

УДК 664.3.033.8

Анализ реологических свойств мезги подсолнечника в процессе прессования с вариацией температуры, давления и масляности

И. А. Шорсткий*, Д. А. Худяков

*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>, e-mail: i-shorstky@mail.ru

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
17.07.2018;
получена после
доработки
23.07.2019

Ключевые слова:
вязкопластичное течение,
модель Бингама,
давление,
температура,
маслопресс

В процессах разработки и моделирования прессового оборудования важным является правильный выбор реологического уравнения течения прессуемой массы, которое влияет на объемную производительность маслопресса. Работа направлена на исследование реологических характеристик течения мезги подсолнечника при избыточном давлении в диапазоне от 980 до 2 700 Па, скорости сдвига от 1–10 с⁻¹, с оценкой влияния температуры в диапазоне от 28 до 45 °С и масляности мезги в диапазоне 40–56 %. Для решения поставленных задач применялся метод сплайн-интерполяции. С помощью математического аппарата и экспериментальных данных установлено, что величина пластической вязкости мезги подсолнечника соответствует вязкости растительного масла, что подтверждает выдвинутое предположение о присутствии Бингамовской реологии. Наличие структурообразования мезги зафиксировано экспериментальными данными. Определено, что предел текучести мезги линейно изменяется в зависимости от давления и масляности. Влияние температуры характеризуется снижением пластичной вязкости от 0,0985 до 0,0917 Па·сек для мезги при избыточном давлении 1,8 кПа. Данный эффект положительно влияет на процесс прессования, формируя тонкий пограничный слой масляной пленки при контакте мезги с корпусом прессового оборудования, и улучшает выход масла. Увеличение масляности мезги характеризуется снижением величины предельного напряжения сдвига с 28,5 до 27,11 Па, что приводит к снижению нагрузки на процесс прессования. Полученные параметры инженерной модели позволяют прогнозировать реологию вязкопластичного течения мезги подсолнечника в широком диапазоне скоростей сдвига в каналах шнекового пресса и могут быть использованы для оптимизации процесса холодного и горячего отжима растительных масел.

Для цитирования

Шорсткий И. А. и др. Анализ реологических свойств мезги подсолнечника в процессе прессования с вариацией температуры, давления и масляности. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 3. С. 395–403. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-3-395-403.

Sunflower mesh rheological properties analysis during pressing with varying temperature, pressure and oil content

Ivan A. Shorstkii*, Dmitry A. Khudyakov

*Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>, e-mail: i-shorstky@mail.ru

Article info

Received
17.07.2018;
received in revised
23.07.2019

Key words:
viscoplasticity flow,
Bingham model,
pressure,
temperature,
oil press

Abstract

The correct choice of the rheological equation of the pressed mass flow affecting the capacity of the oil press is of great importance in the processes of development and modeling of press equipment. This work investigates the rheological characteristics of the sunflower oilseeds mash flow under conditions of hydrostatic overpressure in the range from 100 to 2 700 Pa, shear rate from 1–10 s⁻¹, with an assessment of the effect of temperature in the range from 28 to 45 °C. Spline interpolation has been used to solve these tasks. Using the mathematical apparatus and experimental data it has been found that the plastic viscosity of the sunflower mash corresponds to the viscosity of vegetable oil, which confirms the assumption of the Bingham rheology put forward in this work. The presence of structure formation of the pulp has been recorded by the experimental data. It has been determined that the yield point of the mash varies linearly with the hydrostatic pressure and the oil content of the material. The effect of temperature is characterized by decreasing of the plastic viscosity of the test material from 0.0985 to 0.0917 Pa·s for samples with a 1.8 kPa hydrostatic overpressure. The effect positively influences the pressing process, forming a thin boundary layer of the oil film upon contact of the material with the press equipment body and improves the oil yield. The increase in the material oil content is characterized by decreasing in the value of the yield strength of the material from 28.5 to 27.11 Pa, which leads to a reduction in the load of the pressing process. The obtained parameters of the engineering model make it possible to predict the rheology of the viscoplastic flow of sunflower pulp in a wide range of shear rates in the channels of the auger press and can be used to optimize the process of cold and hot pressing of vegetable oils.

For citation

Shorstkii, I. A. et al. 2019. Sunflower mesh rheological properties analysis during pressing with varying temperature, pressure and oil content. *Vestnik of MSTU*, 22(3), pp. 395–403. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-3-395-403.

Введение

Производство растительных масел непрерывно растет последние 20 лет. Основными способами получения подсолнечного масла являются прессование с использованием маслопрессов и прессование с последующим процессом экстрагирования. Маслопрессы подразделяются на одношнековые и двухшнековые, однократного и многократного прессования, холодного и горячего отжима. Большое количество отечественных и зарубежных работ направлено на поиск оптимальной геометрии маслопрессов, в частности шнекового вала, геометрии витков и зерновой камеры (Očenášek et al., 2009; Uitterhaegen et al., 2017; Гукасян и др., 2018; Кошевой и др., 2004). Одной из задач является изучение и анализ основных реологических свойств исследуемого маслянистого материала, без знания которых невозможен расчет оборудования, его расходно-напорных характеристик.

Цель работы – исследование реологических свойств мезги подсолнечника с оценкой влияния температуры, давления и маслянистости. В связи с этим исследование реологических характеристик проводится при различных показателях давления, температуры и маслянистости, близких к условиям производственного цикла.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали маслянистый материал – мезгу подсолнечника, взятую с производственного цикла маслозавода. Лузжистость мезги подсолнечника находилась в пределах 10 %. Исходная маслянистость составляла 56,0 %.

Для анализа эффективной вязкости мезги как одного из основных реологических свойств использовали ротационный вискозиметр Fungilab One Pro (Fungilab, Spain) с цилиндрическим шпинделем L4. Скорость сдвига в процессе измерения находилась в диапазоне от 1 до 10 с⁻¹. Выбор ротационного способа измерения основан на возможности измерения вязкости как ньютоновских, так и неньютоновских (Inglett et al., 2014; Akbulut et al., 2008), т. е. истинных и структурированных сред. Для оценки влияния давления ячейка вискозиметра была оборудована гидравлической системой регулируемого избыточного давления на ротор вискозиметра (рис. 1). Под действием силы тяжести поршень надавливал на исследуемую массу. Величину избыточного давления определяли как $p_{изб} = F_g/S$, где F_g – сила тяжести, Н; S – площадь поршня, м². Зазор между ротором и поршнем составлял 2 мм. Для минимизации величины погрешности измерений с и без гидравлической системы снятие показателей эффективной вязкости с прибора проводили с трехкратной повторностью. Оценку достоверности экспериментальных данных выполняли с помощью анализа показателя дисперсии и среднего абсолютного отклонения. Для изменения температуры ячейка вискозиметра была оборудована гибким змеевиком, в который подавалась горячая вода от термостата. Ячейка вместе со змеевиком находилась в корпусе из пенопласта для обеспечения равномерного прогрева мезги по объему. Для изменения маслянистости мезгу подвергали предварительному механическому отжиму на гидравлическом прессе, тщательно перемешивали и направляли в измеряемую ячейку вискозиметра. Таким образом, экспериментальное исследование эффективной вязкости мезги проводили с вариацией значений избыточного давления в диапазоне от 980 до 2 700 Па, температуры в диапазоне от 28 до 45 °С и маслянистости мезги при значениях 40, 48,5 и 56 %.

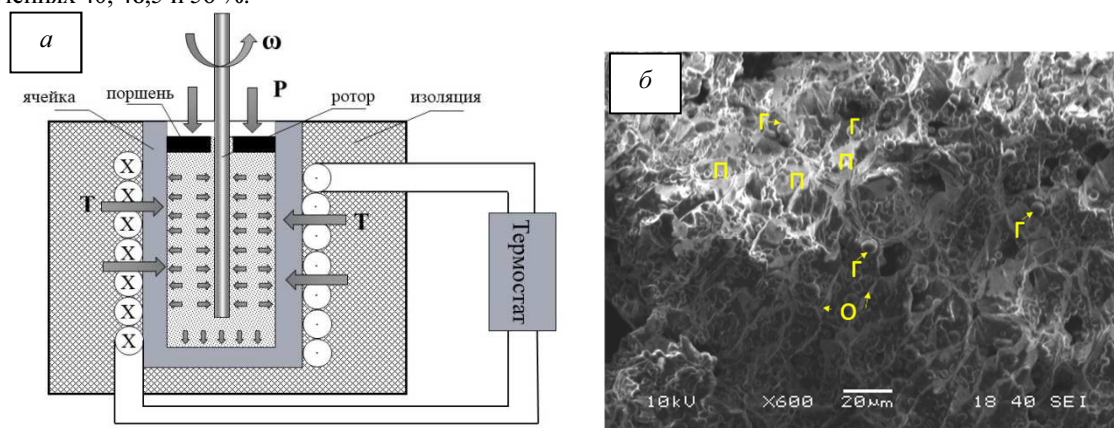


Рис. 1. Схема лабораторной ячейки вискозиметра (а) и микрофотография мезги подсолнечника:

п – маслянистая пленка, о – оболочка маслянистой клетки, г – глобула масла при увеличении ×600 (б)

Fig. 1. Setup scheme of the viscometer chamber (a) and SEM-image of heat-moisture treated sunflower mash ×600: п – oil film, о – cell skin, г – oil globule (б)

Результаты и обсуждение

Реологические свойства мезги подсолнечника

Структура реологических потоков в шнеке маслопресса в значительной степени определяется выбором реологического уравнения течения, которое влияет на объемную производительность маслопресса. При анализе микрофотографии мезги на ее поверхности отчетливо видны глобулы масла (Г) в затемненной и светлой зонах, а также маслянистая пленка (П), выраженная в виде светлых

однородных участков (рис. 1, б). Оболочка масляных клеток (О) представлена в виде закольцованных светлых волокон, окружающих масляную клетку. В состоянии покоя мезга представляет собой рыхлую коагуляционную структуру. Сцепление между дисперсными частицами происходит в основном за счет свободного масла, выделившегося в результате влаготепловой обработки. Таким образом контактирующие частицы мезги образуют каркас в неподвижной маслянистой пленке, сцепленный со стенками шнекового канала. Типичный график эффективной вязкости для мезги масляностью 56 % при $T = 28\text{ }^\circ\text{C}$ и избыточном давлении 1 805 Па представлен в осях $\mu_{\text{эф}}$ (эффективная вязкость) – $\dot{\gamma}$ (скорость сдвиговой деформации) (рис. 2).

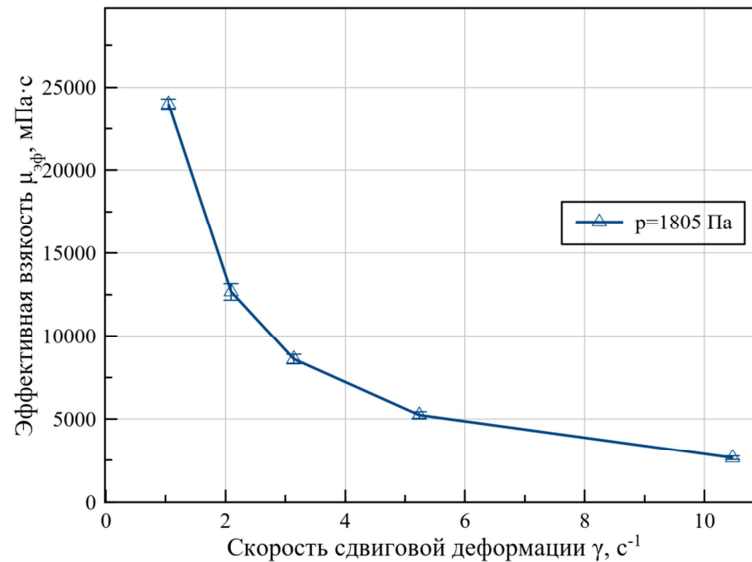


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвиговой деформации мезги при избыточном давлении 1,8 кПа

Fig. 2. Effective viscosity and share rate dependence at 1.8 kPa overpressure

Как видно из представленного графика реометрических кривых, при увеличении скорости сдвига эффективная вязкость монотонно снижается, что подтверждает выдвинутое предположение о структурообразовании мезги. Учитывая, что эффективная вязкость, регистрируемая на ротационном вискозиметре, представляет собой отношение напряжения к скорости сдвига $\mu_{\text{эф}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$, произвели обработку первичных данных реологических свойств на примере мезги масляностью 56 % при избыточном давлении 1,8 кПа (табл. 1).

Таблица 1. Реология структурообразования мезги, поступающей в маслопресс
Table 1. Rheology of the structure formation of the mash entering the oil press

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, рад/сек	Напряжение сдвига τ , Па	Инженерная модель τ^R , Па	Бингамовская модель $\tau_{\text{лин}}$, Па	Невязка инженерной модели $(\tau - \tau^R)/\tau$	Невязка Бингамовской модели $(\tau - \tau_{\text{лин}})/\tau$	Доверительный интервал $\delta\tau/\tau$
10,47	27,75	27,75	27,75	0,0 %	0,0 %	0,6 %
5,24	27,41	27,43	27,43	0,1 %	0,1 %	0,8 %
3,14	27,03	27,02	27,30	0,0 %	1,0 %	2,6 %
2,09	26,54	26,52	27,24	0,1 %	2,6 %	4,6 %
1,05	25,13	25,14	27,18	0,0 %	8,1 %	4,0 %

Для аппроксимации данных табл. 1 использовали линеаризацию исходных показателей реологических свойств в обратных величинах: $\frac{1}{\dot{\gamma}}$; $\frac{1}{\tau}$. В этом случае модельная зависимость кривой течения мезги в маслопрессе может быть представлена в следующем виде:

$$\tau^R(\dot{\gamma}) = \frac{1}{b_0 + \frac{b_1}{\dot{\gamma}}}, \quad (1)$$

где b_0 , b_1 – коэффициенты линейной аппроксимации обратных величин кривой течения мезги в канале маслопресса: $b_0 = 0,0356\text{ Па}^{-1}$ и $b_1 = 0,0043\text{ Гц/Па}$.

Учитывая, что измеряемая эффективная вязкость связана с процессами структурообразования при увеличении скорости сдвига, данная вязкость стремится к ньютоновской. Для оценки вида этого структурообразования построили график зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига мезги в осях "скорость сдвиговой деформации" – "напряжение сдвига" (рис. 3). На первой стадии течения структурированного потока мезги наружные частицы скользят по стенкам канала, а с увеличением скорости сдвига – по масляной пленке.

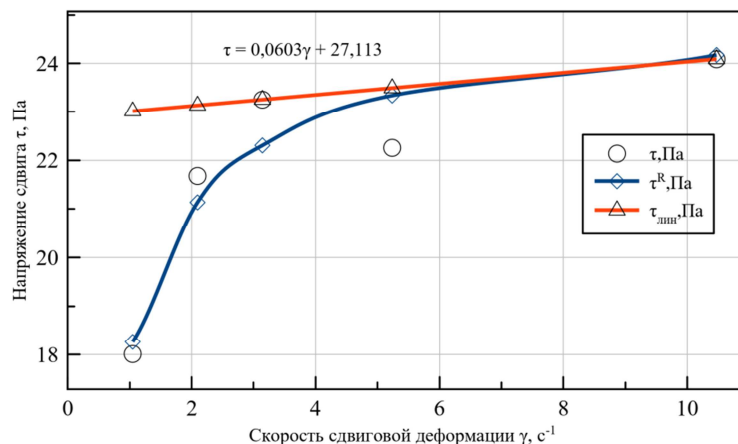


Рис. 3. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига мезги при избыточном давлении 1,8 кПа

Fig 3. Share stress and share rate dependence of oilseed mesh at 1.8 kPa hydrostatic overpressure

Инженерная модель течения мезги, представленная уравнением (1), позволяет определить предельные значения реологических свойств за счет построения асимптоты напряжения сдвига τ_∞ , определяемой следующим соотношением:

$$\tau_\infty = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} [\tau^R(\dot{\gamma})] = \frac{1}{b_0}. \quad (2)$$

Для уточнения параметров инженерной модели течения (1) необходима гладкая функциональная зависимость в виде сплайн аппроксимации, заданной в точках графика (рис. 3) зависимости на отрезке $[a = 1,05; b = 10,47]$ Гц, разбитом на части γ_i (табл. 1). Для аппроксимации использовали кубический сплайн дефекта 1, представляющий собой функцию, которая:

- на каждом отрезке является многочленом степени не выше третьей;
- имеет непрерывные первую и вторую производные на всем отрезке $[a, b]$;
- в экспериментальных точках выполняется равенство сплайна интерполирующей функции. Для

однозначного задания сплайна накладываем дополнительные требования на границах сплайна: $\tau'(a) = \tau'(b) = 0$. В этом случае, согласно теореме Шенберга – Уитни об условиях существования интерполяционного сплайна, существует только один сплайн $\tau_s(\gamma)$, удовлетворяющий перечисленным выше условиям. Тогда интегральная относительная невязка пробной инженерной функции реологических свойств мезги может быть представлена в виде целевой функции $Z(b_0, b_1)$:

$$Z(b_0, b_1) = \int_a^b \left[\frac{\tau^R(\gamma) - \tau_s(\gamma)}{\tau^R(\gamma)} \right]^2 d\gamma. \quad (3)$$

Минимизация функционала (3) позволила уточнить параметры инженерной модели по сравнению с их квазилинейной аппроксимацией ($b_0 = 0,0356 \text{ Па}^{-1}$ и $b_1 = 0,0043 \text{ Гц/Па}$). Реалистичное уравнение течения, характерное для маслопресса в процессе извлечения масла из мезги, определяется интервалом скоростей сдвига: от 5 до 11 рад/сек. В этом случае для определения реологических параметров течения мезги в канале шнека наиболее реалистичным уравнением течения является идеально-пластическая модель Бингама:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mu_{\text{пл}} \cdot \dot{\gamma}, \quad (4)$$

где τ_0 – предел текучести; $\mu_{\text{пл}}$ – пластическая вязкость. Параметры уравнения (4) могут быть определены на основе линейной аппроксимации в указанном интервале скоростей сдвига с учетом найденной асимптоты (2) из параметров инженерной модели (1). Из графиков линейных аппроксимаций (рис. 3) следует, что $\tau_0 = 27,113 \text{ Па}$; $\mu_{\text{пл}} = 0,06 \text{ Па}\cdot\text{сек}$ для мезги подсолнечника. Уточняя начальное приближение этих параметров для скоростей сдвига используемых в процессах прессования мезги в маслопрессе

использовали интегральную относительную невязку идеально-пластической модели Бингама (4) относительно инженерной функции реологических свойств мезги:

$$Z_B(\tau_0, \mu_{пл}) = \int_{5,2}^{10,5} \left[\frac{\tau^R(\dot{\gamma}) - \tau(\dot{\gamma})}{\tau^R(\dot{\gamma})} \right]^2 d\dot{\gamma} \quad (5)$$

Минимизация функционала (5) позволила уточнить параметры идеально-пластической модели Бингама относительно инженерной реологической функции ($\tau_0 = 27,07$ Па; $\mu_{пл} = 0,06$ Па·сек).

Влияние избыточного давления на реологические свойства мезги подсолнечника

Данные эксперимента по определению влияния избыточного давления на реологические свойства мезги представлены на графике в осях $\mu_{эф}$ (эффективная вязкость) – $\dot{\gamma}$ (скорость сдвиговой деформации) при различных значениях избыточного давления (рис. 4).

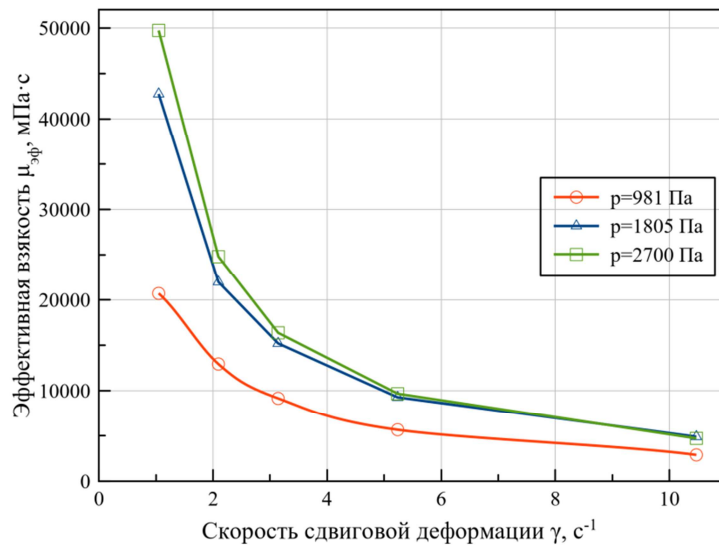


Рис. 4. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвиговой деформации мезги при избыточном давлении 981, 1 805 и 2 700 Па

Fig. 4. Effective viscosity and share rate dependence of mash at 981, 1 805 and 2 700 Pa overpressure

Для определения влияния избыточного давления на параметры Бингамовской реологической модели провели статистический анализ коэффициентов линейной аппроксимации экспериментальных данных (рис. 4), показавший зависимость только предельного напряжения сдвига вязкопластичного материала от избыточного давления. Для определения этой зависимости был проведен регрессионный анализ влияния избыточного давления на предел текучести, результаты которого представлены в виде линейной регрессионной зависимости (рис. 5).

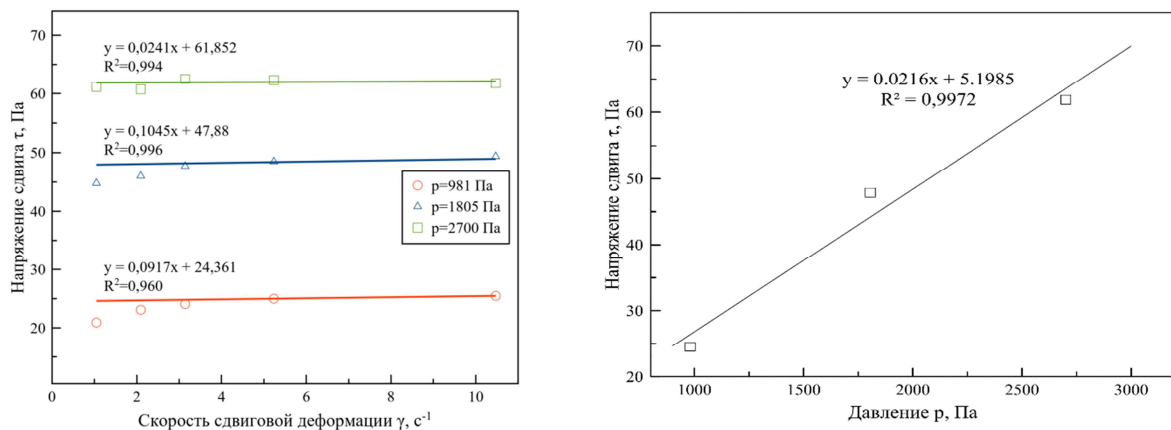


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвиговой деформации (слева) и напряжения сдвига от избыточного давления (справа)

Fig. 5. Share stress and share rate dependence (left), share stress and hydrostatical overpressure dependence (right)

Как видно из представленных данных (рис. 5), предельное напряжение сдвига линейно изменяется в зависимости от избыточного давления. Аппроксимация уравнения течения в рамках бингамовской реологической модели с учетом установленного влияния избыточного давления может быть представлена следующей зависимостью:

$$\tau(\dot{\gamma}, p) = (0,0216 \cdot p + 5,198 Pa) + (0,06 \cdot Pa \cdot s) \cdot \dot{\gamma} \quad (6)$$

и позволяет идентифицировать течение пластического слоя как масляной пленки на границе поршневого течения мезги.

Влияние маслячности на реологические свойства мезги

Данные эксперимента представлены на графике на осях $\mu_{эф}$ (эффективная вязкость) – $\dot{\gamma}$ (скорость сдвиговой деформации) (рис. 6).

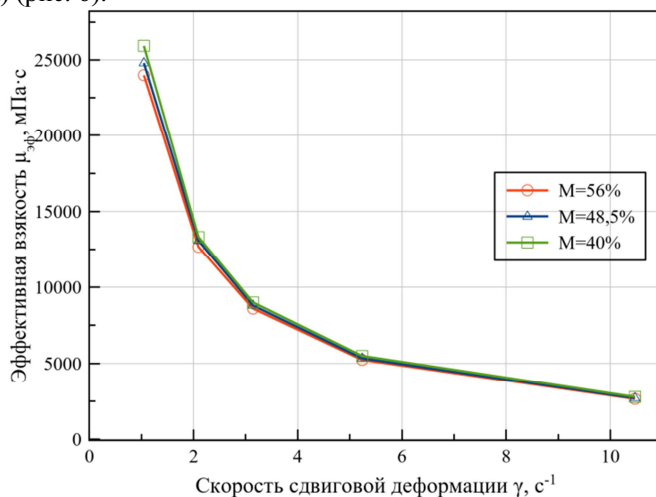


Рис. 6. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвиговой деформации мезги при маслячности 56, 48,5 и 40 % при избыточном давлении 1 805 Па

Fig. 6. Effective viscosity and share rate dependence of mash at 56, 48.5 and 40 % oil content at 1 805 Pa overpressure

Для оценки влияния маслячности мезги на параметры Бингамовской реологической модели провели статистический анализ коэффициентов линейной аппроксимации экспериментальных данных (рис. 6), показавший зависимость только предела текучести и эффективной вязкости от маслячности мезги. Снижение маслячности приводит к увеличению затрачиваемой энергии прессования и, как следствие, увеличению температуры мезги и давления на матрицу маслопресса. Наличие свободных масел в виде пленки на поверхности мезги обеспечивает мощный смазывающий эффект (*Ilo et al., 2000*). Кроме того, наличие даже 1 % масла на поверхности мезги обеспечивает стабилизацию и нормализацию процесса прессования, что говорит о важности процесса влаготепловой обработки. Из графиков линейных аппроксимаций для мезги маслячностью $M = 40, 48,5$ и 56 % определены параметры уравнения (4), которые занесены в табл. 2. При этом значения пластической вязкости, характеризующие наличие маслячной пленки, хорошо согласуются со значениями вязкости подсолнечного масла (*Stanciu, 2014*).

Таблица 2. Параметры уравнения Бингама для мезги различной маслячности
Table 2. Bingham equation parameters for sunflower mesh for different oil content

Масличность, M (%)	Предел текучести, τ_0 (Па)	Пластическая вязкость, $\mu_{пл}$ (Па·с)
40	28,5	0,0428
48,5	27,52	0,0541
56	27,113	0,0603

С учетом установленного влияния маслячности мезги реологическая модель может быть представлена следующей зависимостью:

$$\tau(\dot{\gamma}, M) = (-0,0873 \cdot M + 31,917 Pa) + (0,001099 \cdot M - 0,0005 \cdot Pa \cdot s) \cdot \dot{\gamma} \quad (7)$$

Влияние температуры на реологические свойства мезги

Практический интерес представляет изучение влияния температуры на реологическую модель течения мезги подсолнечника. В процессе прессования температура мезги может достигать 140 °С. Изменение реологических свойств мезги при различных температурных режимах происходит за счет

пространственно-температурных структурных изменений в объеме мезги, а также благодаря динамическому процессу структурообразования. В связи с этим процесс предварительного нагрева мезги является важным подготовительным этапом, влияющим на эффективность процесса прессования.

На рис. 7 представлены графические данные эксперимента в осях $\mu_{\text{эф}}$ (эффективная вязкость) – $\dot{\gamma}$ (скорость сдвиговой деформации) при вариации температуры.

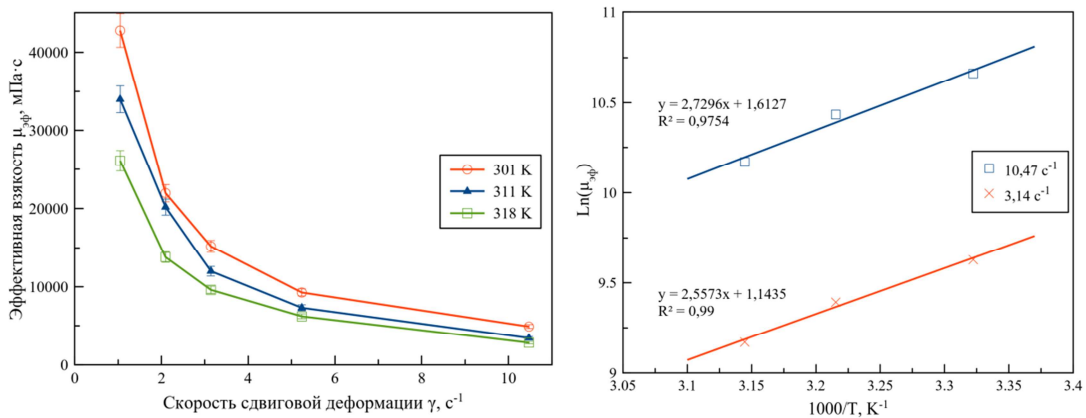


Рис. 7. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвиговой деформации мезги при температуре 301, 311 и 318 К (слева) и зависимость натурального логарифма эффективной вязкости от обратной температуры

Fig. 7. Effective viscosity and share rate dependence of mash at 301, 311 and 318 K (left) and temperature ramp dependence on natural logarithm of effective viscosity

Определение энергии активации и оценка влияния температуры на реологические свойства мезги осуществлялись с помощью уравнения Френкеля – Эйринга:

$$\mu = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \cdot \dot{\gamma}^{-n}, \quad (8)$$

где A – предэкспоненциальный множитель (Па·с), E_a – энергия активации (Дж·моль⁻¹), R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж·моль⁻¹·К⁻¹), T – термодинамическая температура (°К), $\dot{\gamma}$ – числовое значение скорости деформации; n – темп разрушения структуры.

В условиях эксперимента скорость деформации $\dot{\gamma}$ – величина постоянная, практически не зависит от температуры, поэтому для определения энергии использовалось уравнение Аррениуса:

$$\mu = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right). \quad (9)$$

Прологарифмировав уравнение (9), получили

$$\ln(\mu) = \ln(\mu_\infty) + \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T}.$$

Введя обозначения: $y = \ln(\mu)$; $a = \ln(\mu_\infty)$; $b = E_a/R$; $x = 1/T$, получили линейризованное уравнение $y = a + bx$. Определили коэффициенты a и b , и рассчитали предэкспоненциальный множитель A и энергию активации E_a . Для прогнозирования предельного напряжения сдвига мезги была предпринята попытка определить вид функциональной кривой от температуры путем приведения последней к линейному виду. Задача решалась путем выбора полулогарифмической шкалы (рис. 7). Проанализировав полученные графические зависимости в полулогарифмических шкалах, можно сделать вывод, что для данной зависимости применимо уравнение (9). По тангенсу угла наклона этой прямой определяется энергия активации процесса.

На основании математической обработки экспериментальных зависимостей $\ln(\mu)$ от $1/T$ определены энергия активации и предэкспоненциальный множитель. Прямолинейный вид зависимости $\ln(\mu)$ от $1/T$ свидетельствует об образовании связей одного вида флуктуационной сетки. Модельное уравнение течения в рамках бингамовской реологической модели с учетом установленного влияния температуры может быть представлено следующей зависимостью:

$$\mu = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) = -1,98 \cdot \exp\left(\frac{21,19}{RT}\right). \quad (10)$$

Энергия активации мезги для скорости деформации 3,14 с⁻¹ составляет 21,19 кДж/моль, предэкспоненциальный множитель $A = -1,98$ Па.

Выводы

Учитывая тот факт, что эффективная вязкость мезги соответствует вязкости растительного масла (Stanciu, 2014), входящего в состав этого вязкопластичного материала, получили подтверждение Бингамовской реологии мезги подсолнечника. Как видно из представленных данных, график консистенции представляет собой бингамовскую вязкопластичную жидкость.

Проведенные экспериментальные исследования показали наличие структурообразования мезги, поступающей в маслопресс. При увеличении скорости сдвига эффективная вязкость снижается. Консистенция мезги соответствует Бингамовской реологии. Установлено, что предел текучести мезги подсолнечника линейно изменяется в зависимости от величины избыточного давления, а полученная зависимость $\tau(\dot{\gamma}, p)$ позволяет идентифицировать течение пластического слоя как масляной пленки на границе поршневого течения мезги. Влияние роста масличности мезги на реологию течения характеризуется снижением величины предельного напряжения сдвига мезги с 28,5 до 27,11 Па, которое способствует снижению нагрузки на процесс прессования.

Структурно механические и энергетические свойства мезги подсолнечника зависят от ряда факторов: компонентного состава мезги и температурных режимов обработки. Влияние температуры характеризуется снижением пластичной вязкости мезги от 0,0985 до 0,0917 Па·сек для образцов при избыточном давлении 1,8 кПа. Таким образом, полученные параметры инженерной модели позволяют прогнозировать реологию вязкопластичного течения мезги подсолнечника в широком диапазоне скоростей сдвига в каналах маслопресса.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00448.

Библиографический список

- Гукасян А. В., Кошевой Е. П., Косачев В. С., Шорсткий И. А. Исследование реологии масличного материала при экструзионной обработке // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2018. № 1. С. 83–87.
- Кошевой Е. П., Косачев В. С., Меретуков З. А. Теоретическое рассмотрение деформирования материала на выходе экструдера // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2004. № 5–6. С. 86–88.
- Akbulut M., Coklar H. Physicochemical and rheological properties of sesame pastes (tahin) processed from hulled and unhulled roasted sesame seeds and their blends at various levels // Journal of Food Process Engineering. 2008. Vol. 31, N 4. P. 488–502. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00162.x>.
- Ilo S., Schoenlechner R., Berghofe E. Role of lipids in the extrusion cooking processes // Grasas y Aceites. 2000. Vol. 51, N 1–2. P. 97–110.
- Inglett G. E., Chen D., Liu S. X., Lee S. Pasting and rheological properties of oat products dry-blended with ground chia seeds // LWT – Food Science and Technology. 2014. Vol. 55, N 1. P. 148–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.07.011>.
- Očenášek J., Voldřich J. Mathematical modelling of biogenous filter cake and identification of oilseed material parameters // Applied and Computational Mechanics. 2009. Vol. 3. P. 339–350.
- Stanciu I. The study rheological behavior of sunflower oil // International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. 2014. Vol. 4, N 5. P. 531–540. DOI: <https://doi.org/10.9734/irjpac/2014/9586>.
- Uitterhaegen E., Evon P. Twin-screw extrusion technology for vegetable oil extraction: A review // Journal of Food Engineering. 2017. Vol. 212. P. 190–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.006>.

References

- Gukasyan, A. V., Koshevoj, E. P., Kosachev, V. S., Shorstky, I. A. 2018. The rheology of oilseed material during extrusion processing. *Food Technology*, 1, pp. 83–87. (In Russ.)
- Koshevoj, E. P., Kosachev, V. S., Meretukov, Z. A. 2004. Theoretical consideration of material deformation at the extruder outlet. *Food technology*, 5–6, pp. 86–88. (In Russ.)
- Akbulut, M., Coklar, H. Physicochemical and rheological properties of sesame pastes (tahin) processed from hulled and unhulled roasted sesame seeds and their blends at various levels. 2008. *Journal of Food Process Engineering*, 31(4), pp. 488–502. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00162.x>.
- Ilo, S., Schoenlechner, R., Berghofe, E. 2000. Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Grasas y Aceites*, 51(1–2), pp. 97–110.
- Inglett, G. E., Chen, D., Liu, S. X., Lee, S. Pasting and rheological properties of oat products dry-blended with ground chia seeds 2014. *LWT – Food Science and Technology*, 55(1), pp. 148–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.07.011>.

- Očenášek, J., Voldřich, J. 2009. Mathematical modelling of biogenous filter cake and identification of oilseed material parameters. *Applied and Computational Mechanics*, 3, pp. 339–350.
- Stanciu, I. 2014. The study rheological behavior of sunflower oil. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 4(5), pp. 531–540. DOI: <https://doi.org/10.9734/irjpac/2014/9586>.
- Uitterhaegen, E., Evon, P. 2017. Twin-screw extrusion technology for vegetable oil extraction: A review. *Journal of Food Engineering*, 212, pp. 190–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.006>.

Сведения об авторах

Шорсткий Иван Александрович – ул. Московская, 2, г. Краснодар, Россия, 350072; Кубанский государственный технологический университет, Институт машиностроения и автосервиса, канд. техн. наук, доцент; e-mail: i-shorstky@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

Ivan A. Shorstkii – 2 Moskovskaya Str., Krasnodar, Russia, 350072; Kuban State University of Technology, Institute of Machinery and Service, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: i-shorstky@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

Худяков Дмитрий Андреевич – ул. Московская, 2, г. Краснодар, Россия, 350072; Кубанский государственный технологический университет, Институт машиностроения и автосервиса, магистрант; e-mail: dima.khudykov.1995@mail.ru

Dmitry A. Khudykov – 2 Moskovskaya Str., Krasnodar, Russia, 350072; Kuban State University of Technology, Institute of Machinery and Service, Master's Degree Student; e-mail: dima.khudykov.1995@mail.ru