].

## 2. Математическая модель отжима

Представим отжим как совокупность процесса установившегося одномерного течения вязкой смеси и процесса фильтрации масла. Примем, что перерабатываемый материал является смесью двух несжимаемых компонент: масла и клетчатки. Поверхность цилиндра зерновой камеры, где происходит отжим масла с выходом за границу канала шнека, считаем проницаемой для масла и непроницаемой для смеси.

Рассмотрим установившееся течение смеси в экструдере. Обратим движение, то есть предположим, что шнек неподвижен, а корпус вращается, и развернем шнек на плоскость, заменив таким образом течение смеси в экструдере на течение в прямом канале прямоугольного поперечного сечения с подвижной верхней стенкой BCGF (Рис. 1). Подробное описание этого приема содержится в работах [15, 16].

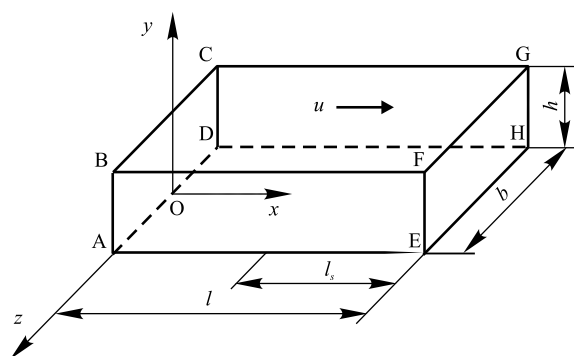


Рис. 1. Развернутый канал шнека

Введем прямоугольную декартову систему координат, связанную с развернутым каналом шнека. Направим ось  $Ox$  по оси канала, ось  $Oy$  перпендикулярно плоскости разворота, ось  $Oz$  перпендикулярно образующей реборды DCGH. Обозначим:  $x$  — координата по оси  $Ox$ ;  $Q(x)$  — секундный объемный расход смеси через поперечное сечение канала в точке с координатой  $x$ ;  $Q_k$  — расход ненапорного течения;  $Q_p(x)$  — расход напорного течения;  $P(x)$  — давление в смеси;  $l$  — длина развернутого канала шнек-пресса;  $l_s$  — длина зерновой камеры. Учитывая, что фильтрационное

движение масла направлено перпендикулярно оси канала, течение совокупности компонент можно полагать течением одной жидкости [17].

Представим течение смеси в канале шнека как суперпозицию ненапорного течения, вызванного движением верхней стенки канала, и противоположного ему напорного течения, обусловленного противодавлением со стороны выходного устройства экструдера — головки, представляющей собой трубу с узким каналом определенной формы [15]. Будем считать смесь ньютоновской жидкостью с характерной вязкостью, соответствующей скорости сдвига куэттовского течения. Это приближение допустимо, так как при напорных течениях в экструдере на технологически приемлемых режимах (при  $Q = 0,80 \div 0,95 Q_k$ ) средняя по сечению скорость сдвига близка к скорости сдвига куэттовского течения.

Как известно, величина расхода ненапорного течения равняется интегралу от куэттовского профиля скорости в среднем по высоте и ширине канала сечения. Интегрирование поперек канала состоит в умножении интеграла по высоте на величину  $b$  и поправочный коэффициент  $c_{bh}$ , зависящий от отношения ширины и высоты канала, с помощью которого учитывается прилипание жидкости к боковым стенкам канала. В итоге расход составляет:  $Q_k = c_{bh} u h b / 2$ , где  $u = (\omega d / 2) \cos \varphi$  — проекция скорости стенки на продольную ось развернутого канала;  $h$  — глубина канала;  $b$  — ширина канала;  $\omega$  — угловая скорость вращения шнека;  $d$  — диаметр шнека;  $\varphi$  — угол нарезки шнека. Вычисление коэффициента  $c_{bh}$  для конкретного канала производится с помощью зависимости  $c_{bh} = 4 \cdot 10^{-5} (b/h)^5 - 0,0014 (b/h)^4 + 0,0206 (b/h)^3 - 0,1478 (b/h)^2 + 0,5346 b/h + 0,095$ , которая аппроксимирует результаты моделирования в пакете ANSYS CFX течения линейной жидкости в прямой прямоугольной трубе с подвижной верхней стенкой при нулевом градиенте давления и различных отношениях ширины и высоты трубы.

Расход напорного течения определяется градиентом давления в канале и связан с ним приближенной формулой, известной из гидравлики [18]:  $Q_p(x) = -\frac{3}{40\mu(x)} \frac{h^3 b^3}{h^2 + b^2} \frac{dP(x)}{dx}$ , где  $\mu(x)$  — динамическая вязкость смеси. Учтем, что расход смеси равен алгебраической сумме расходов ненапорного и напорного течений:  $Q(x) = \frac{c_{bh} u h b}{2} - \frac{3}{40\mu(x)} \frac{h^3 b^3}{h^2 + b^2} \frac{dP(x)}{dx}$ . Отсюда имеем градиент давления

$$\frac{dP(x)}{dx} = \frac{20}{3} c_{bh} \mu(x) u \frac{h^2 + b^2}{h^2 b^2} - \frac{40}{3} \mu(x) \frac{h^2 + b^2}{h^3 b^3} Q(x). \quad (1)$$

Обозначим для смеси через  $\rho(x)$  — плотность,  $c_p$  — теплоемкость и  $T(x)$  — среднемассовую температуру. Выделим в канале элемент малой длины  $\delta$ . Пренебрегая теплопроводностью по сравнению с конвективным теплопереносом, запишем разницу величин тепловых потоков через сечения, ограничивающие элемент слева и справа и пересекающие ось  $Ox$  в точках с координатами  $x_2 = x + \delta/2$  и  $x_1 = x - \delta/2$ :

$$\rho(x_2)c_p Q(x_2)T(x_2) - \rho(x_1)c_p Q(x_1)T(x_1) \approx \frac{d[\rho(x)c_p Q(x)T(x)]}{dx} \delta. \quad (2)$$

В выделенном элементе происходит диссипативное выделение тепла мощностью  $E_d(x)$ , теплообмен мощностью  $E_w(x)$  со стенкой и утечка тепла мощностью  $E_l(x)$  через верхнюю стенку.

Оценим мощность диссипации. Рассмотрим течение в среднем сечении канала как течение несжимаемой жидкости в плоской щели между двумя параллельными плоскостями. Поле скорости такого течения и объемная плотность мощности диссипации определяются, соответственно, уравнениями:

$$v_x(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dP(x)}{dx} (y^2 - hy) + \frac{u}{h} y, \quad (3)$$

$$e_d(y) = \mu \left( \frac{\partial v_x(y)}{\partial y} \right)^2. \quad (4)$$

Подставим выражение для скорости (3) в уравнение (4) и проинтегрируем по высоте канала. Умножая получившийся интеграл на ширину и длину рассматриваемого элемента, оценим мощность диссипации в нем:

$$E_d(x) = \left[ \frac{h^3}{12\mu(x)} \left( \frac{dP(x)}{dx} \right)^2 + \frac{\mu(x)u^2}{h} \right] b\delta. \quad (5)$$

Имея в виду, что среднемассовая температура смеси  $T(x)$  отличается от температуры верхней стенки канала  $T_w(x)$ , зададим теплообмен смеси с корпусом шнека по поверхности  $BCGF$  в виде условия

$$E_w(x) = \alpha [T_w(x) - T(x)] b\delta, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи.

В процессе отжима через верхнюю грань выделенного элемента канала происходит вытекание масла с некоторой скоростью  $v_f(x)$ . Введем величину интенсивности отжима:  $q(x) = v_f(x)b$ . Количество теплоты, проходящее за единицу времени через верхнюю грань выделенного элемента канала, равняется

$$E_l(x) = -\rho_f c_{pf} T(x) q(x) \delta, \quad (7)$$

где  $\rho_f$  — плотность масла;  $c_{pf}$  — теплоемкость масла. Приравнивая правую часть (2) к сумме правых частей выражений (5)–(7) и сокращая на  $\delta$ , получим уравнение баланса тепла в канале

$$\frac{d[\rho(x)c_p Q(x)T(x)]}{dx} = \frac{h^3 b}{12\mu(x)} \left( \frac{dP(x)}{dx} \right)^2 + \frac{\mu(x)u^2 b}{h} + \alpha (T_w(x) - T(x)) b - \rho_f c_{pf} T(x) q(x). \quad (8)$$

Введем величины секундных объемных расходов компонент смеси:  $Q_f(x)$  — расход масла;  $Q_h$  — расход клетчатки, постоянный по длине канала. Так как принято, что в проекции на ось развернутого канала поля скоростей компонент смеси одинаковы, то справедливы выражения

$$Q(x) = Q_h + Q_f(x), \quad (9)$$

$$C_v(x) = \frac{Q_f(x)}{Q(x)}, \quad (10)$$

$$C_m(x) = \frac{\rho_f Q_f(x)}{\rho_f Q_f(x) + \rho_h Q_h}, \quad (11)$$

$$\rho(x) = \frac{\rho_h Q_h + \rho_f Q_f(x)}{Q(x)}, \quad (12)$$

где  $C_v(x)$  — объемная концентрация масла;  $C_m(x)$  — массовая концентрация масла;  $\rho_h$  — плотность клетчатки.

Рассмотрим процесс фильтрации масла сквозь массив смеси с выходом через проницаемую стенку, когда  $x \geq l_s$  (напомним, что при  $x < l_s$  верхняя стенка непроницаема для масла и отжим масла на этом участке не происходит). При экструзионном отжиге давление в масле  $P_f = P_f(x, y)$  не совпадает с давлением смеси. Задача определения давления в масле решена в [19]. Комбинация уравнения сохранения и уравнения Дарси в [19] приводит к уравнению, из которого находится поле давления для масла

$$K_f \left( \left( \frac{\partial^2 P_f(x, y)}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 P_f(x, y)}{\partial y^2} \right) \right) = F(x), \quad (13)$$

где  $F(x)$  — массовые источники масла, распределенные по длине канала;  $k_f$  — эффективный коэффициент фильтрации.

Приняв допущение, что на непроницаемой стенке давление в масле равняется давлению в смеси, а на проницаемой стенке оно нулевое, будем искать его распределение в канале в виде  $P_f(x, y) = P(x)G(y)$ . На исследуемом участке полагаем линейное распределение давления в смеси  $P(x) = nx + m$ . После подстановки  $P_f(x, y)$  в (13) получаем дифференциальное уравнение второго порядка относительно величины  $G(y)$ :  $\partial^2 G(y)/\partial y^2 = F(x)/[k_f P(x)]$ . Интегрирование этого уравнения дает  $G(y) = F(x)y^2/[2k_f P(x)] + c_1 y + c_2$ . Константы интегрирования можно найти из следующих граничных условий для скорости фильтрации: из-за отсутствия фильтрации на нижней стенке  $dG(y)/dy = F(x)y/[k_f P(x)] + C_1$ ,  $[dG(y)/dy]_{y=0} = 0$ ,  $C_1 = 0$ ; вследствие проницаемости для масла верхней стенки  $G(y)|_{y=h} = 0$ ,  $C_2 = -F(x)h^2/[2k_f P(x)]$ . В результате для величины  $G(y)$  имеет место выражение  $G(y) = (y^2 - h^2)/h^2$ .

Определив давление  $P_f(x, y)$  и подставив его в уравнение Дарси  $v_f = -k_f [\partial P_f(x, y)/\partial y]_{y=h}$ , найдем скорость вытекания масла на проницаемой стенке:

$$v_f = \begin{cases} k_f \frac{2P(x)}{h}, & x \geq l - l_s; \\ 0, & x < l - l_s. \end{cases} \quad (14)$$

Умножив (14) на ширину канала, получим выражение для величины интенсивности отжима масла:

$$q(x) = \begin{cases} k_f \frac{2P(x)}{h} b, & x \geq l - l_s; \\ 0, & x < l - l_s. \end{cases} \quad (15)$$

Вытекание масла с интенсивностью  $q(x)$  приводит к уменьшению расхода масла, а согласно выражению (9), и расхода смеси по длине канала

$$\frac{dQ_f(x)}{dx} = -q(x), \quad (16)$$

$$\frac{dQ(x)}{dx} = -q(x). \quad (17)$$

Выражения (1), (8), (11), (12), (15), (17) образуют систему модельных уравнений с граничными условиями  $Q(0) = Q_0$ ,  $P(0) = P_0$ ,  $T(0) = T_0$ ,  $C_m(0) = C_{m0}$ ,  $T_w(x) = f(x)$ , которая должна быть дополнена уравнениями для вязкости смеси и эффективного коэффициента фильтрации.

Авторами экспериментально определено изменение коэффициента фильтрации экструдата рапса в процессе отжима масла. Установлено, что изменение значений массовой концентрации в узком диапазоне (0,45 ÷ 0,23) приводит к уменьшению коэффициента фильтрации на полтора-два десятичных порядка. Найдено аппроксимирующее выражение, описывающее зависимость коэффициента фильтрации от давления в смеси и массовой концентрации масла [8]

$$k_f(x) = 2 \cdot 10^{-14} e^{a_2 P^2(x) + a_1 P(x) + a_0 + C_m(x)[b_2 P^2(x) + b_1 P(x) + b_0]}.$$

Принято, что вязкость смеси является функцией температуры, концентрации масла и скорости сдвига.

Построены кривые течения экструдата рапса для разных массовых концентраций масла при температуре 25°, 50° и 75°С [9]. Оказалось, что при температурах 25° и 50°С массовая концентрация масла, лежащая в диапазоне 0,446 ÷ 0,234, не оказывает существенного влияния на вязкие свойства экструдата. В выбранном диапазоне параметров их можно описать степенным законом  $\mu = 70000 \cdot \dot{\gamma}^{-0,825}$  Н·с/м<sup>2</sup> при 25°С и  $\mu = 38000 \cdot \dot{\gamma}^{-0,643}$  Н·с/м<sup>2</sup> при 50°С. При температуре 75°С кривые течения имеют вид  $\mu = 11300 \cdot C_m^{-0,84} \cdot \dot{\gamma}^{-n}$  Н·с/м<sup>2</sup>, где  $n$  — показатель нелинейности, принимающий значения 0,64, 0,67 и 0,69 при массовой доле масла 0,446, 0,347 и 0,234 соответственно. Вязкость смеси выбирается по характерной скорости сдвига, которая, как было сказано выше, близка к скорости сдвига куэттовского течения.

Как пример на рисунке 2 представлены результаты решения задачи распределения давления и выхода масла для шнека диаметром 0,045 м и длиной шнека 0,5 м и зерновой камеры длиной 0,25 м. Из рисунка видно, что распределение давления по каналу зерновой камеры близко к линейному. В результате изменения проницаемости экструдата выход масла, интенсивный на начальном участке зерновой камеры, в дальнейшем существенно уменьшается.

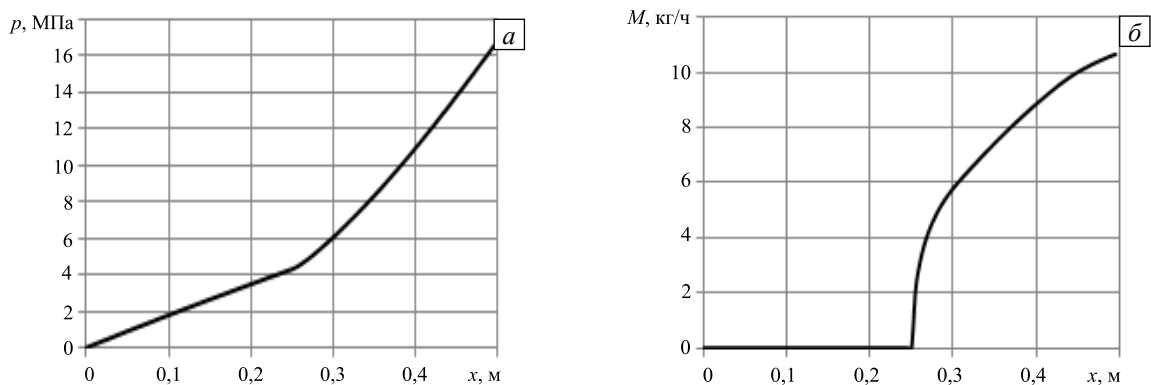


Рис. 2. Распределение давления в смеси (а) и выход масла (б) по длине шнека

Для оценки эффективности отжима введем величины:  $M(x)$  — часовой массовый выход масла с участка канала шнека длиной от 0 до  $x$ ;  $E_\Sigma(x)$  — суммарная энергия, расходуемая на участке длиной от 0 до  $x$  за час работы;  $E_\eta(x)$  — удельная энергия, то есть количество энергии, расходуемой на получение килограмма масла с участка канала шнека длиной от 0 до  $x$ . Введенные величины назовем выходными параметрами или показателями эффективности процесса и будем рассчитывать их по формулам:

$$M(x) = 3600 \rho_f \int_0^x q(x) dx, \quad (18)$$

$$E_\Sigma(x) = 3600 \left( \int_0^x Q(x) dP(x) + \int_0^x \rho_f c_{pf} q(x) T(x) dx + \left| \int_0^x \alpha (T_w(x) - T(x)) dx \right| + \right. \\ \left. + \rho(x) c_p(x) T(x) Q(x) - \rho(0) c_p(0) T(0) Q(0) \right), \quad (19)$$

$$E_\eta(x) = \frac{E_\Sigma(x)}{M(x)}. \quad (20)$$

### 3. Моделирование отжима рапса

Шнек-пресс имеет конструктивные параметры, которые закладываются при его проектировании (геометрия, скорость вращения), а сам процесс отжима характеризуется технологическими параметрами (скорость вращения шнека, гидродинамическое сопротивление головки, распределение температуры по зонам корпуса), которые могут меняться в процессе работы.

Для оценки влияния основных геометрических параметров шнека и скорости его вращения на значения выходных параметров процесса проведено моделирование отжима рапса на шнек-прессах с разной геометрией и при различных скоростях сдвига; распределение температуры по зонам цилиндра не рассматривалось. Для каждого сочетания значений геометрических параметров и скорости сдвига модельные уравнения (1), (8), (11)–(13), (15)–(17) решались при значениях  $Q_0$  из интервала  $(0, 7Q_k, \dots, Q_k)$ .

Так как при решении задачи течения в шнеке задание объемного расхода смеси на входе однозначно определяет расход и давление смеси на выходе, изменение краевого условия для  $Q_0$  имеет те же последствия, что и предполагаемое изменение гидродинамического сопротивления головки.

Например, требуется найти сопротивление головки, обеспечивающее максимальный выход масла.

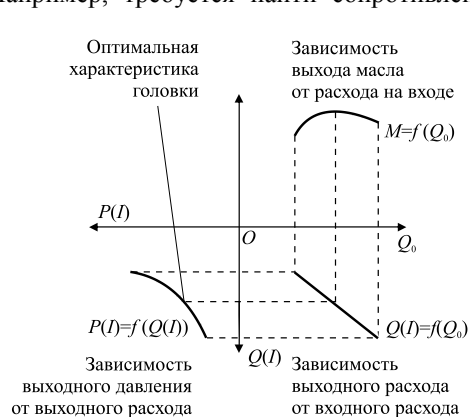


Рис. 3. Пример выбора гидродинамического сопротивления головки отвечающего максимальному выходу масла

Решение этой задачи иллюстрируется рисунком 3. Изменяя  $Q_0$  в заданном диапазоне до  $Q_k$ , установим зависимости часового массового выхода масла  $M$ , выходного давления смеси  $P(I)$  и выходного расхода смеси (расхода через головку)  $Q(I)$  от указанного параметра. Далее отыщем соответствие между точкой максимального выхода масла и значением выходного давления. Напорно-расходная характеристика головки должна пересекать характеристику  $P(I)$  в найденной точке.

Для построения зависимостей выходных параметров от геометрии шнека и скорости сдвига моделирование производилось согласно плану численного эксперимента с четырьмя факторами, построенного по методу ортогонального центрального композиционного планирования [20]. В таблице 1 приведены абсолютные значения параметров, соответствующих полному факторному эксперименту, и значения

в специальных — звездных, точках, дополняющих полный факторный эксперимент.

В качестве факторов были приняты:  $l$  — длина шнека;  $l_s/l$  — отношение длины зерновой камеры к длине шнека;  $d$  — диаметр шнека;  $\dot{\gamma} = u/h$  — скорость сдвига. Общими параметрами для всех шнеков являлись отношение шага нарезки к диаметру  $s/d = 1$  и отношение глубины нарезки канала к диаметру шнека  $h/d = 0,2$ . За функции отклика принимались наилучшие показатели эффективности процесса, полученные при расчете с изменяющимся краевым условием  $Q_0$ . В таблице 1 приняты следующие обозначения:  $X_i$  — обозначение фактора, где  $i$  — номер фактора;  $X_{il}$ ,  $X_{i0}$ ,  $X_{ih}$  — обозначение, соответственно, минимального, центрального и максимального кодированного значения  $i$ -го фактора

Таблица 1. Обозначения факторов и их фактические и кодированные значения

Фактор		$l, \text{ м}$	$l_s/l$	$d, \text{ м}$	$\dot{\gamma}, \text{ с}^{-1}$
Кодированное обозначение фактора	Обозначение в эксперименте	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
	Код				
$X_{il}$	–1	0,390	0,341	0,054	10,860
$X_{i0}$	0	0,975	0,562	0,075	25,000
$X_{ih}$	+1	1,311	0,784	0,096	39,140
$\Delta_i$	–	0,336	0,221	0,021	14,140
$X_{il}^*$	–1,41	0,500	0,250	0,045	5,000
$X_{ih}^*$	+1,41	1,450	0,875	0,105	45,000

в полном факторном эксперименте;  $\Delta_i$  — интервал варьирования  $i$ -го фактора;  $X_{il}^*$ ,  $X_{ih}^*$  — обозначение минимального и максимального кодированного значения  $i$ -го фактора в звездной точке.

Считалось, что вязкость смеси зависит от температуры, концентрации масла и скорости сдвига. Скорость сдвига определялась частотой вращения шнека, его диаметром и глубиной нарезки канала. Вязкость масла зависела от температуры по степенному закону. Принятые характеристики материала подробно описаны в статье [8].

#### 4. Результаты моделирования

Моделирование процесса при различных значениях  $Q_0$  и разных скоростях сдвига показало, что для всех рассматриваемых шнеков, вне зависимости от скорости сдвига, величина входного секундного

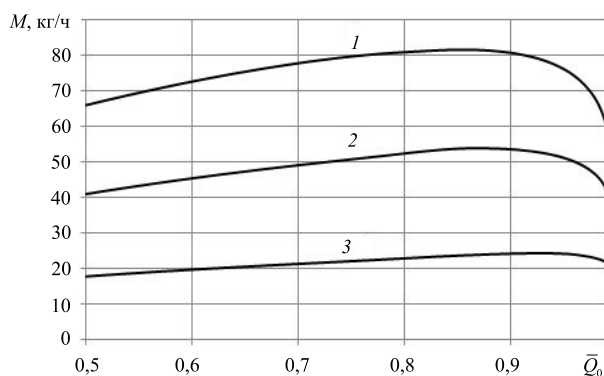


Рис. 4. Зависимость часового выхода масла от относительного расхода смеси на входе шнека диаметром 45 мм при различной скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , с<sup>-1</sup>: 45 (кривая 1); 25 (2) и 10 (3)

камеры выше по сравнению с таковой при отжиме при меньших расходах. При расходах, больших 95% расхода ненапорного течения, наблюдается уменьшение интенсивности отжима ввиду недостаточного давления. Для примера на рисунке 4 приведены графики зависимостей часового массового выхода от отношения расхода на входе к расходу ненапорного течения  $\bar{Q}_0 = Q_0/Q_k$  в шнеке диаметром 45 мм при различных скоростях сдвига.

В процессе моделирования для каждого сочетания геометрических параметров шнека и скорости сдвига осуществлялся выбор наилучших выходных параметров процесса отжима путем изменения краевого условия для  $Q_0$ . На основе полученных результатов построены уравнения поверхностей отклика для часового массового выхода масла  $y_M$ , удельной энергии  $y_E$  и остаточной концентрации  $y_c$  в виде:

$$y = b_1 X_1 + \dots + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_{34} X_3 X_4 + b_{11} X_1^2 + \dots + b_{44} X_4^2 + b_0. \quad (21)$$

В таблице 2 приведены значения коэффициентов выражения (21) для принятых функций отклика.

Рассмотрим коэффициенты уравнения регрессии для часового массового выхода масла  $y_M$ . Наибольшую величину имеют коэффициенты  $b_3$  и  $b_4$ , определяющие степень влияния диаметра шнека и скорости сдвига соответственно. Таким образом, в рассматриваемой области изменения параметров (см. Табл. 1) зависимость часового массового выхода масла от диаметра шнека и скорости сдвига, при фиксированных остальных параметрах, приближенно описывается линейной возрастающей функцией. Совместное действие указанных факторов также существенно сказывается на величине выхода масла. В данном случае справедливы вышеприведенные рассуждения о влиянии величины расхода смеси на входе шнека. Увеличение длины шнека и относительной длины зерновой камеры приводит к увеличению часового выхода масла, однако роль этих параметров менее значительна. Отметим, что коэффициенты  $b_{11}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{44}$  имеют значения, меньшие нуля, поэтому рост производительности шнек-пресса за счет увеличения одного из соответствующих параметров при фиксированных остальных ограничен. Например, при заданных геометрических параметрах шнека за наращиванием скорости его вращения свыше определенного значения не последует увеличение массового выхода масла; в данном случае это обуславливается ограниченностью поверхности отжима.

Перейдем к рассмотрению уравнения регрессии для величины удельной энергии  $y_E$ . Максимальные значения имеют коэффициенты  $b_1$  и  $b_4$ , следовательно, с увеличением длины и скорости вращения шнека

объемного расхода, соответствующая наибольшему часовому выходу масла и наименьшей удельной энергии, лежит в диапазоне от 85% до 95% расхода  $Q_k$  ненапорного течения. Данная закономерность обуславливается зависимостью коэффициента проницаемости рапса от концентрации и давления. В процессе отжима функция распределения концентрации масла по длине шнека имеет убывающий характер, и как следствие, уменьшается и величина коэффициента проницаемости, определяющая интенсивность отжима. При больших расходах смеси изменение концентрации происходит медленнее, что повышает коэффициент фильтрации, а следовательно, и количество отжатого масла. При этом величина остаточной концентрации масла на выходе из зерновой

Таблица 2. Коэффициенты уравнений регрессии

$y$	$y_M$	$y_E$	$y_C$
$b_1$	14,920	20,280	-0,024
$b_2$	6,480	-6,230	-0,006
$b_3$	52,700	-2,890	0,030
$b_4$	44,250	20,920	0,007
$b_{12}$	0,470	-0,370	-0,002
$b_{13}$	10,790	-5,060	0,010
$b_{14}$	8,756	0,870	0,000
$b_{23}$	3,930	-1,910	0,001
$b_{24}$	3,140	-2,520	0,000
$b_{34}$	23,850	2,420	0,001
$b_{11}$	-1,750	2,250	-0,001
$b_{22}$	-1,040	5,380	0,000
$b_{33}$	7,960	6,500	-0,010
$b_{44}$	-2,180	-1,890	-0,004
$b_0$	98,560	99,680	0,340

на величину остаточной концентрации, как минимум, на порядок меньше степени влияния этих факторов на величины удельной энергии и часового массового выхода. Следовательно, степень отжима материала регулируется в основном отношением расхода смеси на входе шнека к максимально возможному расходу  $\bar{Q}_0 = Q_0/Q_k$ , то есть гидродинамическим сопротивлением головки. Анализ величины остаточной концентрации показал, что со снижением объемного расхода на входе она убывает и достигает некоторого минимума. При дальнейшем уменьшении расхода остаточная концентрация возрастает, что объясняется уменьшением коэффициента проницаемости из-за большого давления. Так, при давлении в 200 атм величина коэффициента проницаемости в 10 раз меньше, чем при давлении в 60 атм.

## 5. Выводы

Предложена математическая модель шнек-прессового отжима с учетом связанности задач течения вязкой несжимаемой смеси и фильтрации жидкой компоненты сквозь массив перерабатываемого экструдата. Построен и реализован план четырехфакторного численного эксперимента по методу центрального ортогонального композиционного планирования, найдены коэффициенты уравнений регрессии.

Определено, что основным параметром, влияющим на производительность шнек-пресса, является величина расхода смеси на его входе. Повышение расхода смеси за счет уменьшения гидродинамического сопротивления головки, увеличения скорости вращения (либо диаметра) шнека приводит к более медленному снижению массовой концентрации масла по длине шнека и, как следствие, к более медленному падению значения эффективного коэффициента проницаемости массива перерабатываемого материала, что дает выигрыш в величине интенсивности отжима.

Анализ коэффициентов уравнения регрессии показал, что возможности роста производительности шнек-пресса за счет изменения его длины и скорости вращения, а также длины зерновой камеры ограничены. В то же время, в рамках разработанной модели, возможность повышения скорости производства масла за счет выбора шнека с большим диаметром ограничивается только предельной величиной энергии, расходуемой на производство одного килограмма масла, или мощностью привода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №10-08-96069р-урал\_а и №13-08-96006р-урал\_а).

## Литература

1. Скульский О.И. Численное моделирование одночервячных экструдеров // Пластические массы. – 1997. – № 8. – С. 39-43. (*Skul'skiy O.I. Numerical modeling of single-screw extruders // International Polymer Science and Technology. – 1998. – V. 25, N. 4. – P. 91-95.*)
2. 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

потребуется большее количество энергии для производства одного килограмма масла. При этом отрицательное значение коэффициента  $b_{44}$  может быть объяснено уменьшением вязкости смеси с ростом скорости сдвига. Принимая во внимание значения коэффициентов  $b_3$  и  $b_{33}$ , можно сделать вывод о том, что зависимость величины удельной энергии от диаметра шнека, при фиксированных остальных параметрах, может быть приближенно описана возрастающей параболой. Таким образом, изменение параметров в сторону повышения выхода масла приводит к росту его «энергетической цены».

Величина остаточной концентрации масла в смеси сильнее всего подвержена влиянию длины и диаметра шнека. Увеличение длины шнека способствует более полному отжиму масла вследствие увеличения времени пребывания материала в шнеке; больший диаметр, напротив, приводит к росту остаточной концентрации ввиду увеличения расхода смеси. Сравнение коэффициента  $b_0$  с остальными коэффициентами уравнений регрессии говорит о том, что степень влияния геометрических параметров и скорости сдвига



3. Славнов Е.В., Шакиров Н.В., Судаков А.И., Бузмакова С.В. Определение эффективного коэффициента фильтрации двухкомпонентной смеси // АВУ. – 2008. – № 9. – С. 58-60.
4. Славнов Е.В., Коробов В.П. Изменение наноструктуры зерна озимой ржи в результате экструзии // Доклады Россельхозакадемии. – 2010. – № 5. – С. 49-53. (Slavnov E.V., Korobov V.P. Change in the nanostructure of winter rye grain as a result of extrusion // Russian Agricultural Sciences. – 2010. – V. 36, N. 5. – P. 384-387. DOI)
5. Корякина М.А. Оптимизация параметров шнека экструдера для получения рапсового масла // Известия ОГАУ. – 2011. – Т. 3, № 31-1. – С. 71-74.
6. Корякина М.А. Повышение эффективности работы одношнекового экструдера на основе структурно-параметрического синтеза для прессования семян рапса: Автореф. дис. канд. тех. наук. – Оренбург, Оренбургский государственный университет, 2011. – 19 с.
7. Barnes E.C., Wilson D.I., Johns M.L. Velocity profiling inside a ram extruder using magnetic resonance (MR) techniques // Chem. Eng. Sci. – 2006. – V. 61, N. 5. – P. 1357-1367. DOI
8. Зубкова Т.М. Параметрический синтез технологических объектов с использованием программных средств // Вестник ОГУ. – 2006. – № 5. – С. 150-157.
9. Chen Z., Ikeda K., Murakami T., Takeda T. Drainage phenomenon of pastes during extrusion // J. Mater. Sci. – 2000. – V. 35, N. 10. – P. 2517-2523. DOI
10. Roussel N., Lanos C. Particle fluid separation in shear flow of dense suspensions: experimental measurements on squeezed clay pastes // Appl. Rheol. – 2004. – V. 14, N. 5. – P. 256-265. DOI
11. Mascia S., Patel M.J., Rough S.L., Martin P.J., Wilson D.I. Liquid phase migration in the extrusion and squeezing of microcrystalline cellulose pastes // Eur. J. Pharm. Sci. – 2006. – V. 29, N. 1. – P. 22-34. DOI
12. Славнов Е.В. Изменение проницаемости масляных культур в процессе отжима масла на примере экструдата рапса // Доклады Россельхозакадемии. – 2013. – № 3. – С. 58-60.
13. Славнов Е.В., Петров И.А., Судаков А.И. Динамика отжима масла из деформируемого пористого массива (эксперимент) // Труды XVII Зимней школы по механике сплошных сред, 28 февраля-3 марта, Пермь, 2011. – Пермь–Екатеринбург: ИМСС УрО РАН, 2011. – 1 CD-ROM.
14. Славнов Е.В., Петров И.А. Изменение вязкости экструдата рапса в процессе отжима масла // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 6. – С. 42-44.
15. Янков В.И., Боярченко В.И., Первадчук В.П. Переработка волокнообразующих полимеров: В семи томах. Том II. Течение полимеров в шнековых насосах. – Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 998 с.
16. Раувендааль К. Экструзия полимеров. – СПб.: Профессия, 2010. – 768 с.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
18. Справочник инженера машиностроителя / Под ред. Н.С. Ачеркана. – М.: ГНТИ «Машгиз», 1956. – Т. 2. – 562 с.
19. Anferov S.D., Skulskiy O.I., Slavnov E.V. Mathematical model of rape oil extrusion extraction // Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety. – 2012. – V. 6, Part 2. – P. 81-87.  
(URL: <http://www.scientific-publications.net/download/ecology-and-safety-2012-2.pdf>).
20. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов. – М.: Наука, 1970. – 288 с.

Поступила в редакцию 08.08.12; опубликована в электронном виде 15.10.13

---

Сведения об авторах

Петров Илья Андреевич, ст.преп., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29; E-mail: [uralmaster\\_85@mail.ru](mailto:uralmaster_85@mail.ru)

Славнов Евгений Владимирович, дтн, проф., зав.лаб., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; E-mail: [slavnov@icmm.ru](mailto:slavnov@icmm.ru)

## Bibliography

1. *Skul'skii O.I.* Chislennoe modelirovanie odnochervyachnykh ekstrudirov // *Plasticheskie massy*. – 1997. – N. 8. – S. 39-43. (Skul'skiy O.I. Numerical modeling of single-screw extruders // *International Polymer Science and Technology*. – 1998. – V. 25, N. 4. – P. 91-95.)
2. *Skul'skii O.I., Slavnov E.V.* Diffuziya vlagi pri ekstruzionnoi pererabotke uvlazhennogo zerna // *Vychisl. mekh. splosh. sred.* – 2008. – T. 1, N. 2. – S. 74-80. [DOI](#)
3. *Slavnov E.V., Shakirov N.V., Sudakov A.I., Buzmakova S.V.* Opredelenie effektivnogo koeffitsienta fil'tratsii dvukhkompontnoi smesi // *AVU*. – 2008. – N. 9. – S. 58-60.
4. *Slavnov E.V., Korobov V.P.* Izmenenie nanostruktury zerna ozimoi rzhi v rezul'tate ekstruzii // *Doklady Rossel'khozakademii*. – 2010. – N. 5. – S. 49-53. (Slavnov E.V., Korobov V.P. Change in the nanostructure of winter rye grain as a result of extrusion // *Russian Agricultural Sciences*. – 2010. – V. 36, N. 5. – P. 384-387. [DOI](#))
5. *Koryakina M.A.* Optimizatsiya parametrov shneka ekstrudera dlya polucheniya rapsovogogo masla // *Izvestiya OGAU*. – 2011. – T. 3, N. 31-1. – S. 71-74.
6. *Koryakina M.A.* Povyshenie effektivnosti raboty odnoshnekovogo ekstrudera na osnove strukturno-parametricheskogo sinteza dlya pressovaniya semyan rapsa: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – Orenburg, Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, 2011. – 19 s.
7. *Barnes E.C., Wilson D.I., Johns M.L.* Velocity profiling inside a ram extruder using magnetic resonance (MR) techniques // *Chem. Eng. Sci.* – 2006. – V. 61, N. 5. – P. 1357-1367. [DOI](#)
8. *Zubkova T.M.* Parametricheskii sintez tekhnologicheskikh ob'ektov s ispol'zovaniem programmnykh sredstv // *Vestnik OGU*. – 2006. – N. 5. – S. 150-157.
9. *Chen Z., Ikeda K., Murakami T., Takeda T.* Drainage phenomenon of pastes during extrusion // *J. Mater. Sci.* – 2000. – V. 35, N. 10. – P. 2517-2523. [DOI](#)
10. *Roussel N., Lanos C.* Particle fluid separation in shear flow of dense suspensions: experimental measurements on squeezed clay pastes // *Appl. Rheol.* – 2004. – V. 14, N. 5. – P. 256-265. [DOI](#)
11. *Mascia S., Patel M.J., Rough S.L., Martin P.J., Wilson D.I.* Liquid phase migration in the extrusion and squeezing of microcrystalline cellulose pastes // *Eur. J. Pharm. Sci.* – 2006. – V. 29, N. 1. – P. 22-34. [DOI](#)
12. *Slavnov E.V.* Izmenenie pronitsaemosti maslichnykh kul'tur v protsesse otzhima masla na primere ekstrudata rapsa // *Doklady Rossel'khozakademii*. – 2013. – N. 3. – S. 58-60.
13. *Slavnov E.V., Petrov I.A., Sudakov A.I.* Dinamika otzhima masla iz deformiruемого poristogo massiva (eksperiment) // *Trudy XVII Zimnei shkoly po mekhanike sploshnykh sred, 28 fevralya-3 marta, Perm', 2011. – Perm'–Ekaterinburg: IMSS UrO RAN, 2011. – 1 CD-ROM.*
14. *Slavnov E.V., Petrov I.A.* Izmenenie vyazkosti ekstrudata rapsa v protsesse otzhima masla // *Agrarnyi vestnik Urala*. – 2011. – N. 6. – S. 42-44.
15. *Yankov V.I., Boyarchenko V.I., Pervadchuk V.P.* Pererabotka voloknoobrazuyushchikh polimerov: V semi tomakh. Tom II. Techenie polimerov v shnekovykh nasosakh. – Moskva–Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2005. – 998 s.
16. *Rauvendaal' K.* Ekstruziya polimerov. – SPb.: Professiya, 2010. – 768 s.
17. *Landau L.D., Lifshits E.M.* *Gidrodinamika*. – M.: Nauka, 1986. – 736 s.
18. *Spravochnik inzhenera mashinostroytelya / Pod red. N.S. Acherkana.* – M.: GNTI «Mashgiz», 1956. – T. 2. – 562 s.
19. *Anferov S.D., Skul'skiy O.I., Slavnov E.V.* Mathematical model of rape oil extrusion extraction // *Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety*. – 2012. – V. 6, Part 2. – P. 81-87.  
(URL: <http://www.scientific-publications.net/download/ecology-and-safety-2012-2.pdf>).
20. *Finni D.* Vvedenie v teoriyu planirovaniya eksperimentov. – M.: Nauka, 1970. – 288 s.