УДК 665.1 – 665.3
№ Др0108u005350

Національна академія аграрних наук
Інститут механізації тваринництва

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Директор ІМТ НААН
д.т.н., проф.

_____І.А. Шевченко
« » _____ 2010 р.

ЗВІТ
ЩОДО НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТІ НА ТЕМУ:

«05.1-2/01 Створити наукові основи глибокої переробки та використання біосировини для енергетичного і кормового забезпечення виробництва тваринницької продукції

Розробити програму і методики експериментальної перевірки адекватності математичних моделей процесів волого-теплової обробки, віджимання мезги та фільтрації касторової олії крізь шар мезги у пресі

Науковій керівник завдання
д.т.н., проф. В.А. Дідур

Завідувач лабораторії
кормозабезпечення к.т.н., с.н.с.
Р.І. Безпалов

Запоріжжя, 2010

Виконавці:

Керівник НДР, д.т.н., проф.	В.А. Дідур
Відповідальній виконувач, с.н.с., к.т.н.	В.О. Ткаченко
Молодший науковий співробітник	С.Ж. Панов
Провідний інженер	С.М. Луц

Программа и методика экспериментальной проверки адекватности математической модели процесса влаготепловой обработки мятки

Основы теории

Структурно механические свойства мезги и её маслоотдача при влаготепловой обработке зависят от вида обрабатываемого сырья, исходной влажности мятки, её масличности, времени, температуры и толщины слоя при самопропаривании в жаровни, скорость сушки мезги, температура и влажность при поступлении в пресс.

Таким образом, при подготовке мезги для прессования необходимо обеспечить оптимальные параметры маслоотдачи мезги, структурно механических свойств её для прессования с учётом общей схемы отделения масла и вида масличной культуры.

Требование к структурно-механическому свойству мятки после влаготепловой обработки аналитически можно выразить следующей зависимостью

Бингамовский предел текучести τ_B

$$\tau_B = f_B\left(w_n, M_n, t_n, \theta_n, h, \frac{d\theta}{dt}, \theta_k, w_k \right), \qquad (1.1)$$

Коэффициент маслоотдачи

$$k_M = f_M\left(w_n, M_n, t_n, \theta_n, h\right), \qquad (1.2)$$

где

w_n, w_k – соответственно начальная и конечная влажность мятки;

M_n – начальная масличность мятки;

t_n – время самопропаривания, мин;

θ_n, θ_k – соответственно температура при самопропаривания мятки, температура мезги на выходе из жаровни;

h – высота слоя мезги в чане жаровни при самопропаривания мятки;

$\frac{d\theta}{dt}$ – скорость сушки мезги в жаровне.

Цель работы – получить экспериментальные зависимости влияния технологических режимов влаготепловой обработки мезги семян клещевины, позволяющие замкнуть систему уравнений математической модели влаготепловой обработки и экспериментально проверить адекватность полученной математической модели.

Для выполнения поставленной цели необходимо выполнить следующую программу исследований:

– составить матрицу планирования многофакторного эксперимента;

– провести эксперименты при технологических режимах, заложенных в численных исследованиях математической модели и построенной матрице;

– рассчитать коэффициенты уравнения регрессии и проверить адекватность линейного уравнения регрессии;

– при необходимости провести факторный эксперимент второго порядка и получить уравнение регрессии второго порядка. Изучение поверхности отклика, отыскание условного экстремума;

– определить качественные показатели касторового масла и жмыха при лучших технологических режимах;

– замкнуть систему уравнений математической модели полученным уравнением регрессии, ограничивающим применения жёстких технологических режимов.

Описание экспериментальной установки

Цилиндрический кожух *1* с опорой на три ножки является несущим элементом конструкции стерилизатора. Кроме того, он позволяет уменьшить тепловые потери и служит для защиты оператора от ожогов.

Стерилизационная и водопаровая камеры автоклава выполнены из нержавеющей стали и представляют собой единую сварную конструкцию; при этом они разобщены функционально. Вентиль *2* дает возможность перекрыть поступление пара в стерилизационную камеру во время эжекции, загрузки и разгрузки материала, позволяя сохранить рабочее давление в водопаровой камере для проведения последующих циклов стерилизации.

Крышка *14* автоклава через кольцевую резиновую прокладку при помощи шести винтовых прижимов *13* создает необходимую герметичность рабочей камеры.

Вода заливается в водопаровую камеру через воронку *18*. Для наблюдения за уровнем воды в водопаровой камере автоклава служит стекло водоуказательной колонки *4*.

Сушка простерилизованного материала производится под вакуумом, который создается с помощью эжектора *12*. По окончании эжекции для восстановления в стерилизационной камере нормального атмосферного давления в нее подается через фильтр *19* очищенный воздух. Указателем давления внутри стерилизационной камеры служит мановакуумметр *17*.

Через вентиль *16* осуществляется выпуск конденсата, а также происходит периодическая продувка стерилизационной камеры паром в процессе стерилизации.

Нагрев воды осуществляется электронагревателями *7*, установленными в нижней части водопаровой камеры. Для защиты электронагревателей от перегорания в случае понижения уровня воды в водопаровой камере ниже минимального, предусмотрено специальное устройство, автоматически отключающее электронагреватели. О понижении уровня воды ниже минимального сигнализируется включением сигнальной лампы *25* “Воды нет”.

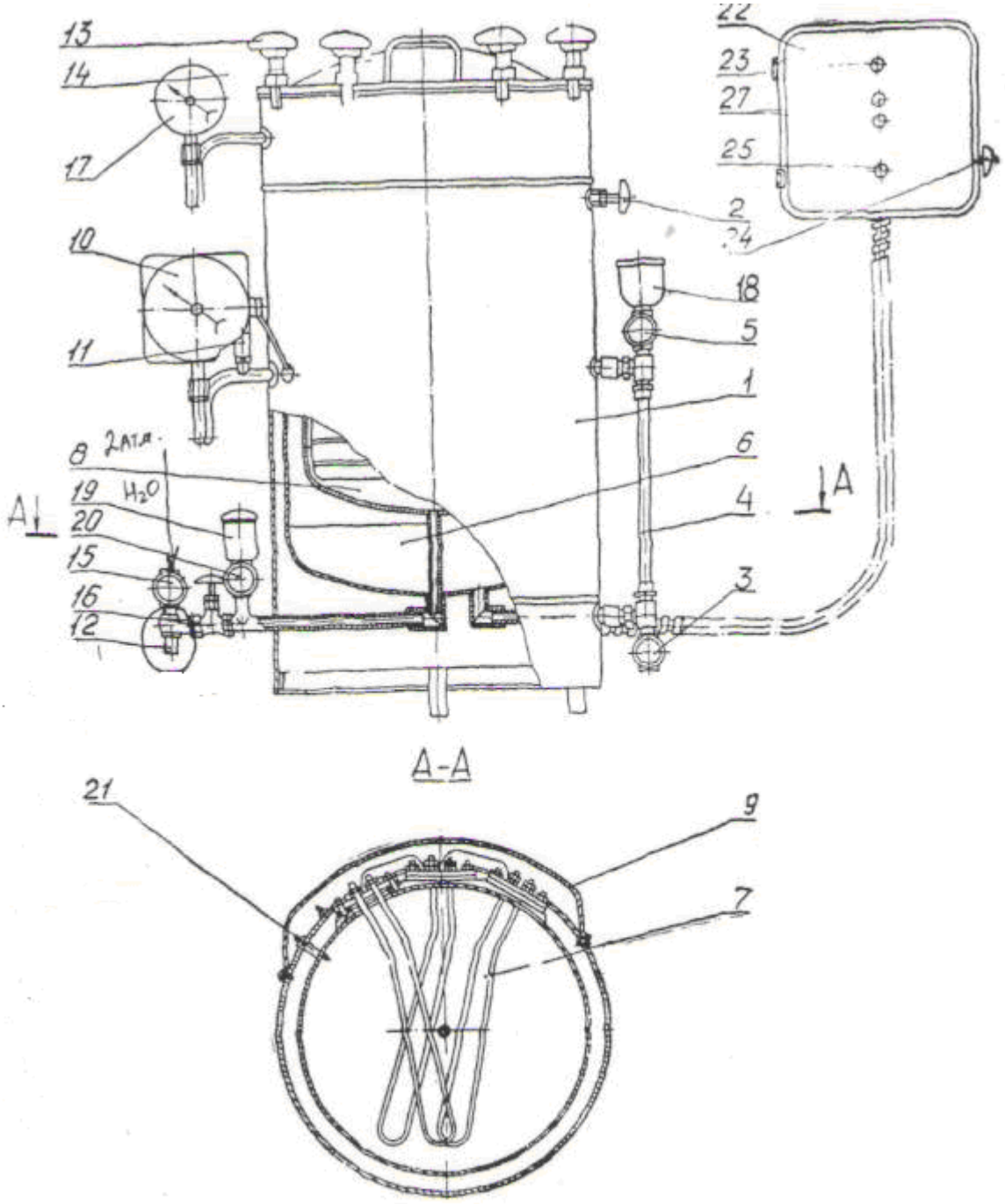


Рис. 1. Стерилизатор паровой ВК-75

1-кожух, 2-вентиль, 3-вентиль, 4-колонка водоуказательная, 5-вентиль, 6-камера водопаровая, 7-электронагреватель, 8-камера стерилизационная, 9-коробка, 10-манометр электроконтактный, 11-клапан предохранительный, 12-эжектор, 13-прижим, 14-крышка, 15-вентиль, 16-вентиль, 17-мановакуумметр, 18-воронка, 19-фильтр, 20-вентиль, 21-датчик уровня, 22-электрощит, 23-лампа сигнальная, 24-рукоятка выключателя, 25-лампа сигнальная, 27-предохранитель.

Рисунок 2 – Общий вид стерилизатора
парового

Порядок работы

1. Открыть вентили *2*, *5*, *16*.
2. Залить воду через воронку *18* до верхней риски на водоуказательной колонке *4*.
3. После заполнения водопаровой камеры водой закрыть вентили *2*, *5*, *16*.
4. Поставить стрелки электроконтактного манометра в положение, указывающее пределы автоматического поддержания давления (2 кгс/см^2). При этом нижнюю стрелку устанавливают по нижнему предельному значению рабочего давления (1,9 кгс/см^2), а верхнюю – по верхнему предельному значению рабочего давления (2,1 кгс/см^2).
5. Загрузить в стерилизационную камеру исследуемый образец, опустить крышку и подтянуть ее прижимами.

6.1 Включить выключатель *24*, при этом загорится сигнальная лампа *23*.

6.2 По достижении давления пара в водопаровой камере, соответствующего значения (2 кгс/см^2) следует открыть вентиль *2*, а затем вентиль *16* на ½ - 1 ½ îборота. При этом давление пара в стерилизационной камере должно быть в пределах 0,1-0,2 кгс/см^2. Вытеснение воздуха из стерилизационной камеры должно продолжаться не менее 10 минут.

6.3 Закрыть вентиль *16* по окончании продувки и довести давление в стерилизационной камере до величины 2,0±0,2 кгс/см^2. При достижении заданного рабочего давления отметить время начала стерилизации.

6.4 Стерилизация в автоклаве при давлении 2,0±0,2 кгс/см^2 осуществляется в течении 20±2 минут.

6.5 Для обработки материала острым паром вентиль *16* приоткрыть на 30 секунд. При этом происходит продувка стерилизационной камеры насыщенным паром.

6.6 По истечении времени стерилизации закрыть вентиль *2*, выпустить пар и конденсат из стерилизационной камеры через вентиль *16* до выравнивания давления в стерилизационной камере до уровня атмосферного.

6.7 Открыть крышку стерилизатора и выгрузить обработанный материал.

Методика проведения исследований

Мятку семян клещевины производят грубым измельчением. Степень измельчения нужно контролировать по количеству не раздавленных семян. При грубом измельчении часть семян в значительной мере деформируется.

Перед основной влаготепловой обработкой производится инактивация ферментной системы мятки увлажнением и нагревом в течение 30 – 40 с насыщенным острым паром до влажности 9,0 – 10,0% и температуры 85 – 90°С,

При влаготепловой обработке мятки семян клещевины выбираем два критерия оптимизации:

– коэффициент маслоотдачи $k_м$ при прессовании и обеспечении качественных показателей масла и жмыха;

– бингамовский предел текучести τ_B мезги, обеспечивающий оптимальные режимы работы шнекового пресса при предварительном прессовании двухступенчатого отжима.

Так как в качестве лабораторной установки выбран стерилизатор паровой ВК-75, то его техническая характеристика позволяет варьировать некоторыми факторами, в том числе использовать глухой пар выше 2 ат. Поэтому для проведения исследований выбираем следующие входные параметры (факторы): x_1 – исходная влажность мятки, %; x_2 – время самопропарки, мин; x_3 – время сушки; x_4 – конечная температура мезги.

Остальные входные параметры принимаем за постоянные: масличность мятки, давление глухого пара, равное 2 ат; высота слоя мезги в чане жаровни при самопропаривания мятки, равная 250 мм; влажность мезги, идущей в пресс, 5,0 – 6,0%.

Таблица 1 – Факторы, влияющие на выбранные критерии и их нижний и верхний уровни

Название	X_1	X_2	X_3	X_4
Нулевой уровень	11,5	50	12	100
Интервал варьирования	2	10	4	5
Верхний уровень	13,5	60	16	105
Нижний уровень	9,5	40	8	95

Таблица 2 – Матрица полного факторного эксперимента типа 2^4

№ опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	$k_м$	τ_B	Кодовое обозначение эксперимента 2^4
1	+	+	+	+			$X_1X_2\ X_3X_4$
2	–	+	+	+			$X_2\ X_3X_4$
3	+	–	+	+			$X_1X_3X_4$
4	–	–	+	+			X_3X_4
5	+	+	–	+			$X_1X_2X_4$
6	–	+	–	+			X_2X_4
7	+	–	–	+			X_1X_4
8	–	–	–	+			X_4
9	+	+	–	+			$X_1X_2X_3$
10	–	+	+	–			X_2X_3
11	+	–	+	–			X_1X_3
12	–	–	+	–			X_3
13	+	+	–	–			X_1X_2
14	–	+	–	–			X_2
15	+	–	–	–			X_1
16	–	–	–	–			(1)

Критерии оптимизации коэффициент маслоотдачи $k_м$ и бингамовский предел текучести τ_B определяются на лабораторном прессе при законе сжатия мезги $\varepsilon_{ш.в.} = n^{1,145}$ с моделированием частоты вращения шнекового вала 12 об/мин, т.е. временем выдержки на каждой ступени сжатия 5 с.

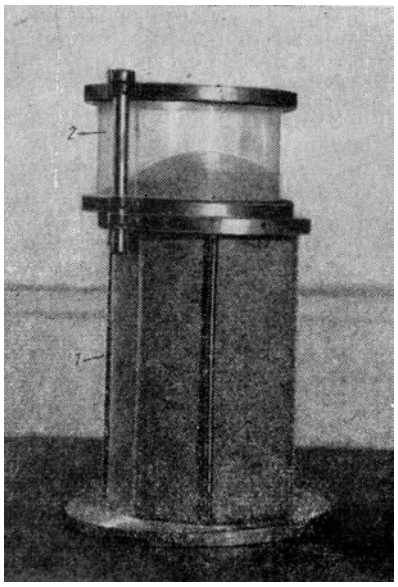
Коэффициент маслоотдачи $k_м$ определяется по соотношению количества отжатого масла при полном сжатии $\varepsilon_{ш.в.} = 9^{1,145}$ к количеству масла, находящегося в исходной мезге:

$$k_м = \frac{G_{пр}}{G_м}, \qquad (1.3)$$

где $G_{пр}$ – количества отжатого масла; $G_м$ – количеству масла, находящегося в исходной мезге.

Количество отжатого масла определяется взвешиванием масла, отжатого при всех восьми ступенях. Количество масла, находящегося в исходной мезге определяется по массе исходной мезге и её масличности.

Бингамовский предел текучести τ_B определяется визуально: если при прессовании мезга выходит через зазоры между зеерными планками, то полученная мезга бракуется по пределу текучести, в противном случае мезга по пределу текучести принимается. При браковке мезги режимы влаготепловой обработки меняются и соответственно корректируется матрица эксперимента.



Определение объёмной (насыпной) массы с помощью стакана с шарнирной рамкой. Прибор состоит из стакана 1 и шарнирной рамки. Измеряемую массу засыпаются свободно с помощью большого совка с высоты верхнего края рамки 2 до заполнения её. Осторожным поворотом шарнирной рамки верхний слой материала срезают по краю стакана 1, после чего производят взвешивание с материалом с точностью ±25 г. При этом необходимо избегать толчков и ударов во избежание изменения плотности укладки.

Предварительно в исследуемой массе определяются масличность и влажность. Объёмную массу определять во всех 16 опытах по трём повторностям.

Рисунок 3 Стакан с шарнирной рамкой

Расчёт ведут по формуле

$$\rho_{об} = \frac{m_1 - m_2}{V} \cdot 1000$$

где $\rho_{об}$ – объёмная масса, кг/м^3;

m_1 – масса стака с семенами, кг;

m_2 – масса пустого стакана, кг;

V – объём стакана, л.

Перед началом эксперимента в мятке и в конце влаготепловой обработки определяются следующие качественные показатели масла и белка:

Определение кислотного числа – по ГОСТ 5476 – 80.

Определение перекисного числа – по ГОСТ

Определение йодного числа – по ГОСТ 5475 – 69 (метод Кауфмана).

Определение влажности исследуемой массы производить методом высушивания образцов до постоянной массы по ГОСТ 5947 – 68.

Определение фракционного состава белковых веществ семян и продуктов их переработки по растворимости в различных растворителях [1, с. 297 – 303].

Обработка опытных данных

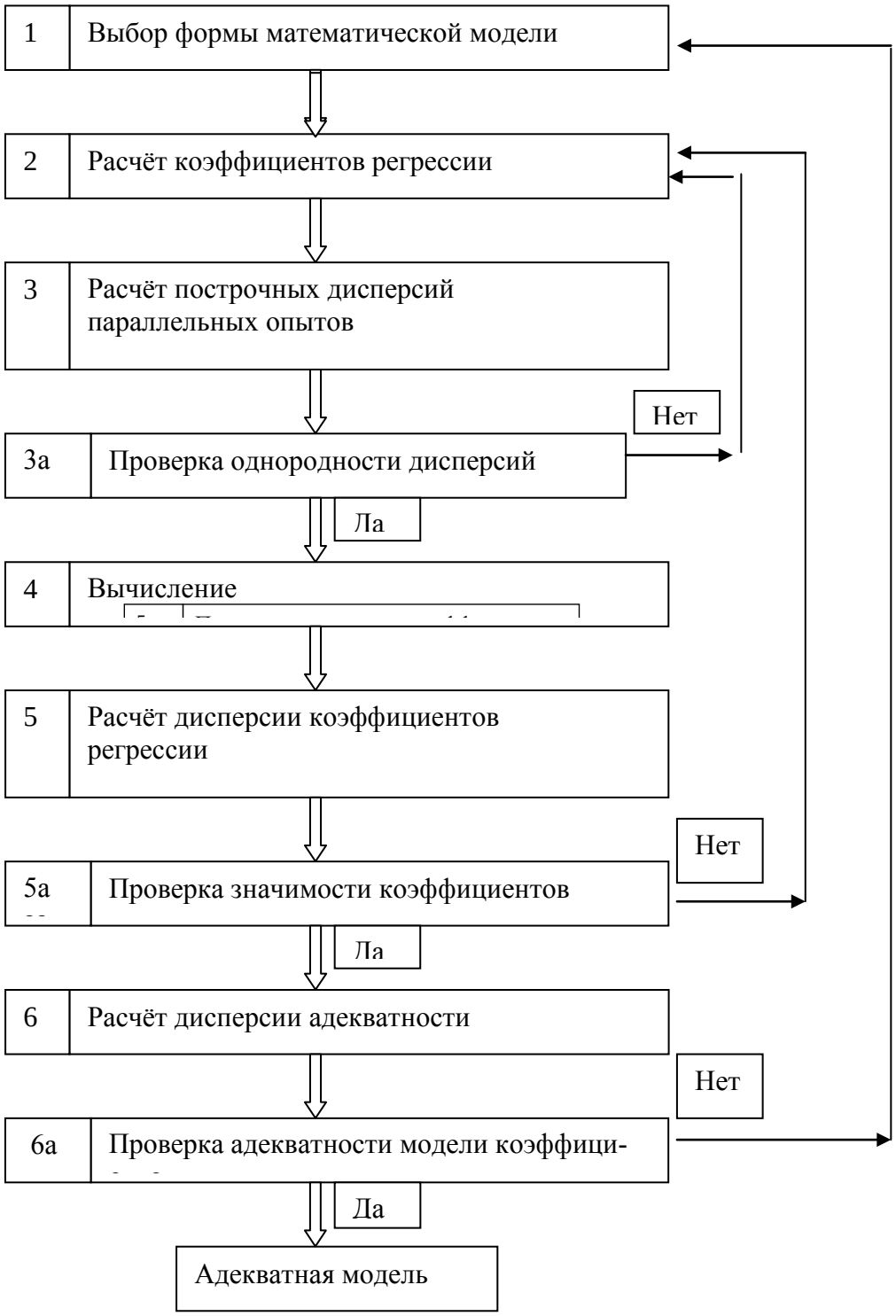


Рисунок 4 – Алгоритм расчёта и анализа математической модели экспериментально-статистическими методами

Таблица 3 – Формулы расчёта по плану ПФЭ 2^n

Блоки	Формулы расчёта	Обозначения
1	$\hat{y} = \sum_{i=1}^{n} b_i x_i, (i = 0,1,..,n);$ или $\hat{y} = \mathbf{B}^{\mathbf{T}}\mathbf{X}$	$\hat{y}$ – переменная состояния (расчётная); $\mathbf{X}, x_i$ – факторы; $\mathbf{B}, b_i$ – коэффициенты уравнения регрессии; n – число факторов;
2	$b_i = \frac{1}{N}\sum_{u=1}^{N} x_{iu} y_u, (i = 0,1,...,n)$ $\mathbf{B} = (\mathbf{X}^{\mathbf{T}}\mathbf{X})^{-1}\mathbf{XY}$	$\mathbf{Y}, y_u$ – переменная состояния (экспериментальная); $\mathbf{X}^T$ – транспортированная матрица $\mathbf{X}$;
3	$s_u^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{k=1}^{m}(y_{uk} - \bar{y}_u)^2;$ $\bar{y}_u = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} y_{uk};$	N – число опытов; s_u^2 – построчная дисперсия; y_{uk} – переменная состояния (в параллельных опытах);
	$G_p = s_{umax}^2 / \sum_{u=1}^{N} s_u^2$	G_p – расчётное значение критерия Кохрена;
3а	Условие однородности дисперсии $G_p < G_T(q, f_1, f_2);$ $f_1 = m - 1;$	m – число параллельных опытов; G_T – табличное значение критерия Кохрена; f_1, f_2 – число степеней свободы;
4	$s_0^2 = \frac{1}{N}\sum_{u=1}^{N} s_u^2;$ $s_{bi}^2 = s_0^2/N;$	q – уровень значимости s_0^2 – ошибка опыта (дисперсия воспроизводимости); s_{bi}^2 – дисперсия коэффициентов;
5	$t_{ip} \lvert b_i \rvert / s_{bi}$	t_{ip} – расчётное значение критерия Стьюдента;
5а	Условие значимости коэффициентов $t_{ip} > t_T(q, f);$ $f = N(m-1)$	s_{bi} – среднеквадратичные отклонения t_T – табличное значение критерия Стьюдента; f – число степеней свободы
6	$s_{ад}^2 = \frac{m}{(N-n-1)}\sum_{u=1}^{N}(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$ $F_p = s_{ад}^2/s_0^2$	$s_{ад}^2$ – дисперсия адекватности; F_p – расчётное значение критерия Фишера
6а	Условие адекватности модели $F_p < F_T(q, f_1, f_2);$ $f_1 = N - n - 1;$ $f_2 = N(m-1)$	F_T – табличное значение критерия Фишера; f_1, f_2 – число степеней свободы

Программа и методики экспериментальной проверки адекватности математических моделей процессов отжима и фильтрации касторового масла через слой мезги в прессе

Основы теории

Процесс отжима масла в шнековом прессе из мезги, как двухфазной или трёхфазной системы связан как с явлениями ползучести «скелета» мезги, так и с явлениями фильтрационного выдавливания масла. Основы теории совместного рассмотрения этих процессов заложены в теории консолидации и ползучести механики грунтов. Одновременный учёт этих двух основных процессов в мезге исключительно важен и приводит к выяснению значительных эффектов. Консолидацией называют процесс уплотнения полностью или частично насыщенного поровой жидкостью материала. При этом свойства скелета в отношении его деформируемости не ограничиваются какой-либо определённой расчётной моделью, а могут быть принятыми любыми.

Поэтому предлагаемая теория прессования растительных масел из мезги масличных семян основывается на теории уплотнений или консолидации земляных масс в предположениях как полного насыщения пор грунта водой, так и наличия в них некоторого количества газа (воздуха, водяных паров). Процесс выжимания поровой жидкости при консолидации отличается от явлений, рассматриваемых в классических теориях фильтрации и миграции.

Основными исследованиями закономерностей фильтрационных явлений занимается теория фильтрации. В фильтрационных расчётах вода обычно рассматривается как несжимаемая ньютонова жидкость с незначительной вязкостью, скелет считается неподвижным, пористость материала в течение процесса фильтрации принимается неизменной.

Особенностью процесса выжимания поровой жидкости при консолидации, отличающего его от явлений, рассматриваемых в классических теориях фильтрации и миграции, заключается в непрерывном уменьшении пористости материала. Пористость уменьшается до тех пор, пока сжавшийся скелет не уравновесит своим сопротивлением дальнейшему уплотнению сжимающее давление. Основное отличие заключается в непрерывном уменьшении пористости материала. Пористость уменьшается до тех пор, пока сжавшийся скелет не уравновесит своим сопротивлением дальнейшему уплотнению 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. Разработка теории о распределении для любого момента времени давления в поровой жидкости является основной задачей теории консолидации.

Основной задачей процесса консолидации является вопрос о распределении для любого момента времени давлений в жидкости, заполняющей поры скелета прессуемого материала.

Для математического описания процессов консолидации квазидвухфазной мезги в соответствии с требованиями обобщённой модели Флорина – Био, необходимо задать:

А. Реологические уравнения состояния фаз.

В. Характер взаимодействия фаз.

С. Изменение соотношения фаз в единице объёма.

Рассмотрим последовательно эти условия.

В качестве уравнения состояния «скелета» мезги предлагается использовать следующую зависимость связывающее объёмную деформацию $e_v = e_{xx} + e_{yy} + e_{zz}$ с сумой нормальных напряжений $\sigma_v = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$

Изучение диаграмм прессования для клещевинной мезги показало, что зависимость между давлением, которое испытывает мезга, и степенью её сжатия, влажностью при определённой температуре описывается уравнением степенного вида

$$\sigma_{\text{v}} = \frac{2.52b\varepsilon_{\text{v}}^{5,0}}{e^{0.022w}}, \tag{1.4}$$

где σ_{v} – удельное давление, кг/см^2;

ε_{v} – степень сжатия мезги;

w – влажность мезги, %;

e – основание натуральных логарифмов;

b – эмпирический коэффициент, зависящий от влажности мезги и температуры её жарения; значение этого коэффициента находится по таблице.

Из уравнения (1.16) найдём значение объемной степени сжатия ε_{v}:

$$\varepsilon_{\text{v}} = A\sigma^{1/5}, \tag{1.5}$$

где $A = \left(\dfrac{e^{0,022w}}{2,52b} \right)^{1/5}$.

Закон объёмного сжатия в форпрессе ФП описывается зависимостью

$$\varepsilon_{\text{v}} = n_{ш}^{k}, \tag{1.6}$$

где $n_{ш}$ – номер шнечка на шнековом валу пресса;

k – показатель степени, обеспечивающий закон сжатия в зеерной камере пресса. В прессе ФП количество шнечков $n = 9$, показатель степени $k = 1{,}145$.

При рассмотрении пространственной задачи и наличии осевой симметрии будем для упрощения полагать, что коэффициенты фильтрации, равные в вертикальном положении k_r и в горизонтальном направлении k_z постоянные. Тогда основное уравнение консолидации для работы в шнековом прессе в цилиндрической системе координат

$$\begin{aligned} &A\left[\sigma_r^{1/5} \frac{\partial v_r}{\partial r}\left(\sin\varphi + \cos\varphi\right) + \sigma_{\text{z}}^{1/5} \frac{\partial v_z}{\partial \text{z}} \right] + \\ &+\frac{1}{5}A\left[v_r \sigma_r^{-4/5} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r}\left(\sin\varphi + \cos\varphi\right) + v_z \sigma_{\text{z}}^{-4/5} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right] = \\ &= \frac{1}{\rho} k_r \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho} k_z \frac{\partial^2 p}{\partial \text{z}^2}. \end{aligned} \tag{1.7}$$

В мезге, полностью насыщенной маслом, соотношение фаз в единице объёма, очевидно, контролируется её пористостью $n = V_{\text{п}} / V$ или коэффициентом пористости $\varepsilon = V_{\text{п}} / V_{\text{т}}$.

Для этого случая мезги закономерность изменения пористости выводится аналитически на основе закона фильтрации жидкости в порах мезги и условии неразрывности твёрдой и жидкой фаз. В качестве расчётной нами получено следующее уравнение фильтрации масла через слой мезги в шнековом прессе в прямоугольной системе координат

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\left(1+\varepsilon_{cp}\right)\left(\mathrm{v}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ck}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\left(\sin\varphi + \cos\varphi\right) + \mathrm{v}_{\mathrm{z}}^{\mathrm{ck}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{z}} \right) + \\ + \left(1+\varepsilon_{cp}\right)\frac{1}{\rho\eta} k_r \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} \right) + \left(1+\varepsilon_{cp}\right)\frac{1}{\rho\eta} k_{\mathrm{z}} \frac{\partial^2 p}{\partial \mathrm{z}^2}. \tag{1.8}$$

Тогда скорость изменения жидкой фаза в единице объёма при фильтрации масла через слой мезги можно представить в прямоугольной системе координат

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{\left(1+\varepsilon_{cp}\right)}\left(\mathrm{v}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ck}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\left(\sin\varphi + \cos\varphi\right) + \mathrm{v}_{\mathrm{z}}^{\mathrm{ck}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{z}} \right) + \\ + \frac{1}{\left(1+\varepsilon_{cp}\right)}\frac{1}{\rho\eta} k_r \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{\left(1+\varepsilon_{cp}\right)}\frac{1}{\rho\eta} k_{\mathrm{z}} \frac{\partial^2 p}{\partial \mathrm{z}^2}. \tag{1.9}$$

где

n – содержание жидкой фазы в единице объёма;

m – содержание твёрдой фазы в единице объёма;

$n + m = 1$.

Из теории фильтрации известно, что скоростью фильтрации называется расход жидкости через единицу геометрической площади сечения материала

$$u = \frac{Q}{\omega}, \tag{1.10}$$

где ω – геометрическая площадь сечения, через которую проходит расход Q.

Опытами Дарси установлено, что скорость фильтрации пропорциональна разности напоров и обратно пропорциональна соответствующей длине пути фильтрации. Отсюда, полагая, что скорость фильтрации направлена по оси s

$$u = -k\frac{H_2 - H_1}{\Delta s}, \tag{1.11}$$

Или в дифференциальной форме

$$u = -k\frac{\partial H}{\partial s}, \tag{1.12}$$

где H – напор;

k – коэффициент пропорциональности, причём знак минус указывает, что движение жидкости направлено в сторону уменьшающихся напоров.

$$H = \frac{p}{\gamma} + z, \tag{1.13}$$

Где p – давление в жидкости в рассматриваемой точке;

z – высота над плоскостью сравнения.

Коэффициент пропорциональности k называется коэффициентом фильтрации. Полагая $\frac{\partial H}{\partial s}=1$, находим, что $u=-k$. Отсюда видно, что коэффициент фильтрации численно равен величине скорости фильтрации при градиенте напора, равном единице. Коэффициент фильтрации зависит от характера фильтрующей жидкости

$$k=k_0\frac{g}{\nu}, \tag{1.14}$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости;

g – ускорение силы тяжести;

k_0 – проницаемость материала (мезги), характеризуется только его геометрическими свойствами, не завися от характера фильтрующей жидкости.

Цель работы – экспериментально получить уравнение состояния среды, связывающее компоненты напряжения, деформации и их производные по времени, зависимости коэффициентов фильтрации от степени сжатия и времени фильтрации, позволяющие замкнуть системы уравнений математических моделей процессов отжима и фильтрации; уточнить параметры процесса консолидации при обработки мезги семян клещевины.

Для выполнения поставленной цели необходимо выполнить следующую программу исследований:

– экспериментально получить уравнение состояния среды, связывающее компоненты напряжения, деформации и их производные по времени;

– экспериментально уточнить основные параметры процесса консолидации при переработке мезги семян клещевины в шнековом прессе;

– определить основные факторы, влияющие на процесс фильтрации касторового масла через слой мезги в шнековых прессах;

– экспериментально определить зависимости коэффициентов фильтрации от степени сжатия и времени фильтрации;

– определить качественные показатели касторового масла и жмыха при лучших технологических режимах;

– замкнуть систему уравнений математической модели консолидации при переработке мезги семян клещевины в шнековом прессе.

Описание экспериментальной установки

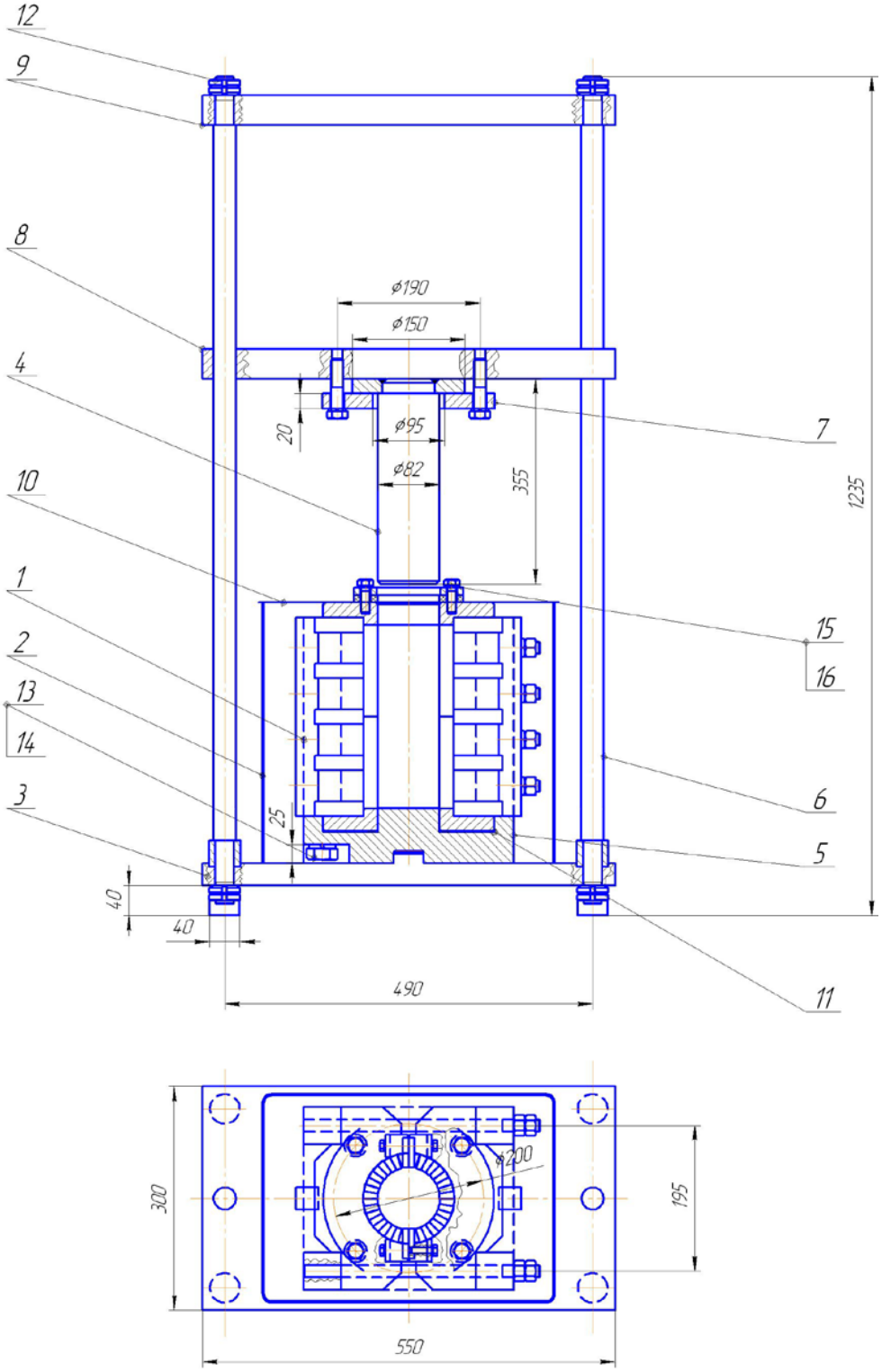


Рисунок 5 – Пресс лабораторный:

1 – камера зеерная; 2 – ёмкость; 3 – основание; 4 – толкатель; 5 – плита; 6 – направляющая; 7 – фланец; 8 – траверса; 9 – балка; 10 – крышка; 11 – прокладка; 12 – фланец; 13 – прокладка.

Проведення експериментів виконується за допомогою спеціально сконструйованою та виготовленої експериментальної установки. Загальний вигляд експериментальної установки наведений на рис. 5, рис. 6 . Експериментальна установка представляє собою лабораторний прес основою якого є зеєрна камера 1, розміщена в ємності 2, розташовані на плиті 5. При експериментах виготовлена мезга переміщається в зеєрну камеру і за допомогою штока 4, до якого прикладаються зусилля, створюється осьова деформація, що викликає об'ємні напруження. Натуральні зразки лабораторного пресу наведено на рис.7, та зеєрної камери на рис.8. Плита 5 зеєрної камери являється пристроєм для виміру внутрішнього тиску рис 9, в яку встановлюєтья тензо-балка з тензо-датчиками рис 10.

Рис. 6 3D зображення лабораторної установки преса

1 – зеєрна камера; 2 – ємність; 3 – основа; 4 – штовхач; 5 – плита; 6 – спрямовуюча; 7 – фланець; 8 – траверса; 9 – балка; 10 – кришка.

Рис. 7 Натуральний вигляд лабораторного пресу

Рис. 8 Зеєрна камера лабораторного пресу

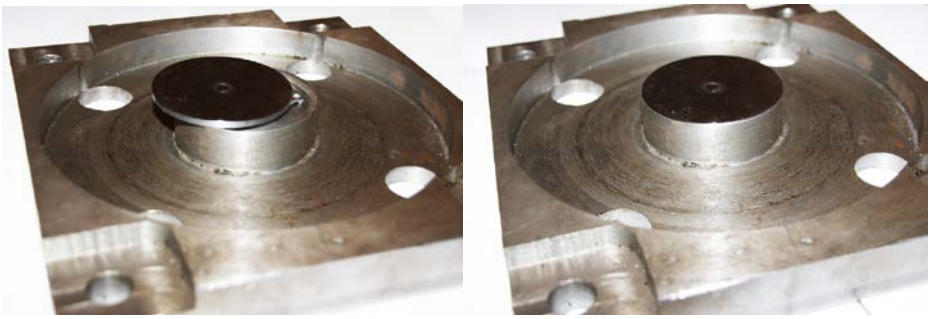


Рис. 9 Плита виміру внутрішнього тиску зеєрної камери

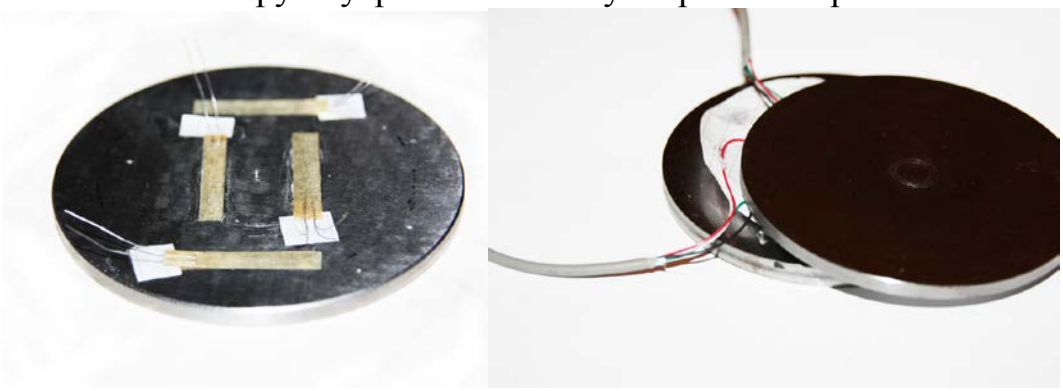


Рис. 10 Тензо-балка з тензо-датчиками.

Процес віджимання олії із насінням рицини, в першу чергу ,залежить від властивостей м'ятки насіння, а потім від структурно-механічних властивостей мезги отриманих при волого-тепловій обробці.

Приготовлена за режимами наведеними в (3.4) мезга закладається в попередньо підігріту до температури 80-85 ^{0}C, зеєрну камеру (рис. 8). Зеєрну камеру встановлюємо під прес, шток встановлюємо в зеєр. За допомогою пресса (рис.11) через шток зерної камери виконуємо одноосьове стискання мезги за встановленим раніше режимом стискання.

Рисунок 11 – Пресс лабораторный на испытательном стенде

Рисунок 12 – Исследование процесса прессования на лабораторном стенде

Перед початком випробувань проводилось тарування датчиків. За отриманими даними був побудований графік залежності деформації тензобалки від навантаження (рис. 13).

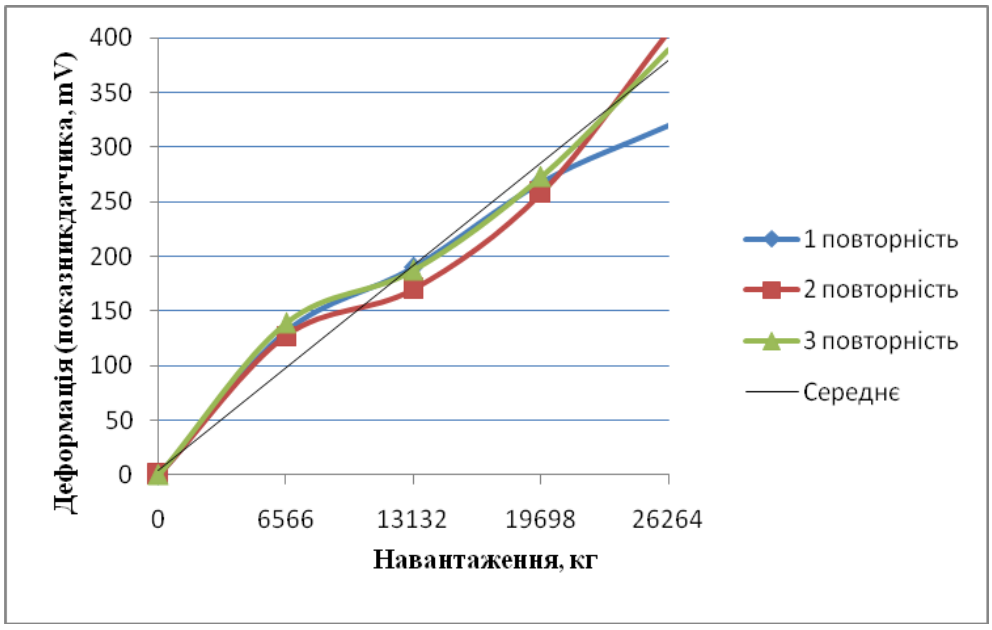


Рис. 13 Діаграма тарування тензоблока

Методика проведения исследований процесса отжима мезги в прессе

Экспериментальная проверка закона сжатия мезги семян клещевины в шнековом форпрессе. За основы закона сжатия мезги выбран закон сжатия в форпрессе ФП

$$\varepsilon_{ш.в.} = \frac{V_1}{V_n} = n^{1,145} \qquad (1.15)$$

где n – номер шнечка шнекового вала. Таким образом, общий закон сжатия мезги на шнековом валу можно представить следующей зависимостью

$$\varepsilon_{ш.в.} = \frac{V_1}{V_n} = n^k. \qquad (1.16)$$

В табл.4 представлены варианты для экспериментальной проверки законов сжатия с различным показателем степени k.

Таблица 4 – Варианты законов сжатия мезги на шнековом валу

Показатель Степени k	Номер шнечка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,145	1	2,21	3,52	4,89	6,31	7,78	9,28	10,81	12,38
1,045	1	2,063	3,152	4,257	5,376	6,504	7,641	8,745	9,935
0,945	1	1,925	2,824	3,706	4,576	5,437	6,289	7,135	7,976
0,845	1	1,796	2,530	3,227	3,896	4,545	5,177	5,796	6,402
0,745	1	1,676	2,267	2,809	3,317	3,799	4,262	4,708	5,139

Для моделирования заданных степеней сжатия (табл.4) в зерном цилиндре лабораторной установки необходимо опускать поршень, обеспечивая высоту сжатой мезги до величин указанных в табл.5

Таблица 5– Высота сжатой мезги (мм) в зерном цилиндре, обеспечивающая заданную степень сжатия в каждом из шнечков

Показатель Степени k	Номер шнечка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,145	300	136	85	61	47	38	32	28	24
1,045	300	145	95	70	56	46	39	34	30
0,945	300	156	106	81	65	55	48	42	38
0,845	300	167	119	93	77	66	58	52	47
0,745	300	179	132	107	90	79	70	64	58

Измерение высоты сжатой мезги производится линейкой. Давления, создаваемое поршнем в мезге в осевом и радиальном направлениях, измеряются с помощью тензодатчиков, выполненных в виде пластин. Каждый опыт проводится в трёхкратной повторности.

Частота вращения шнекового вала форпресса ФП 12 – 25 об/мин. Частота вращения шнекового вала пресса, а значит, время сжатия мезги в каждом шнечке и фильтрация масла через слой мезги моделируется временем выдержки поршня лабораторной установки на каждой ступени сжатия. Для моделирования времени выдержки в лабораторных исследований принимаем диапазон частоты вращения шнекового вала пресса от 12 до 24 об/мин, с шагом 3 об/мин. Время выдержки при каждой ступени сжатия определяется из выражения

$$t = 60/\mathrm{n} \qquad (1.17)$$

где 60 – количество с в мин, n – частота вращения шнекового вала об/мин; t – время выдержки поршня при каждой ступени сжатия, с. Диапазон частот вращения шнека и соответствующее время выдержки приведены в таб.6.

Таблица 6 – Диапазон частот вращения шнека (об/мин) и соответствующее время выдержки (t)

Частота вращения вала, об/мин	12	15	18	21	24
Время выдержки на каждой ступени, с	5	4	3,3	2,8	2,5

После отработки режимов влаготепловой обработки мезги проводится серия опытов отжима масла при законе сжатия с показателем $k = 1{,}145$ и время выдержки каждой ступени сжатия согласно табл. 6. При проведении опытов замеряются напряжения и делается отбор масла при каждой ступени сжатия. По отобранным навескам масла согласно выражению (1.3) определяются коэффициенты маслоотдачи $k_{\text{м}}$ для каждой ступени отжима.

По результатам измерений строятся графики с различными параметрами t

$$\sigma = \varphi_1(\varepsilon_{\text{v}}) \qquad (1.18)$$

$$k_{\text{м}} = \varphi_2(\varepsilon_{\text{v}}) \qquad (1.19)$$

По плавности кривой фильтрации масла (1.17) делается вывод о правильности подбора степени сжатия каждого шнечка. По суммарному выходу масла выбирается лучший вариант время выдержки каждой ступени сжатия. Остальные варианты закона сжатия мезги в прессе согласно табл. 5 определяются при выбранном времени выдержки каждой ступени. Во всех этих опытах определяются

напряжения в мезге и коэффициенты маслоотдачи. По результатам измерения строятся графики (1.16) и (1.17).

При каждом опыте определяются объёмная масса и масличность исходной мезги и отжатого жмыха.

Перед началом эксперимента в мятке и в конце эксперимента в жмыхе определяются следующие качественные показатели масла и белка:

Определение кислотного числа – по ГОСТ 5476 – 80.

Определение перекисного числа – по ГОСТ

Определение йодного числа – по ГОСТ 5475 – 69 (метод Кауфмана).

Определение влажности исследуемой массы производить методом высушивания образцов до постоянной массы по ГОСТ 5947 – 68.

Определение фракционного состава белковых веществ семян и продуктов их переработки по растворимости в различных растворителях.

Методика проведения исследований фильтрации касторового масла через слой мезги в прессе

Определение фиктивного коэффициента фильтрации

При каждой ступени сжатия отбираем отжатое масло, определяем его объём в см^3. По объёму отфильтрованного масла, времени выдержки при каждой ступени сжатия и площади фильтрации определяем скорость фильтрации масла

$$u = \frac{V_м}{\omega\, t} \tag{1.20}$$

где $V_м$ – объём навески масла, см^3;

t – времени выдержки при каждой ступени сжатия (с), определяется по формуле (1.15);

$\omega = \pi D h$ – площадь фильтрации масла через мезгу в зеерной камере, см^2;

D – внутренний диаметр зеера, см;

h – высота сжатой мезги (см) в зерном цилиндре при замеряемой ступени сжатия;

u – скорость фильтрации (см/с) при замеряемой ступени сжатия.

По закону Дарси скорость фильтрации масла через слой мезги по радиусу зеерного цилиндра можно выразить формулой

$$u = -k\frac{p_1 - p_2}{\rho r}; \tag{1.21}$$

Отсюда коэффициент фильтрации равен

$$k = -\frac{u\rho r}{p_1 - p_2}, \tag{1.22}$$

где ρ – плотность поровой жидкости (масла);

p_1 – гидродинамическое давление в паровой жидкости по оси зеерного цилиндра;

p_2 – гидродинамическое давление в паровой жидкости на выходе из зеерного цилиндра. Принимаем давление $p_2 = 0$.

Так как гидродинамические давление в поровой жидкости мы замерить не можем, принимаем $p_1 = \sigma_r$. Поэтому вместо коэффициентов фильтрации мы

определяем фиктивные коэффициенты фильтрации. После проведения экспериментов приближённо определяем гидродинамическое давление в поровой жидкости по уравнению (1.5).

Расчётная площадь фильтрации масла через мезгу в зеерной камере при каждой ступени сжатия в экспериментах согласно табл.5 представлена в табл.7.

Таблица 7 – Высота сжатой мезги (мм) в зерном цилиндре и площадь фильтрации (см^2) масла через мезгу в зеерной камере

к	ω	Номер шнечка								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,145		300	136	85	61	47	38	32	28	24
	ω	772	350	218	157	121	98	82	72	62
1,045		300	145	95	70	56	46	39	34	30
	ω	772	373	245	180	144	118	100	87	77
0,945		300	156	106	81	65	55	48	42	38
	ω	772	401	273	208	167	142	124	108	98
0,845		300	167	119	93	77	66	58	52	47
	ω	772	430	306	239	198	170	149	134	121
0,745		300	179	132	107	90	79	70	64	58
	ω	772	461	340	275	232	203	180	164	149

На основании полученных данных строят графики фиктивного коэффициента фильтрации при зависимости деформации при показателе степени к=0,145 при различном времени сжатия согласно табл.6. При лучшем времени фильтрации строят серию графиков фиктивного коэффициента фильтрации при зависимостях деформации при показателе степени по табл.5.

Статистическая обработка экспериментальных данных

Статистическая обработка экспериментальных данных производилась по общепринятым методикам [2 -10].

Средние значения величин

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i , \qquad \overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i .$$

Среднее квадратичное отклонение величин $x_1, x_2, \ldots x_n$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2} ,$$

где n – число наблюдений.

Коэффициенты линейной регрессии от одного параметра определялись по методу наименьших квадратов при помощи определителей

$$b_o = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i & \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i y_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \end{vmatrix} 1}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \end{vmatrix}},$$

$$b_i = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \end{vmatrix} 1}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \end{vmatrix}}.$$

Эмпирические дисперсии

$$\left.\begin{aligned} S_x^2 &= \frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - (\bar{x})^2 n\right] \\ S_y^2 &= \frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} y_i^2 - (\bar{y})^2 n\right] \end{aligned}\right\}.$$

Эмпирический коэффициент корреляции, характеризующий меру линейной зависимости

$$r = \frac{1}{S_x S y}\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

Адекватность линейных уравнений регрессии проверялась по критерию Фишера

$$F = \frac{S^2_{\text{àä}}}{S^2_{\text{âî ñï ð}}},$$

где $\mathbf{S_{áä}^2}$ - дисперсия адекватности

$$\mathbf{S_{áä}^2} = \left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \hat{y}_i)^2 - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \right] / (n-1);$$

$\mathbf{S_{aaaa}^2}$ - дисперсия воспроизводимости, $S^2_{\text{âî ñï ð}} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \bar{y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(m_i - 1\right)};$

$\mathbf{S_{aaa}^2}$ - дисперсия остаточная, $S^2_{\text{î ñò}} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \hat{y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} m_i - l},$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m_1}\sum_{j=1}^{m_i} y_{ij};$$

l – число коэффициентов в уравнении регрессии;

Уравнение линейной регрессии $\hat{y} = b_o + b_1 x$;

Уравнение адекватно эксперименту, если $F = \dfrac{S^2_{\text{àä}}}{S^2_{\text{âî ñï ð}}} < F_{1\text{-}p}\left(f_1, f_2\right),$

где **p** – уровень значимости;

$f_1 = f_{\text{àä}} = n - l$; $f_2 = f_{\text{âî ñï ð}} = \sum_{i=1}^{n}\left(m_i - 1\right)$ – числа степеней свободы;

$\mathbf{F_{1\text{-}p}(f_1,f_2)}$ – табличное значение критерия Фишера.

Если уравнение регрессии – полином некоторой степени, то адекватность эксперименту достигалась повышением степени полинома. В качестве критерия рассматривалась остаточная дисперсия

$$S^2_{ino} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}.$$

Адекватность проверялась по критерию Фишера $F = \frac{S^2_k}{S^2_{k+1}}$. При $F = \frac{S^2_k}{S^2_{k+1}} < F_{1\text{-}p}(f_1,f_2)$ для выбранного уровня значимости **p** и чисел степеней свободы $f_1 = f_k$ и $f_2 = f_{k+1}$ увеличение степени **k** прекращалась.

В случае нелинейной корреляции в качестве меры зависимости, т. е. меры концентрации экспериментальных точек около усреднённых кривых регрессии, применялось корреляционное отношение $\eta_{y/x}$

$$\eta^2_{x/y} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{l}(m_i - 1)S^2_{y/x}}{(n-1)S^2_y},$$

где $\bar{y}/x_i$ - истинное среднее значение **y** от **x**, $\bar{y}/x_i = \frac{1}{m_i}\sum_{j=1}^{m_i} y_{ji}$;

l – число интервалов, на которое разбивают весь диапазон величины **x** и для каждого **i**-го интервала с центром в точке x_i подсчитывают условное среднее значение $\bar{y}/x_i$ и условную эмпирическую дисперсию $S_{y/x_i}{}^2$.

$$S^2_{y/x_i} = \frac{1}{m_i - 1}\sum_{i=1}^{m_i}(y_{ji} - \bar{y}/x_i)^2,$$

где m_i – число точек (x_{ji}, y_{ji}), абсциссы которых попали в **i**-й интервал;

i – номер интервала;

j – номер точки в интервале.

Величина достоверности аппроксимации кривой сушки определяется относительной погрешностью δ [11, с. 17-19]]

$$\delta = \frac{\Delta}{|\mathbf{A}|},$$

где $\Delta = |\mathbf{A} - \mathbf{a}|$ - абсолютная погрешность приближённого числа **а** от точного числа **А.**

Лабораторія устаткування та метрологічне забезпечення експериментів

Подрібнення лабораторний або ступка бронзова – 1 шт.

М'ясорубка побутова 1 шт.

Терези лабораторні ВЛКТ – 500 – 1 шт.

Ваги шкільні РН – 50 ШВП – 1 - 1 шт.

Зеєрна камера із ємністю для відбору олії – 1 шт.

Прес гідравлічний – 1 шт.

Воронки скляні за ГОСТ 25336-82 - 3 шт.

Колби скляні за ГСТ 25336-82 міскістю 50, 100 та 200 $см^3$ - 20 шт.

фотоапарат

Шафа сушильна електрична кругла 2 В – 151 – 1 шт.

Автоклав лабораторний 2 1 шт.

Електропіч СНОЛ – 1,6 2 - 1 шт.

Термостат сухо повітряний що забезпечує підтримку температури з точністю $+ 2^0C$

Тензоблок для вимірювання тиску на мезгу в зеєрній камері – 1 шт.

Осцилограф – 1 шт.

Лінійка металева з межею виміру 500 мм за ДСТУ 27-56 – 1 шт.

Секундомір – 1 шт.

Термометр - 1 шт.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Руководство по методам исследования, технохимическому контролю и учёту производства в масложировой промышленности. Том II. Специальные методы анализа и технохимический контроль в производстве растительных масел. /Под ред. В.П. Ржехина и А.Г. Сергеева. Л.: 1965. 420с.

2. Ахмазарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие для хим. –техн. спец. вузов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров – М.: Высш. шк., 1985. – 325 с.
3. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики: учеб. пособие для студ высш. уч. зав. / Б.П.Демидович, И.А. Марон. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: Наука, 1966. – 664 с.
4. Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерений: учеб. пособие для студ. сред. спец. зав. / Н.С. Маркин– М.: Изд-во стандартов, 1991. – 176 с.
5. Вольф В.Г. Статистическая обработка опытных данных / В.Г. Вольф В.Г. – М.: Колос, 1966. – 256 с.
6. Длин А.М. Математическая статистика в технике / А.М. Длин. – М.: Сов. наука, 1958. – 466 с.
7. Демидович Б.П. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Б.П. Демидович, И.А. Марон , Э.З. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
8. Митропольский А.К. Элементы математической статистики / А.К. Митропольский А.К. – Л.: Наука, 1965. – 144 с.
9. Василенко П.М. Элементы методики математической обработки результатов экспериментальных исследований / П.М. Василенко. -М.: Колос, 1958. - 59 с.
10. Румшинсий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство / Л.З. Румшинсий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

11 Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, изд третье, исправленное, 1966. – 664.