

Определения геометрических параметров витков двухшнекового пресса-экструдера для получения растительных масел

Канд. техн. наук **А.В. Гукасян**, Aleksandr_Gukasyan@mail.ru

*Кубанский государственный технологический университет
350072, Россия, Краснодар, ул. Московская, 2*

Исследовали новый способ получения экологически чистых пищевых растительных масел – прессование в прессе-экструдере с двумя синхронно вращающимися шнеками. Его преимущества включают хорошее перемешивание материала, самоочищающиеся винты, короткое время пребывания и хорошая герметизация продукта в канале. Определяли пропускную способность витков экструдера на основе 3D моделирования эквивалентных габаритов прямоугольных каналов, образованных витками двухшнекового пресса. Использовали методы математического моделирования гидродинамики двумерного поля потенциала скорости плоскопараллельного стационарного течения Куэтта, позволяющего конструктивно дополнить процессы отжима пищевых растительных масел экстракцией в капиллярно-пористых телах. Показано, что полученное численное решение отличается отсутствием осцилляций, характерным для теоретической зависимости. Доказано, что аналитическое решение, использующее гиперболические функции, ведет к накоплению ошибок округления, при использовании значительного числа слагаемых этого ряда. Наличие гиперболических функций в аналитическом решении приводит к значительной вычислительной погрешности, что выражается в осцилляции решения вблизи неподвижной границы области существования решения. В результате проведенных исследований получена оценка пропускной способности канала с учетом сопротивлений выходного устройства. Главным выводом является использование интегральных характеристик витков для определения транспортирующей способности экструдерной части пресса с учетом модуля градиента скорости слоистого течения в канале шнека, эффективной вязкости материала и гидравлического взаимодействия витков на основе неразрывности потока вязкопластичного материала в каналах витков. В результате были определены расходно-напорные характеристики экструдерной части и предложен итерационный алгоритм, позволяющий прогнозировать гидравлические усилия, развиваемые прессом по геометрическим параметрам витков и реологии материала в процессе работы пресса.

Ключевые слова: пищевые растительные масла; гидродинамика ламинарных течений; вязкая жидкость; двухфазная смесь; математическая модель; прессование; шнек-пресс; экструзия.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-2-49-59

Determination of geometrical parameters of the turns of a twin-screw extruder press for the production of vegetable oils

Ph. D. **Aleksandr V. Gukasyan**, Aleksandr_Gukasyan@mail.ru

*Kuban State Technological University
2, Moscow str., Krasnodar, 350072, Russia*

A new method of obtaining ecologically pure edible vegetable oils was investigated, i.e. pressing in a press-extruder with two synchronously rotating screws. Its advantages include good mixing of the material, self-cleaning screws, short residence time, and good sealing of the product in the channel. The aim of the study was to determine the throughput of the turns of the extruder based on 3D modeling of equivalent dimensions of rectangular channels formed by turns of a twin-screw press. We used the methods of mathematical modeling hydrodynamics for a two-dimensional field of plane-parallel stationary Couette flow velocity potential, which makes it possible to use the extraction in capillary-porous bodies in the extraction of edible vegetable oils. It was determined that the obtained numerical solution is characterized by the absence of oscillations, which is characteristic of a theoretical dependence. It is proved that an analytical solution using hyperbolic functions results in the accumulation of rounding errors when using a significant number of terms of this series. The presence of hyperbolic functions in the analytical solution results in a significant computational error, which is expressed in the oscillation of the solution near the fixed boundary of the region of solution existence. As a result of the research, an estimate of the channel capacity was obtained taking into account the output device resistances. The main conclusion is the use of the integral characteristics of the turns to determine the transporting capacity of the extruder part of the press taking into account the modulus of the velocity gradient of the layered flow in the screw

channel, the effective viscosity of the material, and the hydraulic interaction of the turns based on the continuity of the flow of the viscous-plastic material in the turns channels. As a result, the flow-pressure characteristics of the extruder part were determined and an iterative algorithm was proposed that allows predicting the hydraulic forces developed by the press according to the geometrical parameters of the turns and the rheology of the material during the press operation.

Keywords: edible vegetable oils; hydrodynamics of laminar flows; viscous fluid; biphasic mixture; mathematical model; pressing; screw press; extrusion.

Введение

Повышение эффективности процессов разделения на отдельные пищевые компоненты при использовании пресса-экструдера [1] базируется на изучении физико-химических особенностей процессов и является важной народно-хозяйственной задачей пищевой промышленности [2]. Общей темой исследования является моделирование течения пластически деформируемой пористой среды при исследовании процесса экструзионного отжима масла из масличной мезги. В настоящее время это наиболее инновационный способ производства, позволяющий получать высококачественные пищевые растительные масла [3] используя технологические инновации в пищевой промышленности [4]. Математическое моделирование гидродинамики ламинарных течений в узких каналах может быть использовано при анализе производства пищевых растительных масел [5] на основе уточнения реологии масличного материала [6].

Важной проблемой инженерного расчета расходно-напорных характеристик промышленных установок является ступенчатый характер изменения скорости потока материала при переходе с одного витка на другой [7]. Для описания поведения материала в этих условиях был применен подход динамики двухфазной смеси в двумерной постановке для среднего сечения канала витка шнека [8]. Первой фазой был жмых масличной культуры, игравший роль пористого скелета. Второй фазой было растительное масло, насыщающее этот пористый скелет. Для описания свойств пористого скелета и масла была использована модель вязкой жидкости зависящей от давления [9].

В отличие от задачи обращенного движения, когда канал шнека развернут на плоскость, было использовано аналитическое решение двумерного слоистого течения вязкой жидкости [10]. С учетом экспериментально найденных реологических зависимостей [11] разработан алгоритм численного решения [12] задачи на основе метода релаксации [13] задачи Пуассона [14]. В основу математической модели была положена Бингамовская реологическая модель [15]. Это позволило уточнить кинетику отжима растительного масла из масличного материала и сформулировать двумерную математическую модель в этом процессе [16].

Цель настоящего исследования – определение расходно-напорных характеристик системы последовательно расположенных витков двухшнекового пресса-экструдера. При этом в процессе работы ставилась задача синхронизации аналитического и релаксационного решения уравнений Навье–Стокса для слоистого двумерного течения в каналах шнека различной геометрии. Наряду с этим искали коэффициенты уравнений регрессии для расходно-напорных характеристик витков и определяли степень влияния геометрических параметров и скорости вращения шнека на указанные величины. Проведенное исследование формулирует инженерный подход к проектированию процессов и аппаратов экструзионного типа для широкого спектра промышленных и экспериментальных установок производства пищевых растительных масел, что подтверждает ее актуальность, теоретическую и практическую значимость.

Методика

Методика базируется на том, что учитывается неразрывность потока материала в каналах витков. Для определения расходно-напорной характеристики необходимо принять конструктивную особенность рассматриваемого двухшнекового пресса (рисунок 1), а именно постоянство глубины всех витков ($H_B = 11$ мм), диаметра зеера ($D_3 = 84$ мм) и диаметра вала ($D_B = 62$ мм). Скорость вращения валов шнека постоянна ($\omega = 5,76$ Гц). Остальная геометрия двухшнекового пресса представлена с учетом перекрытия межвиткового пространства синхронно вращающимися витками (таблица 1).

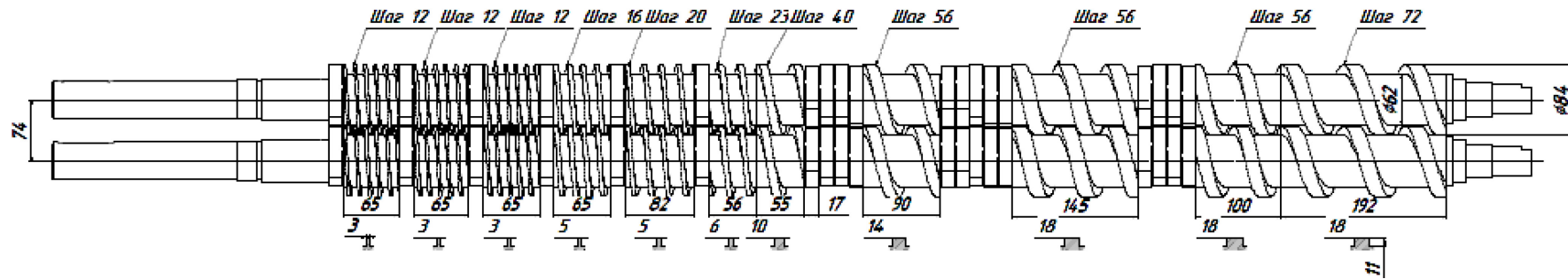


Рисунок 1 – Геометрия витков двух шнекового пресса
 Figure 1. Geometry of twin-screw press turns

Таблица 1. Геометрические параметры двух шнекового пресса
 Table 1. Geometrical parameters of twin-screw press

№ витка	Шаг витка	Длина витка	Толщина пера витка	Объем зерновой камеры	Свободный объем витков	Угол наклона витка	Угловая скорость стенок		Ширина канала витка
							на валу	на зее	
1	72	192	18	2,077	0,675	15,261	0,345	0,467	51,461
2	56	100	18	1,082	0,316	11,981	0,349	0,473	36,780
3	56	145	18	1,568	0,458	11,981	0,349	0,473	36,780
4	56	90	14	0,973	0,284	11,981	0,349	0,473	40,780
5	40	55	10	0,595	0,193	8,619	0,353	0,478	29,548
6	23	56	6	0,606	0,194	4,981	0,356	0,482	16,913
7	20	82	5	0,887	0,288	4,334	0,356	0,482	14,943
8	16	65	5	0,703	0,208	3,470	0,356	0,483	10,971
9	12	65	3	0,703	0,229	2,604	0,357	0,483	8,988
10	12	65	3	0,703	0,229	2,604	0,357	0,483	8,988
11	12	65	3	0,703	0,229	2,604	0,357	0,483	8,988
п/п	мм	мм	мм	литр	литр	°	м/сек	м/сек	мм
n+1	S_B	L_B	B_{II}	V_3	V_B	Θ_B	V_B	V_B	W_B

Свободный объем витков (таблица 1) определяли на основе 3D моделирования (рисунок 2). Используя геометрические параметры (таблица 1) определяли угол наклона витка

$$\Theta_B = \arctg\left(\frac{S_B}{\pi \cdot D_3}\right), \quad (1)$$

который использовали для расчета ширины канала витка

$$W_B = S_B \cdot \cos(\Theta_B) - B_{\Pi}. \quad (2)$$

Зная габариты сечение витка ($W_B \times H_B$) определяли длину канала витка

$$L_K = \frac{V_B}{W_B \cdot H_B}. \quad (3)$$

Расчетные значения (1), (2) и (3) позволяют определить эквивалентные габариты каналов, образованных витками двухшнекового пресса (таблица 2). Аппроксимируем течение в эквивалентных каналах (таблица 2) как слоистое течение, определяемое уравнением Пуассона с частными производными вида

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} u(x, y) = \rho(x, y). \quad (4)$$

Важной характеристикой пропускной способности канала является скорость слоистого течения в сечении витка, определяемая уравнением (4), зависящая от сопротивления потоку $\rho(x, y)$, определяемого решением задачи Куэтта в прямоугольном канале.

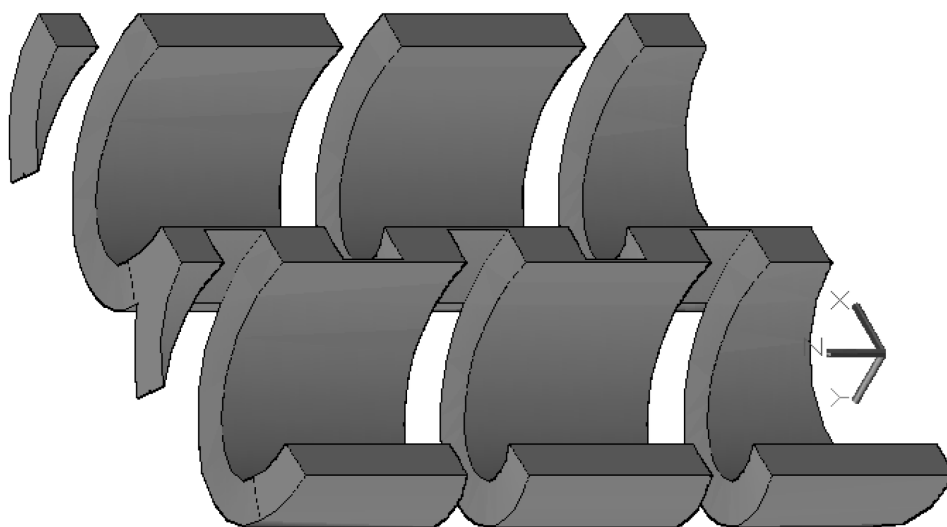


Рисунок 2 – 3D модель свободного объема первого витка
Figure 2. 3D model of the first turn free volume

В инженерных расчетах пропускной способностью канала, как правило, считают скорость потока, в отсутствие сопротивления $[\rho(x, y) = 0]$, определяемого формулой двумерного слоистого течения Куэтта в сечении канала ($a \cdot b$; $b > a$) [12, 13]

$$w_z(x, y) = V(x) - \frac{4 \cdot V(x)}{\pi} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \frac{\sin\left(\pi \cdot y \cdot \frac{2 \cdot k + 1}{b}\right)}{2 \cdot k + 1} \cdot \frac{sh\left[\pi \cdot (a - x) \cdot \frac{2 \cdot k + 1}{b}\right]}{sh\left(\pi \cdot a \cdot \frac{2 \cdot k + 1}{b}\right)} \right\}, \quad (5)$$

где $V(x)$ – скорость стенок канала шнека, изменяемая по высоте канала ($0 \leq x \leq a$) и аппроксимируемая линейной зависимостью

$$V_n(x) = v_{Bn} - \frac{V_{3n} - v_{Bn}}{H_{Bn}} \cdot x, \tag{6}$$

где v_{Bn} – скорость стенки на валу шнека $v_{Bn} = D_B \cdot \omega \cdot \cos(\Theta_{Bn})$;

V_{3n} – скорость стенки у зеера шнека $V_{3n} = D_3 \cdot \omega \cdot \cos(\Theta_{Bn})$. Средняя скорость подвижных стенок канала определялась как средневзвешенная по периметру этих стенок (таблица 2).

Таблица 2. Геометрические параметры эквивалентных каналов витков двухшнекового пресса
Table 2. Geometrical parameters for equivalent channels of twin-screw press

№ витка	Средняя скорость стенки	Пропускная способность	Длина канала витка	положение витка на оси канала Z	
1	0,401	390	1192	0	1192
2	0,406	299	780	1192	1972
3	0,406	299	1131	2040	3171
4	0,406	325	633	3256	3889
5	0,411	255	595	3957	4552
6	0,414	172	1042	4552	5594
7	0,414	159	1754	5611	7365
8	0,414	130	1724	7382	9106
9	0,415	115	2311	9123	11434
10	0,415	115	2311	11451	13763
11	0,415	115	2311	13780	16091
п/п	м/сек	литр/час	мм	мм	мм
п+1	$v_{ст}$	$q (\Delta P/\mu = 0)$	L_K	$Z_{мин}$	$Z_{макс}$

В случае использования (5) на границе области $x = 0$ возможны осцилляции за счет применения ограниченного числа суммируемых членов ряда. При этом наличие в аналитическом решении гиперболических функций ведет к накоплению ошибок округления при использовании значительного числа слагаемых этого ряда. Наличие гиперболических функций в аналитическом решении (5) приводит к значительной вычислительной погрешности, что выражается в осцилляции решения вблизи неподвижной границы области существования решения (рисунок 3).

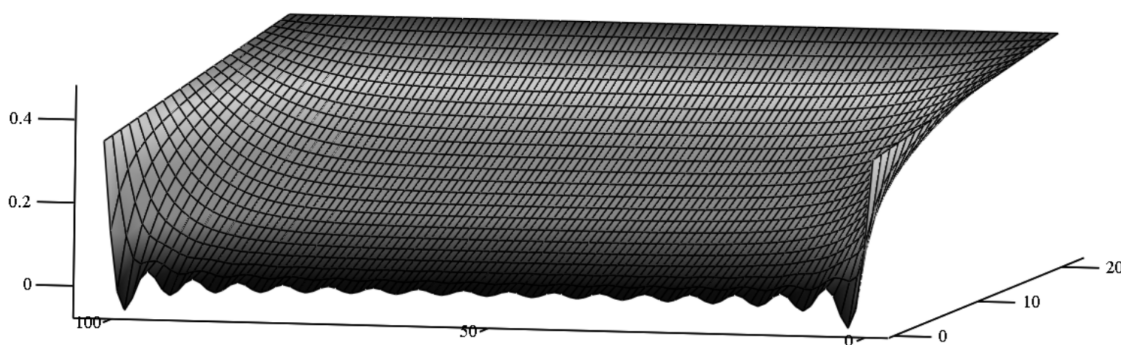


Рисунок 3 – Аналитическое решение скорости слоистого течения в сечении канала первого витка
Figure 3. Analytical solution for the velocity of laminar flow in the cross-section of first turn channel

Использованное численное решение $relax [H_B, W_B, w_z(x, y)]$, полученное методом Гаусса–Зейделя, более гладкое, но требует использования достаточно точного начального приближения при аппроксимации скоростного напора как внутри области существования решения, так и на его границах задаваемых соотношением (6).

В связи с этим, при расчете пропускной способности каналов витков, в качестве начального приближения использовали уравнение (5), которое уточняли путем численного метода Гаусса–Зейделя. Полученное численное решение, представленное в виде поверхностной диаграммы (рисунок 4), отличается отсутствием осцилляций, характерным для теоретической зависимости.

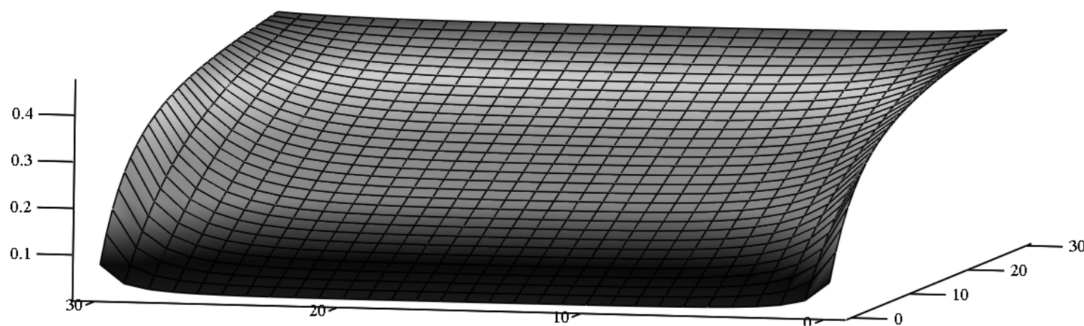


Рисунок 4 – Численное решение скорости слоистого течения в сечении канала первого витка методом Гаусса–Зейделя
 Figure 4. Numerical solution for the velocity of laminar flow in the cross-section of first turn channel by Gauss-Seidel method

Результаты и их обсуждение

Полученное с помощью функции *relax* решение скоростного напора задачи Куэтта использовали для расчета пропускной способности канала шнека путем интегрирования поля скоростей $w_z(x, y)$

$$q_c = \int_0^{H_B} \int_0^{W_B} relax [H_B, W_B, w_z(x, y)] dx dy.$$

Полученные оценки пропускной способности по Куэтту, сглаженные методом Гаусса–Зейделя, демонстрируют как наличие экстремума, так и участки с постоянной величиной этого показателя. В связи с этим в дальнейшем перешли к оценке пропускной способности канала с учетом сопротивлений выходного устройства

$$w_z(x, y, \Delta P, \mu) = V(x) - \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[\begin{aligned} & \left[\frac{4 \cdot V(x)}{\pi \cdot (2 \cdot n + 1)} - \frac{4 \cdot b^2}{\pi^3 \cdot (2 \cdot n + 1)^3} \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \right] \cdot ch\left(\pi \cdot x \cdot \frac{2 \cdot n + 1}{b}\right) + \\ & + \frac{4 \cdot b^2}{\pi^3 \cdot (2 \cdot n + 1)^3} \cdot \frac{\Delta P}{\mu} + \\ & + \frac{4 \cdot sh\left(\pi \cdot x \cdot \frac{2 \cdot n + 1}{b}\right)}{\pi^3 \cdot (2 \cdot n + 1)^3} \cdot \left[\begin{aligned} & b^2 \cdot th\left(\pi \cdot a \cdot \frac{2 \cdot n + 1}{b}\right) \cdot \frac{\Delta P}{\mu} - \\ & - \pi^2 \cdot V(x) \cdot ch\left(\pi \cdot a \cdot \frac{2 \cdot n + 1}{b}\right) \cdot (2 \cdot n + 1)^2 \end{aligned} \right] \end{aligned} \right] \cdot \sin\left(\pi \cdot y \cdot \frac{2 \cdot n + 1}{b}\right) \right\},$$

где $w_z(x, y, \Delta P, \mu)$ – компонента скорости потока в канале шнека по оси Z в сечении X, Y , м/сек;

ΔP – перепад давления в канале шнека по оси Z , Па/м;

μ – эффективная вязкость материала в канале шнека, Па·сек.

Использование функции *relax* в среде PTC MathCAD позволяет уменьшить число членов ряда до 6, получая расходно-напорные характеристики витков (рисунок 5).

Обобщая полученные данные (рисунок 5), преобразовали расходно-напорные характеристики витков к общей линейной зависимости

$$Q_n \left(\frac{\Delta P}{\mu} \right) = b_{0,n} + b_{1,n} \cdot \frac{\Delta P}{\mu}, \tag{7}$$

где $b_{0,n}; b_{1,n}$ – коэффициенты линейной зависимости расходно-напорной характеристики n -го витка от сопротивления $\frac{\Delta P}{\mu}$ потоку на этом витке (таблица 3).

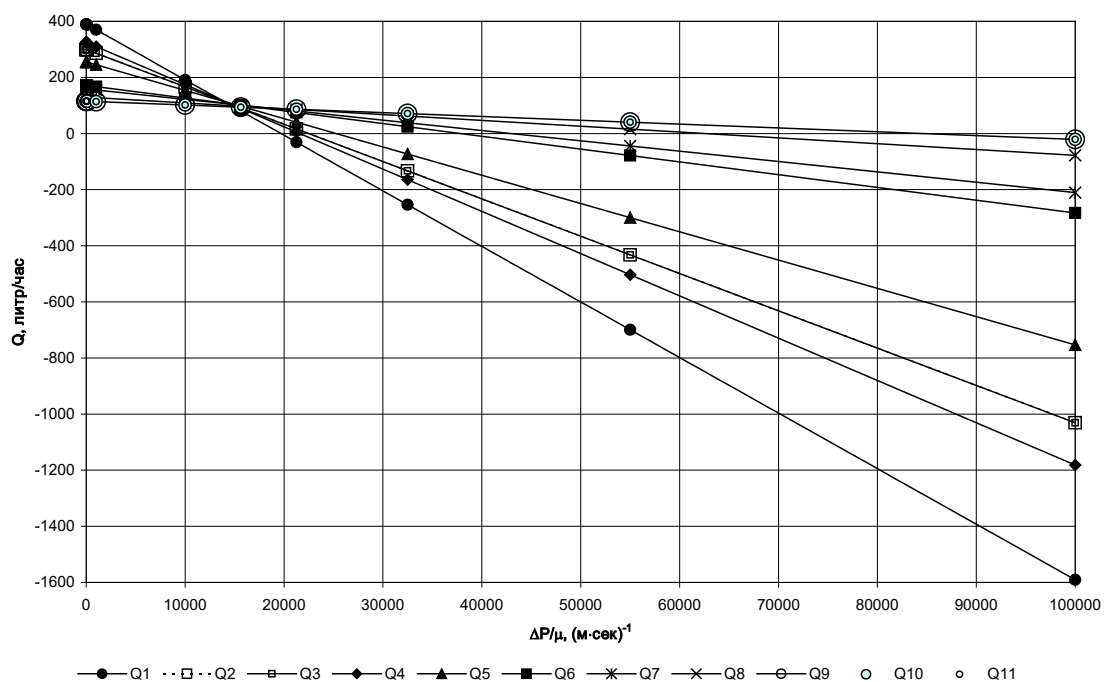


Рисунок 5 – Пропускная способность каналов, образованных витками прессы
 Figure 5. The capacity of the channels formed by the turns of the press

Таблица 3. Коэффициенты линейной расходно-напорной характеристики витков
 Table 3. Coefficients of flow-pressure characteristic for the turns

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$b_{0,n} \cdot 10^5$	10,820	8,311	8,311	9,037	7,084	4,776	4,409	3,605	3,205	3,205	3,205
$b_{1,n} \cdot 10^{10}$	-55,006	-36,941	-36,941	-41,859	-28,012	-12,636	-10,259	-5,769	-3,793	-3,793	-3,793
$(\Delta P/\mu)_{\text{макс}}$	19671	22499	22499	21588	25287	37794	42974	62491	84483	84483	84483

Как видно из представленных данных (таблица 3), зависимость (7) ограничена предельной величиной сопротивления потоку на витках $(\Delta P/\mu)_{\text{макс}}$, которая определяет возможности транспортировки материала по этим виткам. Используя интегральные характеристики витков (таблица 3), перешли к определению транспортирующей способности экструдерной части прессы ($n = 0 \dots 4$). Учитывая неразрывность потока материала в каналах этих витков, их расходно-напорные характеристики определяются следующими уравнениями

$$b_{0,n} + b_{1,n} \cdot \frac{\Delta P_n}{\mu(f, \gamma_n)} = b_{0,n+1} + b_{1,n+1} \cdot \frac{\Delta P_{n+1}}{\mu(f, \gamma_{n+1})}. \tag{8}$$

Рассматриваемый пресс-экструдер имеет производительность порядка 200 литров в час. Поэтому уравнение (8) может быть дополнено следующим соотношением

$$b_{0,n} + b_{1,n} \cdot \frac{\Delta P_n}{\mu(f, \gamma_n)} = 200 \frac{\text{литр}}{\text{час}}. \tag{9}$$

Уравнения (8) и (9) определяют сопротивление потоку $\frac{\Delta P_n}{\mu(f, \gamma_n)}$ на первых двух витках

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_0}{\mu(f, \gamma_0)} = 9570 \text{ (м} \cdot \text{сек)}^{-1} \\ \frac{\Delta P_1}{\mu(f, \gamma_1)} = 7459 \text{ (м} \cdot \text{сек)}^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

Полученные значения $\frac{\Delta P_n}{\mu(f, \gamma_n)}$ определяют общее сопротивление слоистого потока в канале.

Общее сопротивление сдвигу бингамовской вязкопластичной жидкости может быть выражено через эффективную вязкость при определенной скорости сдвига. Эффективную вязкость определяют как вязкость ньютоновской жидкости, соответствующую конкретным значениям напряжения и скорости сдвига бингамовской жидкости. Для оценки эффективности отдельных витков была определена скорость сдвига на витке как средний модуль градиента скорости слоистого течения в канале шнека

$$\gamma_c = \frac{\int_0^{W_B} \int_0^{H_B} |\nabla_{x,y} relax [H_B, W_B, w_z(x, y)]| dx dy}{W_B \cdot H_B} \quad (11)$$

Анализ данных по изменению скорости сдвига в каналах прессы в соответствии с (11) показал нелинейных характер этой характеристики потока (рисунок 6) при изменении сопротивления потоку на витках $\Delta P/\mu_{\text{макс}}$ до 25000 (м·сек)⁻¹

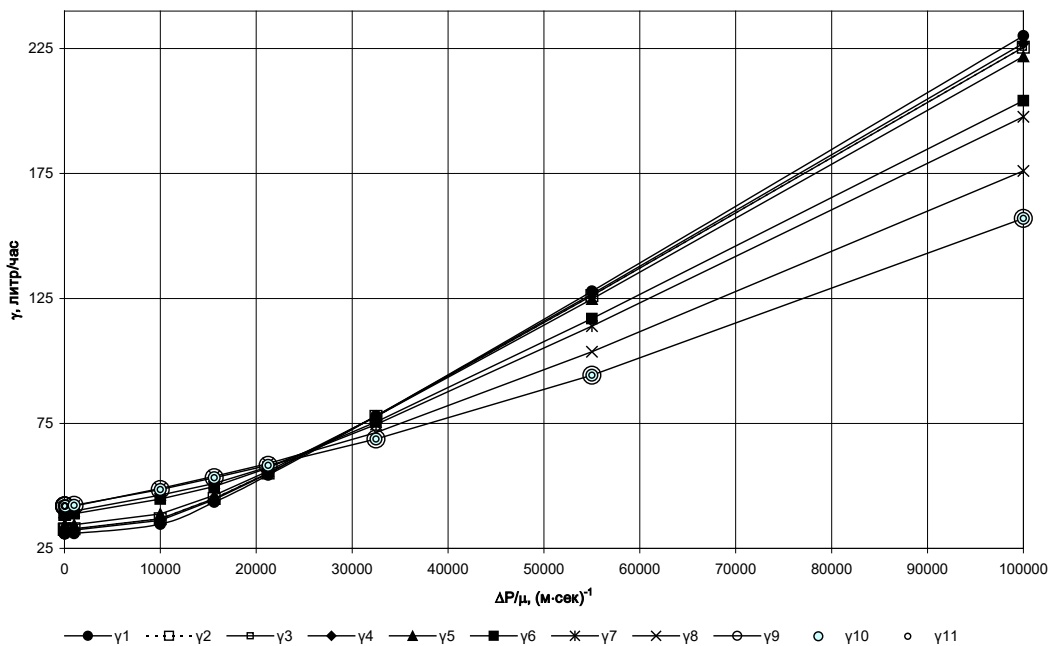


Рисунок 6 – Скорость сдвига каналов образованных витками прессы
Figure 6. Sliding velocity of the channels formed by press turns

Это изменение может быть описано кусочно-непрерывной функцией следующего вида

$$\gamma_n \left(\frac{\Delta P}{\mu} \right) = \left[a_{0,n} \cdot \exp \left(a_{1,n} \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \right) + a_{2,n} \right] \cdot \Phi \left[\left(\frac{\Delta P}{\mu} \right)_{\text{exp}} - \frac{\Delta P}{\mu} \right] + \left(d_{0,n} + d_{1,n} \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \right) \cdot \Phi \left[\frac{\Delta P}{\mu} - \left(\frac{\Delta P}{\mu} \right)_{\text{exp}} \right], \quad (12)$$

где $\Phi(x)$ – функция Хэвисайда.

Как видно из представленных данных (таблица 4), зависимость (12) экспоненциальная до сопротивления потоку на витках $(\Delta P/\mu)_{\text{exp}}$, которая определяет дальнейшую линейную зависимость скорости сдвига материала по этим виткам.

Таблица 4. Коэффициенты кусочно-непрерывной функции скоростей сдвига материала на витках
 Table 4. Coefficients of sectionally continuous function for sliding velocity of the material at the turns

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a_{0,n}$	2,712	2,997	2,997	2,848	3,390	8,558	14,511	50,997	27,716	27,716	27,716
$a_{1,n} \cdot 10^5$	10,745	10,132	10,132	10,394	9,469	5,471	3,814	1,401	2,196	2,196	2,196
$a_{2,n}$	27,981	29,498	29,498	29,170	30,720	29,773	24,834	-9,721	14,079	14,079	14,079
$(\Delta P/\mu)_{\text{exp}}$	19203	19722	19722	19549	20291	26098	31528	33599	36363	36363	36363
$d_{0,n}$	4,394	6,190	6,190	5,613	7,864	12,837	14,419	19,550	24,163	24,163	24,163
$d_{1,n} \cdot 10^3$	2,255	2,191	2,191	2,213	2,138	1,910	1,829	1,559	1,320	1,320	1,320

Используя (10) с учетом (12) определяем скорости сдвига на этих витках

$$\begin{cases} \gamma_n \left[\frac{\Delta P_0}{\mu(f, \gamma_0)} \right] = 35,56 \text{ Гц} \\ \gamma_n \left[\frac{\Delta P_1}{\mu(f, \gamma_1)} \right] = 35,88 \text{ Гц} \end{cases} \quad (13)$$

Полученные скорости сдвига (13) позволяют определить эффективную вязкость материала в канале витка. Ранее было установлено, что функциональная зависимость эффективной вязкости может быть аппроксимирована уравнением

$$\mu(f, \gamma) = \left[\frac{\exp(-0,51698 \cdot s \cdot \gamma)}{f^{-8,5324}} + 202,53 \right] \cdot Pa \cdot s, \quad (14)$$

где f – масличность материала в канале шнека, кг/кг.

Уравнение (14) адекватно описывает изменение вязкости в пределах области ее идентификации

$$\mu(f, \gamma) \Rightarrow \begin{cases} 0,166 \text{ кг/кг} \leq f \leq 0,5 \text{ кг/кг} \\ 0,55 \text{ Гц} \leq \gamma \leq 5,6 \text{ Гц} \end{cases}.$$

Зная скорость сдвига и эффективную вязкость материала, определяем градиенты давлений ΔP_n на экструдерных витках

$$\begin{cases} \Delta P_0 = 1938208 \frac{\text{Па}}{\text{м}} \\ \Delta P_1 = 1510741 \frac{\text{Па}}{\text{м}} \end{cases} \quad (15)$$

Ранее было установлено, что функциональная зависимость эффективной вязкости может быть аппроксимирована уравнением

$$\mu(f, \gamma) = \left[+ \frac{\exp(-0,51698 \cdot s \cdot \gamma)}{f^{-8,5324}} + 202,53 \right] \cdot Pa \cdot s,$$

где f – масличность материала в канале шнека, кг/кг.

Уравнение адекватно описывает изменение вязкости в пределах области ее идентификации

$$\mu(f, \gamma) \Rightarrow \begin{cases} 0,166 \text{ кг/кг} \leq f \leq 0,5 \text{ кг/кг} \\ 0,55 \text{ Гц} \leq \gamma \leq 5,6 \text{ Гц} \end{cases}.$$

Зная скорость сдвига и эффективную вязкость материала, определяем градиенты давлений ΔP_n на экструдерных витках

$$b_{0,n} + b_{1,n} \cdot \frac{\Delta P_n}{\mu(f, \gamma_n)} = b_{0,n+1} + b_{1,n+1} \cdot \frac{\Delta P_{n+1}}{\mu(f, \gamma_{n+1})}. \quad (16)$$

Пренебрегая влиянием атмосферного давления $P_0^{\text{нат}} = 0$ и учитывая постоянство геометрии в пределах одного витка, давление в конце витка определяется с учетом (15) и (16) по длине этих каналов

$$\begin{cases} P_0^{\text{кон}} = \Delta P_0 \cdot L_{\text{к0}} = 2,31 \text{ МПа} \\ P_1^{\text{кон}} = P_0^{\text{кон}} + \Delta P_1 \cdot L_{\text{к1}} = 3,49 \text{ МПа} \end{cases}$$

Таким образом, определены расходно-напорные характеристики экструдерной части и предложен итерационный алгоритм, позволяющий прогнозировать гидравлические усилия, развиваемые прессом по геометрическим параметрам витков и реологии материала в процессе работы прессы. Использование интегральных характеристик витков для определения транспортирующей способности экструдерной части двухшнекового прессы с учетом модуля градиента скорости слоистого течения в канале шнека, эффективной вязкости материала и гидравлического взаимодействия витков на основе неразрывности потока вязкопластичного материала в каналах витков показало положительный результат.

Заключение

Новизна данного исследования заключается в разработке итерационного алгоритма расчета расходно-напорных характеристик экструдерной части двух шнекового прессы (8) и инженерного расчета гидравлических усилий, развиваемых прессом в процессе отжима растительного масла (16). Практическая значимость проведенного исследования связана с возможностью прогнозирования технологических параметров прессы пищевых растительных масел в прессы-экструдере с двумя синхронно вращающимися шнека процесса по геометрическим параметрам витков (рисунок 2) и реологии масляного материала. По результатам проведенных исследований получен результат, заключающийся в определении расходно-напорных характеристик системы последовательно расположенных витков двухшнекового прессы-экструдера. При этом в процессе работы была решена задача синхронизации аналитического и релаксационного решения уравнений Навье–Стокса для слоистого двумерного течения в каналах шнека различной геометрии. Найдены коэффициенты уравнений регрессии для расходно-напорных характеристик витков и определена степень влияния геометрических параметров и скорости вращения шнека на указанные величины.

Литература

1. Деревенко В.В. Совершенствование конструкции двухшнекового прессы-экструдера для отжима масла из масляного материала // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2006. № 2-3. С. 91–92.
2. Косачев В.С. Повышение эффективности рафинации масел в мыльно-щелочной среде на основе изучения физико-химических особенностей процесса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1985. 28 с.
3. Лукасян А.В. Тенденции и факторы инновационного развития пищевой промышленности // Проблемы обеспечения экономической безопасности и качественной социохозяйственной динамики: экономико-правовые аспекты: сб. тр. Краснодар: Научно-образовательные инициативы Кубани, 2013. С. 118–121.
4. Лукасян А.В. Технологические инновации в пищевой промышленности: состояние и проблемы // Вопросы экономики и управления в современном обществе: сб. тр. Волгоград, 2011. С. 69–72.
5. Схалыхов А.А., Верещагин А.Г., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Разработка модели конденсации парогазовых смесей с полимерными полуволоконными мембранами // Новые технологии. 2009. № 1. С. 39–43.
6. Gukasyan A.V. Identification of rheological dependencies of oil material processed in a screw press. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017, V. 8, no. 10, pp. 708–718.
7. Лукасян А.В., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Тарбин А.Н. Течение масляного материала в выпускном устройстве прессы // Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств: сб. тр. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т инж. технол., 2016. С. 146–150.
8. Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. Two-dimensional mathematical model of oil-bearing materials in extrusion-type transportation over rectangular screw core. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1015, pp. 1–7.
9. Шортский И.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Меретуков З.А. Реология суспензии измельченных семян подсолнечника в этаноле // Новые технологии. 2015. № 2. С. 38–46.
10. Деревенко В.В., Боровский А.Б., Алёнкина И.Н., Новоженова А.Д. Выбор оптимальных параметров подготовки семян голосемянной тыквы к отжиму масла // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2016. № 2–3. С. 70–72.
11. Лобанов А.А., Деревенко В.В. Особенности переработки семян рапса прессывым способом // Инновационные направления в пищевых технологиях: сб. тр. Пятигорск, РИА–КМВ, 2010. С. 342–346.

12. Косова Н.В., Меретуков З.А., Кошевой Е.П. Теоретические основы определения прочностных свойств растительного сырья и методика их экспериментального исследования // Новые технологии. 2013. № 3. С. 26–31.
13. Меретуков З.А., Меретуков М.А., Кошевой Е.П. Математическое моделирование течения фосфатидного концентрата в отверстии матрицы экструдера // Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. № 1. С. 161–164.
14. Меретуков З.А., Кошевой Е.П. Описание течения неньютоновской жидкости в канале экструдера // Новые технологии. 2010. № 4. С. 28–33.
15. Меретуков З.А., Кошевой Е.П. Исследование течения неньютоновской жидкости между движущейся и неподвижной пластиной // Новые технологии. 2010. № 4. С. 25–28.
16. Меретуков З.А., Кошевой Е.П. Моделирование течения неньютоновской жидкости в канале экструдера с учетом отжима // Новые технологии. 2010. № 2. С. 59–62.

References

1. Derevenko V.V. Improving the design of twin screw extruder for pressing oil from oilseeds. *News of higher educational institutions. Food technology*. 2006, no. 2-3, pp. 91–92 (In Russian).
2. Kosachev V.S. Improving the efficiency of refining oils in a soap-alkaline environment based on the study of the physico-chemical characteristics of the process. *Extended abstract of candidate's thesis*. Krasnodar. 1985. 28 p. (In Russian).
3. Gukasyan A.V. Tendencies and factors of innovative development of the food industry. *Problems of ensuring economic security and high-quality social dynamics: economic and legal aspects*. Collection of works. Krasnodar, Scientific and educational initiatives of Kuban Publ., 2013, pp. 118–121 (In Russian).
4. Gukasyan A.V. Technological innovations in the food industry: state and problems. *Questions of economy and management in modern society*. Collection of works. Volgograd, 2011. pp. 69–72 (In Russian).
5. Skhalyakhov A.A., Vereshchagin A.G., Kosachev V.S., Koshevoy E.P. Development of a model for the condensation of steam-gas mixtures with polymer hollow fiber membranes. *New Technologies*. 2009, no. 1, pp. 39–43 (In Russian).
6. Gukasyan A.V. Identification of rheological dependencies of oil material processed in a screw press. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017, V. 8, no. 10, pp. 708–718.
7. Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S., Tarbin A.N. The flow of oilseeds in the discharge device of the press. *Phenomena of transfer in the processes and apparatuses of chemical and food industries*. Collection of works. Voronezh, Voronezh State University of Engin. Technol. Publ., 2016. pp. 146–150 (In Russian).
8. Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. Two-dimensional mathematical model of oil-bearing materials in extrusion-type transportation over rectangular screw core. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1015, pp. 1–7.
9. Shorstky I.A., Koshevoy E.P., Kosachev V.S., Meretukov Z.A. Rheology of the suspension of crushed sunflower seeds in ethanol. *New Technologies*. 2015, no. 2, pp. 38–46 (In Russian).
10. Derevenko V.V., Borovsky AB, Alenkina I.N., Novozhenova A.D. Selection of optimal parameters for preparing pumpkin seed seeds for oil extraction. *News of Higher Educational Institutions. Food Technology*. 2016, no. 2–3, pp. 70–72 (In Russian).
11. Lobanov A.A., Derevenko V.V. Features of processing of rapeseed by pressing method. *Innovative directions in food technology*. Collection of works. Pyatigorsk, RIA–KMV Publ., 2010, pp. 342–346 (In Russian).
12. Kosova N.V., Meretukov Z.A., Koshevoi E.P. The theoretical basis for determining the strength properties of plant materials and methods of their experimental research. *New Technologies*. 2013, no. 3, pp. 26–31 (In Russian).
13. Meretukov Z.A., Meretukov M.A., Koshevoy E.P. Mathematical modeling of the flow of phosphatide concentrate in the hole of the extruder matrix. *Processes and Food Production Equipment*. 2011, no. 1, pp. 161–164 (In Russian).
14. Meretukov Z.A., Koshevoy E.P. Description of the flow of non-Newtonian fluid in the extruder channel. *New Technologies*. 2010, no. 4, pp. 28–33 (In Russian).
15. Meretukov Z.A., Koshevoy E.P. Study of the flow of a non-Newtonian fluid between a moving and fixed plate. *New Technologies*. 2010, no. 4, pp. 25–28 (In Russian).
16. Meretukov Z.A., Koshevoy E.P. Modeling the flow of a non-Newtonian fluid in the extruder channel with spinning. *New Technologies*. 2010, no. 2, pp. 59–62 (In Russian).

Статья поступила в редакцию 08.04.2019