

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНСОЛИДАЦИИ ПРИ МАСЛОТДЕЛЕНИИ В ШНЕКОВОМ ПРЕССЕ**

**В.А. Дидур**, д.т.н., профессор, **В.А. Ткаченко**, к.т.н., доцент

**А.В. Ткаченко**, к.т.н., **В.В. Дидур**, к.т.н.

Тел. (0619)44-02-74

*Таврический государственный агротехнологический университет  
(г. Мелитополь)*

*Разработана математическая модель процесса консолидации мезги из семян масличных культур в шнековых прессах, учитывающая одновременно протекание двух процессов – прессования «скелета» мезги и фильтрации масла через слой этого «скелета». Получено уравнение консолидации мезги, позволяющее определить гидродинамическое давление в поровой жидкости, и уравнение фильтрации масла с учётом непрерывного уменьшения пористости мезги.*

***Ключевые слова** – математическая модель, консолидация, фильтрация, гидродинамическое давление, мезга, шнековый пресс.*

**Постановка проблемы.** Поднимаемой в данной работе проблемой является обоснование технологических режимов и основных параметров шнековых прессов для переработки семян масличных культур, обеспечивающих заданные качественные показатели растительных масел и жмыхов, и снижение потерь масла в жмыхе конечного прессования.

При отжиме растительных масел одновременно протекают два физических процесса: прессование пористого «скелета» мезги и фильтрация масла через слой этого скелета.

Основными рабочими органами шнекового пресса есть зерный барабан со шнековым валом, собранным из отдельных витков (шнечков), насаженных на общий вал. Шнековый вал установлен в зерном барабане. Благодаря уменьшению объёма витка материал, находящийся в нём подвергается сжатию. Под воздействием возникающего давления масло отжимается из мезги и вытекает через зазоры в зерном барабане. Жмых выталкивается из зеера и при

выходе встречает сопротивление управляемое регулировочным устройством. В связи с этим технологические режимы и конструктивные параметры должны устанавливаться с учётом производительности шнекового пресса, обрабатываемой культуры, её масличности, места процесса отжима в технологической цепочке переработки семян и масличности жмыха на выходе из пресса. Решение этой задачи должно быть основано на теории трёхмерной консолидации обрабатываемого сырья с учётом реологических свойств «скелета» мезги. При этом ползучесть «скелета» мезги и фильтрационное движение масла происходят одновременно.

Для проведения исследований разбиваем всю прессующую часть машины на участки между витками шнека и рассматриваем протекающий процесс на каждом участке, начиная с первого.

**Анализ последних исследований.** При моделировании процесса фильтрации масло обычно рассматривается как несжимаемая ньютоновская жидкость с незначительной вязкостью. При этом скелет считается неподвижным, пористость материала в течение процесса фильтрации принимается неизменной.

Однако процесс отжима растительных масел в шнековом прессе сопровождается взаимным перемещением скелета мезги и масла, и непрерывным уменьшением пористости мезги. Пористость уменьшается до тех пор, пока сжавшийся скелет не уравновесит своим сопротивлением сжимающее давление. В прессуемой массе имеет место две системы давления: нейтральное и эффективное, а их сумма составляет полное давление. Нейтральное давление определяется напором фильтруемого масла, эффективное давление воспринимается скелетом мезги. Описание гидродинамического давления и скоростей жидкости (масла), заполняющей поры скелета мезги в рабочем пространстве зерной камеры шнекового пресса является основной задачей рассматриваемого процесса консолидации.

Изучению процесса прессования мезги в шнековом прессе посвящены работы В.А. Масликова [1]. На основании кривых прессования подсолнечной

мезги в зависимости от влажности, температуры жарения и прессования и степени сжатия им получено следующее обобщенное уравнение, связывающее эти переменные:

$$\sigma = \frac{25,2a\varepsilon_v^{5,5}}{e^{0,022W}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение в мезге, кг/см<sup>2</sup>;

$\varepsilon_v$  – степень сжатия мезги;

$W$  – влажность прессуемой мезги (%) при постоянной температуре;

$a$  – коэффициент, зависящий от влажности мезги и температуры её жарения и прессования. Так при  $t = 90^{\circ}\text{C}$  и  $W = 4\%$   $a = 0,00090$  [1, табл.3].

**Формулировка целей статьи.** Целью данной работы является обоснование рациональных режимов и основных параметров оборудования для переработки семян масличных культур прессованием обеспечивающих эффективность технологического процесса. Инструментом для определения рациональных технологических режимов и параметров должна стать разрабатываемая математическая модель.

**Основная часть.** Уравнением (1) можно проверить предположение о влиянии температуры жарения на упругие свойства мезги. Так при влажности 4.0% и степени сжатия 5,0 получим: для температуры 80<sup>0</sup>С удельное давление  $p = 114,5$  кг/см<sup>2</sup>; для 90<sup>0</sup>С  $p = 130$  кг/см<sup>2</sup>; для 100<sup>0</sup>С  $p = 81$  кг/см<sup>2</sup>. С увеличением температуры жарения с 80<sup>0</sup>С до 90<sup>0</sup>С упругие свойства мезги растут, с повышением температуры жарения с 90<sup>0</sup>С до 100<sup>0</sup>С растут пластические свойства. Недостаточно высокие упругие свойства мезги, выжаренной при 80<sup>0</sup>С, объясняются неполной денатурацией белковой части мезги. Повышенная же пластичность мезги, выжаренной при 100<sup>0</sup>С, объясняется частичным плавлением простейших белков белкового комплекса мезги. Мезга же, выжаренная при 90<sup>0</sup>С, имеет наиболее полную денатурацию белков без их плавления. Таким образом, подсолнечную мезгу, идущую на форпрессование, должны выжаривать при 90<sup>0</sup>С, тогда при прочих равных условиях давление в прессе становится большим, а это способствует более глубокому съёму масла,

что подтверждается практикой работы прессов и технологическими инструкциями.

При применении теории консолидации уплотнение скелета обрабатываемого материала и нарастание ползучих деформаций целесообразно описать зависимостью, характеризующей не степень сжатия, а изменением коэффициента пористости материала [2] от напряжения.

Коэффициент пористости определяется как отношение объема пор к объёму твёрдой фазы «скелета» материала (мезги)

$$\varepsilon = \frac{V_{\Pi}}{V_T}, \quad (2)$$

где  $V_{\Pi}$ ,  $V_T$  – соответственно объём пор и объём твердой фазы.

Если принять, что объём твердой фазы мезги  $V_T$  равен объёму мезги после выхода из последнего витка пресса  $V_n$ , т.е.  $V_n = V_T$ , то объём пор в  $k$ -ом витке  $V_{\Pi k} = V_k - V_n$ .  $V_k$  – объём мезги в  $k$ -ом витке. Причём объём пор  $V_{\Pi} = V_M + V_B$ , где  $V_B$  – объём свободного воздуха, соединённого с атмосферой, возможно часть из него заземлённая, т.е. не связанная с атмосферой.  $V_M$  – объём занимаемый маслом, заполняющим поры скелета.

Статистическая обработка экспериментальных данных [**Ошибка! Закладка не определена.**] позволила получить ряд зависимостей коэффициентов пористости мезги. На рис.1 приведены зависимости коэффициентов пористости от удельного давления в диапазоне от 0 до 137 кг/см<sup>2</sup> при температуре жарения и прессования мезги 90<sup>0</sup>С и различной влажности.

Как видно из рис.1 диапазон изменения удельного давления и коэффициента пористости большой. Для получения более точной аппроксимации и её параметров рассматриваемый диапазон разбили на две части: удельным давлением до 13,75 кг/см<sup>2</sup> и удельным давлением выше 13,75 кг/см<sup>2</sup>. Приближение данных и подбор параметров производился в системе Matlab по программе Curve Fitting Toolbox.

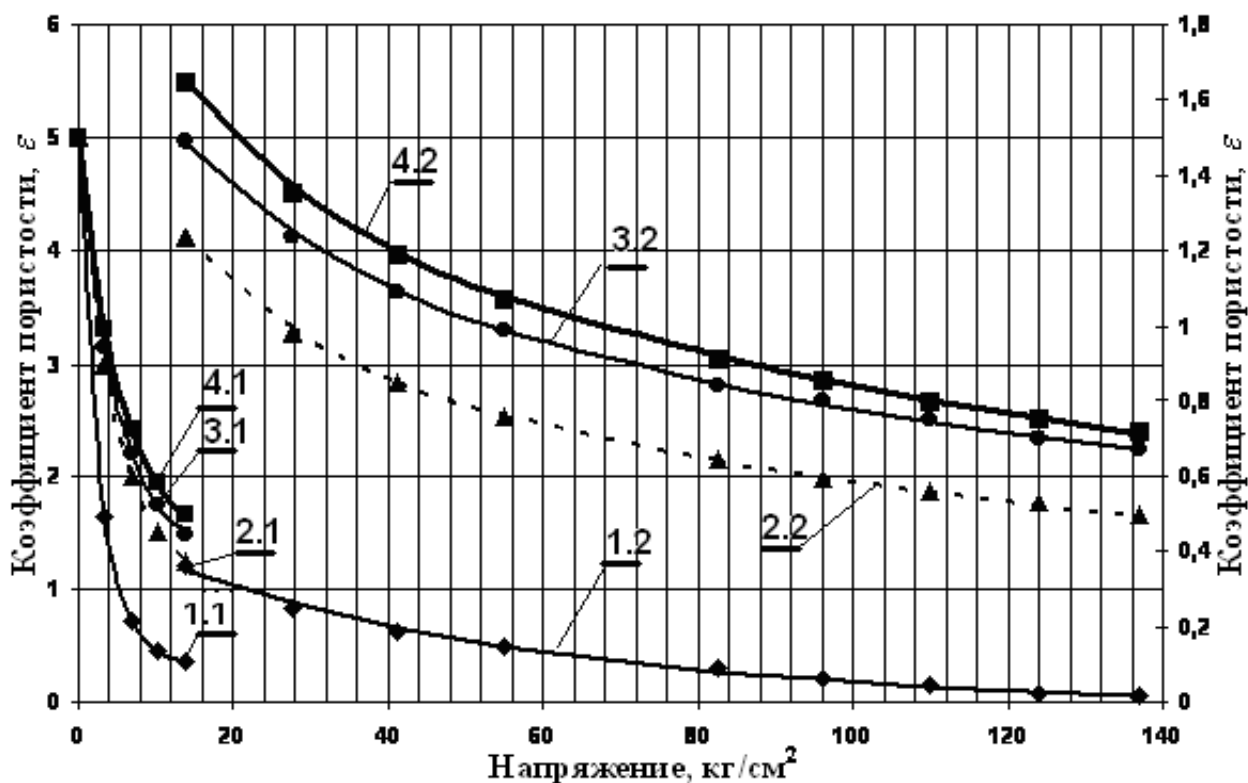


Рис. 1. Зависимость изменения коэффициента пористости от напряжения в диапазоне от 0 до  $137 \text{ kg/cm}^2$  в мезге рабочей полости шнека при температуре жарения и прессования мезги  $90^\circ\text{C}$ : 1 – влажности 6,55%, 2 – влажности 1,8%, 3 – влажности 0,945%, 4 – влажности 0,22%

Приведенные зависимости описываются экспоненциальными функциями с доверительной вероятностью 95% и корреляционными отношениями  $\eta_{y/x}$  от 0,9946 до 0,9966

$$\varepsilon = a \cdot \exp(b \cdot \sigma) + c \cdot \exp(d \cdot \sigma), \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент пористости;

$\sigma$  – удельное давление в мезге,  $\text{kg/cm}^2$ ;

$a, b, c, d$  – параметры экспоненциальной функции.

Полученные параметры экспоненциальных функций представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры экспоненциальных функций зависимости коэффициентов пористости от удельного давления

Коэффициенты при влажности W%	Температура, град.С					
	80		90		100	
	0 – 13,75 кг/см <sup>2</sup>	13,75-137 кг/см <sup>2</sup>	0 – 13,75 кг/см <sup>2</sup>	13,75-137 кг/см <sup>2</sup>	0 – 13,75 кг/см <sup>2</sup>	13,75-137 кг/см <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
W	4,31	4,31	6,55	6,55	2,02	2,02
a	4,257	0,121	4,551	-9,88E-04	4,037	1,474
b	$-3,05 \cdot 10^{-1}$	$-3,02 \cdot 10^{-2}$	$-3,90 \cdot 10^{-1}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$	$-2,32 \cdot 10^{-1}$	$-1,48 \cdot 10^{-1}$
c	0,752	0,698	0,459	0,467	0,973	0,943
d	$-1,61 \cdot 10^{-2}$	$-1,43 \cdot 10^{-2}$	$-2,22 \cdot 10^{-2}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$-6,77 \cdot 10^{-3}$	$-6,59 \cdot 10^{-3}$
W	1,88	1,88	1,8	1,8	1,6	1,6
a	3,891	1,266	3,953	0,748	3,892	0,603
b	$-2,16 \cdot 10^{-1}$	$-1,88 \cdot 10^{-2}$	$-2,07 \cdot 10^{-1}$	$-4,71 \cdot 10^{-2}$	$-2,21 \cdot 10^{-1}$	$-4,69 \cdot 10^{-2}$
c	1,119	0,193	1,057	0,889	1,118	0,942
d	$-8,60 \cdot 10^{-3}$	$-4,55 \cdot 10^{-3}$	$-3,22 \cdot 10^{-3}$	$-4,26 \cdot 10^{-3}$	$-6,28 \cdot 10^{-3}$	$-5,15 \cdot 10^{-3}$
W	0,51	0,51	0,945	0,945	0,5	0,5
a	3,614	0,792	3,834	0,752	3,6	0,888
b	$-2,04 \cdot 10^{-1}$	$-3,25 \cdot 10^{-2}$	$-1,98 \cdot 10^{-1}$	$-3,81 \cdot 10^{-2}$	$-1,96 \cdot 10^{-1}$	$-7,00 \cdot 10^{-2}$
c	1,397	1,031	1,178	1,089	1,411	1,280
d	$-5,87 \cdot 10^{-3}$	$-3,13 \cdot 10^{-3}$	$4,09 \cdot 10^{-3}$	$-3,57 \cdot 10^{-3}$	$-6,85 \cdot 10^{-3}$	$-5,74 \cdot 10^{-3}$
W	0,16	0,16	0,22	0,22	0,4	0,4
a	3,463	0,856	3,597	0,822	3,623	0,797
b	$-1,84 \cdot 10^{-1}$	$-4,74 \cdot 10^{-2}$	$-1,87 \cdot 10^{-1}$	$-4,59 \cdot 10^{-2}$	$-1,93 \cdot 10^{-1}$	$-4,45 \cdot 10^{-2}$
c	1,547	1,269	1,415	1,282	1,388	1,158
d	$-8,05 \cdot 10^{-3}$	$-4,00 \cdot 10^{-3}$	$-1,58 \cdot 10^{-3}$	$-4,31 \cdot 10^{-3}$	$-5,46 \cdot 10^{-3}$	$-4,02 \cdot 10^{-3}$

В элементарном слое мезги в рабочей зоне витка действуют следующие силы (рис.2):

1) Сила нормального давления  $P_z$  и  $(P_z + dP_z)$  соответственно на расстоянии  $z$  и  $(z + dz)$  от витка шнека;

2) Сила бокового давления  $P_{xz}$  – по наружной поверхности слоя мезги  $P_{xzh}$ , по его внутренней поверхности  $P_{xzб}$ , по поверхности ножей  $P_{xzy}$ ;

- 3) силы трения по наружной поверхности слоя  $T_{ZH}$  (по внутренней полости зернового цилиндра) и по внутренней его поверхности  $T_{z6}$  (о вал шнека);
- 4) силы трения по поверхности удерживающих ножей  $T_{zy}$ .

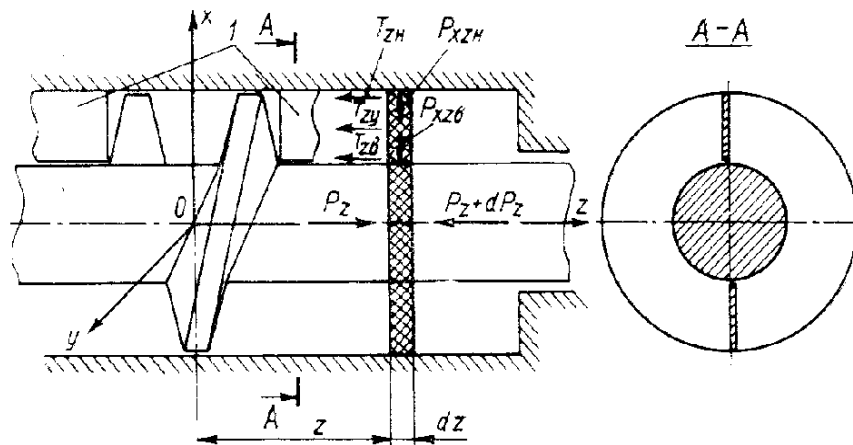


Рис. 2. Схема осевых сил и сил бокового давления, действующих в шнековом прессе: 1 – удерживающие ножи

Закон сжатия в шнековом прессе должен быть установлен на основе экспериментальных данных процесса фильтрации в лабораторных условиях. На основании установленного закона сжатия определяется удельное давление в каждом витке шнекового вала, и на основании этого определяются все перечисленные действующие силы.

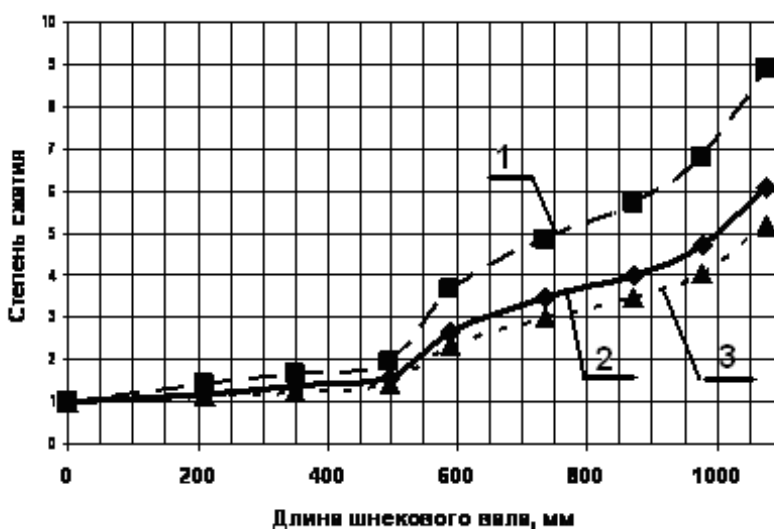


Рис. 3. Степень сжатия мезги на витках шнекового пресса при ширине выходной щели: 1 – 6 мм, 2 – 8 мм, 3 – 10 мм

При работе шнека внутри зеера возникают пять потоков: вынужденный поток (прямой поток), противоток, циркуляционный поток и два потока утечек: один в зазоре между вершиной нитки и внутренней поверхностью зеера; второй в угле разрыва нитки витка [3]. Гидродинамика всех пяти потоков, особенно потоков утечек, влияет на степень сжатия мезги в рабочей полости витков. Для проведения численных исследований полученных уравнений гидродинамики всех пяти потоков необходимо экспериментально определить реологические константы различных семян при изменении режимов влаготепловой подготовки. Такие экспериментальные данные пока отсутствуют. Поэтому пока для расчёта используются коэффициенты возврата, определяемые экспериментально-расчётным путём [4]. На рис.3 приведены результаты расчётов степени сжатия мезги на витках шнекового пресса при различной ширине выходной щели.

В дальнейшем для простоты расчёта поровую жидкость будем считать несжимаемой. Принимаем, что поровая жидкость не сопротивляется сдвиговым деформациям. Таким образом, в ней возникает лишь гидродинамическое давление  $p$ .

Для упрощения расчёта принимаем, что давление в поровой жидкости не вызывает в «скелете» мезги дополнительную деформацию.

В мезге, полностью насыщенной маслом, соотношение фаз в единице объёма, очевидно, определяется её коэффициентом пористости  $\varepsilon = V_{\text{п}} / V_{\text{т}}$ . Свободный незащемлённый воздух, непосредственно сообщаемого с внешней атмосферой, не требует дополнительного большого давления при консолидации мезги. Соотношение объёма масла и незащемлённого воздуха определяется экспериментально.

В виду малых скоростей перемещения обеих фаз фильтрационное течение считаем ламинарным.

Уравнение неразрывности жидкой фазы мезги

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (4)$$



где  $u_x, u_y, u_z$  – проекции скорости фильтрации жидкой фракции мезги через «скелет» мезги;

$n$  – объёмная пористость мезги:

$$n = \frac{V_n}{V},$$

где  $V_n$  – объём пор, заключающийся в некотором геометрическом объёме  $V$  мезги.

Уравнение неразрывности твёрдой фазы мезги

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial m}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – проекции скорости твёрдой фазы мезги,

$m$  – содержание твёрдых частиц в единице объёма мезги.

$$n + m = 1. \quad (6)$$

Из уравнений (4) – (6) вытекает уравнение неразрывности мезги в целом

$$\left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0. \quad (7)$$

В случае процесса прессования мезги и фильтрации масла через слой перемещаемой мезги по поверхности шнекового вала «скелет» мезги деформируется и, следовательно, находится в движении относительно поровой жидкости. Процесс фильтрации для такого случая описывается зависимостью Дарси – Герсеванова [2]

$$\left. \begin{aligned} u_x - \varepsilon v_x &= -k \left( \frac{\partial H}{\partial x} - i_0 \right); \\ u_y - \varepsilon v_y &= -k \left( \frac{\partial H}{\partial y} - i_0 \right); \\ u_z - \varepsilon v_z &= -k \left( \frac{\partial H}{\partial z} - i_0 \right); \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации (знак минус указывает, что движение жидкости направлено в сторону уменьшающихся напоров);

$H$  – напор;

$i_0$  – начальный градиент напора.

Дифференцируем уравнение (8) и суммируем его с учётом уравнения неразрывности жидкой фазы (4), получим уравнение фильтрации масла через слой мезги в шнековом прессе в декартовой прямоугольной системе координат

$$\varepsilon \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \left( v_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + v_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \left( \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right). \quad (9)$$

Напор определяется из известной зависимости

$$H = \frac{p}{\gamma} + z, \quad (10)$$

где  $p$  – гидродинамическое давление в поровой жидкости;

$\gamma$  – удельный вес поровой жидкости (масла);

$z$  – высота над плоскостью сравнения.

Рассмотрение процесса фильтрации масла через слой мезги в шнековом прессе сводится к пространственной задаче с осевой симметрией в цилиндрических координатах. При постоянных величинах коэффициентов фильтрации, равных  $k_r$  в радиальном и  $k_z$  в осевом направлениях и несжимаемости поровой жидкости правую часть уравнения (9) можно преобразовать к следующему виду

$$\frac{1}{\gamma} \left( \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) = k_r \frac{1}{\gamma} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + k_z \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}. \quad (11)$$

Тогда уравнение фильтрации несжимаемой жидкости (масла) в деформируемой пористой среде мезги в цилиндрических координатах можно записать

$$\begin{aligned} \varepsilon \left[ \frac{\partial v_r}{\partial r} (\sin \varphi + \cos \varphi) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + \left[ v_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} (\sin \varphi + \cos \varphi) + v_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] = \\ = k_r \frac{1}{\gamma} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + k_z \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\varphi$  – угол поворота рассматриваемой плоскости относительно горизонтали.

В прессуемой массе имеет место две системы давления: нейтральное и эффективное, а их сумма составляет полное гидростатическое давление. Нейтральное давление определяется напором фильтруемого масла, эффективное давление воспринимается скелетом мезги. Разработка теории о распределении для любого момента времени давления в поровой жидкости является основной задачей теории консолидации. Поэтому для использования полученного уравнения фильтрации необходимо вывести уравнение консолидации мезги, по которому можно определить нейтральное давление в рабочей зоне пресса.

Продифференцируем зависимость (3) по радиальному и осевому направлениям

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} &= \left[ ab \exp(b\sigma_{\Sigma r}) + cd \exp(d\sigma_{\Sigma r}) \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma r}}{\partial r}, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \left[ ab \exp(b\sigma_{\Sigma z}) + cd \exp(d\sigma_{\Sigma z}) \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma z}}{\partial z}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где  $\sigma_{\Sigma r}, \sigma_{\Sigma z}$  – суммарные радиальные и осевые удельное давление на «скелет» мезги и гидродинамическое давление масла. Подставляя значения (3) и (13) в уравнение (12) получим уравнение консолидации мезги в шнековом прессе в цилиндрической системе координат в таком виде

$$\begin{aligned} & \left[ a \exp(b\sigma_{\Sigma r}) + c \exp(d\sigma_{\Sigma r}) \right] \frac{\partial v_r}{\partial r} (\sin \varphi + \cos \varphi) + \left[ a \exp(b\sigma_{\Sigma z}) + c \exp(d\sigma_{\Sigma z}) \right] \frac{\partial v_z}{\partial z} + \\ & + v_r \left[ ab \exp(b\sigma_{\Sigma r}) + cd \exp(d\sigma_{\Sigma r}) \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma r}}{\partial r} (\sin \varphi + \cos \varphi) + \\ & + v_z \left[ ab \exp(b\sigma_{\Sigma z}) + cd \exp(d\sigma_{\Sigma z}) \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma z}}{\partial z} = k_r \frac{1}{\gamma} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + k_z \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

В начале процесса уплотнения маслонасыщенной мезги мгновенно возникают касательные напряжения при отсутствии объёмных деформаций и последующее постепенное нарастание только объёмных деформаций и отвечающих им нормальных напряжений при неизменных касательных напряжениях в соответствии с этим напряжения в мезге могут быть для любого момента времени записаны в виде

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\Sigma r} &= \sigma_r + p, \\ \sigma_{\Sigma z} &= \sigma_z + p, \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где  $\sigma_r, \sigma_z, p$  – радиальное и осевое напряжения в скелете мезги, и порового давления в масле.

Тогда уравнение (14) может быть записано

$$k_r \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = q(r, z), \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} q(r, z) &= \left\{ a \exp[b(\sigma_r - p)] + c \exp[d(\sigma_r - p)] \right\} \frac{\partial v_r}{\partial r} (\sin \varphi + \cos \varphi) + \\ &+ \left[ a \exp[b(\sigma_z - p)] + c \exp[d(\sigma_z - p)] \right] \frac{\partial v_z}{\partial z} + \\ &+ v_r \left[ ab \exp[b(\sigma_r - p)] + cd \exp[d(\sigma_r - p)] \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma r}}{\partial r} (\sin \varphi + \cos \varphi) + \\ &+ v_z \left[ ab \exp[b(\sigma_z - p)] + cd \exp[d(\sigma_z - p)] \right] \frac{\partial \sigma_{\Sigma z}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (17)$$

Таким образом, мы получили эллиптический тип уравнения Пуассона в частных производных. Решение уравнения (16) сводится к задаче Дирихле – Неймана. В этой задаче краевые условия на части поверхности задаются искомой функцией  $p$  – давления (задача Дирихле), а на части поверхности задаются значения производной  $\frac{\partial p}{\partial n}$  – поток через поверхность (задача Неймана).

Мы получили два эллиптических уравнения Пуассона в частных производных.

В нашем случае нижняя, левая и правая границы непроницаемы. Нормальные граничные условия для непроницаемых границ имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial z} p(z_n, r_j) = p_z(z_n, r_j) = 0. \quad (18)$$

На проницаемой границе условия обычно задаются либо в скоростях потока, либо в давлениях. В нашем случае проницаемой границей является цилиндрическая поверхность зеера. Граничное условие удобно задать в скоростях в виде (задача Дирихле)

$$v_n = -k_\phi \left( \frac{\partial p}{\partial x_n} \right) \Big|_\Sigma. \quad (19)$$

Значение нормальной составляющей скорости должно быть известно для всех точек границы и для всего интервала времени.

По аналогии выхода из формирующего инструмента со шнековым прессом для пластмасс, принимаем производительность по выходу мезги через регулирующее устройство для маслопресса прямо пропорциональна давлению, имеющемуся до выходного отверстия и коэффициенту геометрической формы  $K$ , и обратно пропорциональна вязкости материала [5]:

$$G = \frac{Kp}{\mu}, \quad (20)$$

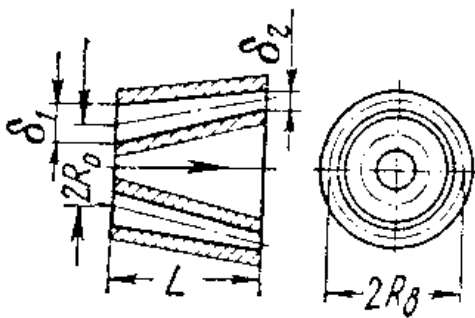


Рис. 4. Конический кольцевой канал с конической щелью

Для расчёта регулирующего устройства целесообразно применить формулу, которая определяет коэффициент геометрической формы кольцевого канала с конической щелью (рис.4)

$$K_\delta = \frac{\pi(R_0\delta_2 - R_1\delta_1)}{6Lm}, \quad (21)$$

где  $m$  – коэффициент, определяемый по формуле

$$m = \frac{(R_0 - R_1)^2}{(R_0\delta_2 - R_1\delta_1)^2} \ln \frac{R_0\delta_2}{R_1\delta_1} - \frac{(R_0 - R_1)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_0\delta_2 - R_1\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2}, \quad (22)$$

где  $R_1, R_0$  – средний радиус окружности соответственно на выходе и на входе материала в кольцевую щель, см;

$\delta_1, \delta_2$  – высота щели соответственно на входе и на выходе материала из кольцевой щели, см;

$L$  – длина конического кольцевого канала с конической щелью, см.

**Выводы.** 1. Используя новое представление об одновременно протекающих взаимосвязанных процессах отжима мезги и фильтрации масла в рабочей зоне витков шнекового пресса, разработана математическая модель, адекватно описывающая процессы изменения пористости мезги и гидродинамического

давления в масле, заполняющего поры «скелета» мезги. Для замыкания системы дифференциальных уравнений получено новое реологическое уравнение, описывающее взаимосвязь коэффициента пористости от суммарного удельного давления при различных температуре и влажности жарения и прессования мезги.

2. Для проведения численных исследований на основании полученной модели необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования по определению следующих реологических свойств мезги: зависимость между вязкостью массы и различными параметрами, влияющими на неё, – масличностью, температурой, скоростью сдвига и продолжительностью внешних воздействий; зависимость коэффициентов фильтрации масла от коэффициентов пористости; объём свободного воздуха в мезге.

## Литература

1. Масликов В.А. Упругие свойства мезги и работа, затрачиваемая на её сжатие /В.А. Масликов //Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 1962. – №2. – с. 130 – 133.

2. Флорин В.А Основы механики грунтов. Том II. Деформация и устойчивость оснований сооружений. /В.А. Флорин – Л. – М.: Стройиздат, 1961. – 544 с.

3. Дидур В.А. Влияние противотоков на режим работы шнекового пресса. /Дидур В.А., Ткаченко В.А., Ткаченко А.В., Дидур В.В. //Праці ТДАТУ – Мелітополь, 2011. – Вип.11, том 4, – С.20 – 34.

4. Масликов В.А. Технологическое оборудование производства растительных масел /Масликов В.А. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 440 с.

5. Рябинин Д.Д. Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей /Д.Д. Рябинин, Ю.Е. Лукач. – М.: Машиностроение, 1965. – 360 с.