

**Гукасян А.В., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Схаляхов А.А., Меретуков З.А.**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОЦЕССА**  
**ЭКСТРУДИРОВАНИЯ МАСЛИЧНОГО МАТЕРИАЛА**

Гукасян Александр Валерьевич, заведующий кафедрой технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия  
E-mail: [aleksandr\\_gukasyan@mail.ru](mailto:aleksandr_gukasyan@mail.ru)

Кошевой Евгений Пантелеевич, профессор кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия  
Тел.: 8 (861) 275 22 79

Косачев Вячеслав Степанович, профессор кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия  
Тел.: 8 (861) 275 22 79

Схаляхов Анзаур Адамович, доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет», Россия  
Тел.: 8 (8772) 57 04 12  
E-mail: [f\\_technological@mkgtu.ru](mailto:f_technological@mkgtu.ru)

Меретуков Заур Айдамирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии, машин и оборудования пищевых производств  
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет», Россия  
Тел.: 8 (906) 438 74 38  
E-mail: [zaur-meretukov@yandex.ru](mailto:zaur-meretukov@yandex.ru)

*Целью исследования была разработка реологических зависимостей масличного материала в процессе экструдирования и моделирование вязкости материала при получении растительного масла прессованием в экструдере в процессе течения пластически деформируемой пористой среды. Использовали методы математического моделирования структурных моделей вязкости для описания как нелинейного пластического, так и псевдопластического течения. Методика базируется на том, что учитываются вязкопластические свойства Бингамовского течения. Представлена аппроксимация уравнений течения в рамках бингамовской реологической модели с учетом установленного экспериментально влияния гидростатического давления на напряжение сдвига подсолнечной мезги, поступающей в экструдер. Пластическая вязкость при этом практически остается постоянной. Эффективную вязкость рассматривали как состоящей из двух компонентов: пластической вязкости, соответствующей вязкости ньютоновской жидкости, и структурной вязкости, которая характеризует сопротивление сдвигу, вызываемое тенденцией содержащихся в бингамовской жидкости твердых частиц образовывать структуру. В результате проведенных исследований*

получена оценка влияния основных параметров процесса экструдирования на эффективную вязкость масляного материала. Главным выводом является необходимость использования наиболее теоретически обоснованного уравнения Бингама, которое позволяет определять эффективную вязкость на достаточно большом интервале скоростей сдвига в канале экструдера. В результате были определены реологические модели сдвигового течения, описывающие одновременно пластичное и псевдопластичное течение с достаточно хорошей точностью.

**Ключевые слова** реология, реологические модели, дисперсные системы, ньютоновское, неньютоновское, нелинейное пластическое и псевдопластическое течение.

**Для цитирования:** Гукасян А.В., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Схалыхов А.А., Меретуков З.А. Моделирование реологических зависимостей процесса экструдирования масляного материала. // Новые технологии. 2019. Вып. 3(49). С. 41-50. DOI: 10.24411/2072-0920-2019-10304.

**Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S., Shkhalyakhov A.A., Meretukov Z.A.**

### **MODELING OF RHEOLOGICAL DEPENDENCIES OF THE PROCESS OF OIL MATERIAL EXTRUDING**

Gukasyan Alexander Valerievich, head of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems, Candidate of Technical Sciences, an associate professor

FSBEI HE “Kuban State Technological University”, Russia

E-mail: [aleksandr\\_gukasyan@mail.ru](mailto:aleksandr_gukasyan@mail.ru)

Tel : 8 (861) 275 22 79

Koshevoy Evgeny Panteleevich, a professor of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems, Doctor of Technical Sciences, a professor

FSBEI HE “Kuban State Technological University”, Russia

Tel.: 8 (861) 275 22 79

Kosachev Vyacheslav Stepanovich, a professor of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems, Doctor of Technical Sciences, a professor

FSBEI HE “Kuban State Technological University”, Russia

Tel: 8 (861) 275 22 79

Shkhalyakhov Anzaur Adamovich, Doctor of Technical Sciences, a professor

FSBEI HE “Maikop State Technological University”, Russia

Tel.: 8 (8772) 57 04 12

E-mail: [f\\_technological@mkgtu.ru](mailto:f_technological@mkgtu.ru)

Meretukov Zaur Aidamirovich, Doctor of Technical Sciences, an associate professor, a professor of the Department of Technology, Machines and Equipment for Food Production

FSBEI HE “Maikop State Technological University”, Russia

Tel.: 8 (906) 438 74 38

E-mail: [zaur-meretukov@yandex.ru](mailto:zaur-meretukov@yandex.ru)

*The aim of the research is to develop rheological dependences of the oil material during extrusion and to simulate viscosity of the material when producing vegetable oil by pressing in an*

*extruder during the flow of a plastically deformable porous medium. Methods of mathematical modeling of structural models of viscosity have been used to describe both non-linear plastic and pseudo-plastic flows. The technique is based on the fact that the viscoplastic properties of the Bingham flow are taken into account. An approximation of the flow equations has been presented within the Bingham rheological model, taking into account the experimentally established effect of hydrostatic pressure on the shear stress of the sunflower pulp entering the extruder. Plastic viscosity remains almost constant.*

*The effective viscosity has been considered as consisting of two components: the plastic viscosity, that corresponds to the Newtonian fluid viscosity, and the structural viscosity, which characterizes the shear resistance caused by the tendency of the solid particles contained in the Bingham fluid to form a structure. As a result of the studies, the influence of the main parameters of the extrusion process on the effective viscosity of the oil material has been assessed. The need to use the most theoretically substantiated Bingham equation has been substantiated, which allows you to determine the effective viscosity over a sufficiently large interval of shear rates in the extruder channel.*

*As a result, rheological models of the shear flow have been determined that describe both plastic and pseudo plastic flows with fairly good accuracy.*

**Keywords:** *Rheology, rheological models, disperse systems, Newtonian, non-Newtonian, nonlinear plastic and pseudo plastic flows.*

**For citation:** Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S., Shkhalyakhov A.A., Meretukov Z.A. Modeling of rheological dependencies of the process of oil material extruding. *Novye tehnologii (Majkop)*. 2019. Iss. 3(49). P. 41-50. (In Russ., English abstract). DOI: 10.24411/2072-0920-2019-10304.

## **Введение**

Выявление реологических зависимостей масличного материала, обрабатываемого в винтовом прессе-экструдере [1] является важной народно-хозяйственной задачей масложировой промышленности. Общей темой исследования является моделирование вязкости материала при получении растительного масла прессованием в экструдере [2] в процессе течения пластически деформируемой пористой среды. В настоящее время это позволяет определять геометрические параметры витков пресса-экструдера [3] для получения высококачественных пищевых растительных масел. Свойства маслосодержащих растительных материалов оказывают существенное влияние на параметры технологических процессов [4] гидродинамики ламинарных течений в узких каналах. При этом повышение эффективности производства растительных масел в значительной мере определяется физико-химическими особенностями процесса [5] на основе уточнения реологии масличного материала. Важной проблемой инженерного расчета промышленных установок является теоретически и практически обоснованные решения реализации массопередачи [6] при изменении скорости потока материала. Масличный материал представляет собой неньютоновскую жидкость, с постоянной дифференциальной вязкостью [7], что соответствует пластичному течению Бингама как результата перехода из твердого состояния системы в текучее. Разрабатываемые

математические модели гидравлики[8] пищевых реакторов в большинстве случаев этот выбор определяются возможностью наилучшей аппроксимации экспериментальных данных. Гораздо реже принимается во внимание наличие микрореологической модели учитывающей кинетику свойств смеси при производстве масел [9]. Цель настоящего исследования – определение реологических характеристик маслянистого материала процесса экструдирования. При этом в процессе работы была решена задача синхронизации инженерного и теоретического подхода к описанию слоистого течения на основе сопряжения уравнения Бингама и эффективной вязкости. Проведенное исследование формулирует инженерный подход к реологии процессов и аппаратов экструзионного типа, что подтверждает ее актуальность, теоретическую и практическую значимость.

### Методика

Методика базируется на том, что учитываются вязкопластичные свойства Бингамовского течения, для инициирования которого требуется приложить некоторое конечное напряжение  $\tau$ , (Па):

$$\tau - \tau_0 = -\mu_p \cdot \frac{dv}{dr} \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – напряжение сдвига, необходимое для начала движения жидкости (Па);  $\mu_p$  – пластическая вязкость, представляющая собой касательное напряжение, сообщаемое жидкости единичную скорость сдвига (Па·сек);  $dv$  – разность скоростей соседних слоев жидкости (м/сек);  $dr$  – расстояние между слоями жидкости (м);  $\frac{dv}{dr}$  – скорость сдвига  $\dot{\gamma}$ , (Гц). Следовательно, общее сопротивление сдвигу бингамовской вязкопластичной жидкости (1) может быть выражено через эффективную вязкость  $\mu_e$  при определенной скорости сдвига  $\dot{\gamma}_e$ :

$$\mu_e = \mu_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_e} \quad (2)$$

Аппроксимация уравнения течения (2) в рамках бингамовской реологической модели с учетом установленного экспериментально влияния гидростатического давления на напряжение сдвига подсолнечной мезги, поступающей в экструдер, может быть представлена зависимостью:

$$\tau(\dot{\gamma}, p) = (0,016 \cdot p + 10,604 \text{ Па}) + (1,607 \cdot \text{Па} \cdot \text{сек}) \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

где  $p$  – гидростатическое давление (Па). Объединяя (1) и (2) получаем известное реологическое уравнение Бингама  $\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$ , которое соответствует параметрам уравнения(3):

$$\begin{cases} \tau_0(p) = 0,016 \cdot p + 10,604 \text{ Па} \\ \mu_p = 1,607 \cdot \text{Па} \cdot \text{сек} \end{cases} \quad (4)$$

Из (4) следует, что напряжение сдвига, необходимое для начала движения подсолнечной мезги, поступающей в экструдер, зависит от давления, развиваемого прессом. Пластическая вязкость при этом практически остается постоянной. Эффективную вязкость определяют, как вязкость ньютоновской жидкости, соответствующую конкретным значениям напряжения и скорости сдвига бингамовской жидкости.

Таким образом, эффективную вязкость можно рассматривать состоящей из двух компонентов: пластической вязкости, соответствующей вязкости ньютоновской жидкости, и структурной вязкости, которая характеризует сопротивление сдвигу, вызываемое тенденцией содержащихся в бингамовской жидкости твердых частиц образовывать структуру:

$$\mu_e = 1,607 \cdot \text{Па} \cdot \text{сек} + \frac{0,016 \cdot p + 10,604 \text{ Па}}{\dot{\gamma}_e} \quad (5)$$

В качестве эффективной вязкости, входящей в левую часть уравнения (5) может использоваться сплайн-аппроксимация  $\mu_s$  эффективной вязкости подсолнечной мезги полученной PCT MathCAD по результатам экспериментального процесса прессования:

$$\mu_s(f, n, b_0, b_1, b_2, b_3) := \begin{cases} f_0(n) \leftarrow \text{root} \left[ b_0 \dots, f_0, 0.01, 1 \right] \\ \left[ + \exp(-b_1 \cdot n) \cdot f_0^{-b_2} - \frac{b_2 \cdot e^{-b_1 \cdot n}}{f_0^{b_3}} \cdot (1 - f_0) - 0.0074 \right] \\ \text{for } i \in 0..75 \\ \quad v f_i \leftarrow 0.05 + \frac{1 - 0.05}{75} \cdot i \\ \text{for } j \in 0..75 \\ \quad v n_j \leftarrow 1 + \frac{15 - 1}{75} \cdot j \\ \text{for } i \in 0..75 \\ \quad \text{for } j \in 0..75 \\ \quad \left[ \begin{array}{l} \mu_{i,j} \leftarrow b_0 + \exp(-b_1 \cdot v n_j) \cdot (v f_i)^{-b_2} \text{ if } (v f_i \leq f_0(v n_j)) \\ \mu_{i,j} \leftarrow b_0 \dots \text{ otherwise} \\ + \exp(-b_1 \cdot v n_j) \cdot f_0(v n_j)^{-b_2} - \frac{b_2 \cdot e^{-b_1 \cdot v n_j}}{f_0(v n_j)^{b_3}} \cdot (v f_i - f_0(v n_j)) \end{array} \right] \\ mFN \leftarrow \text{augment}(v f, v n) \\ sM \leftarrow \text{cspline}(mFN, \ln(\mu)) \\ \mu_s \leftarrow \exp \left[ \text{interp} \left[ sM, mFN, \ln(\mu), \left( \frac{f}{n \cdot s} \right) \right] \right] \cdot \text{Pa} \cdot \text{s} \\ \mu_s \end{cases} \quad (6)$$

где  $f$  – масличность, кг/кг;  $n$  – скорость сдвига, создаваемая шнеком, Гц;  $b_0 = 202,534$ ;  $b_1 = 0,517$ ;  $b_2 = 8,532$ ;  $b_3 = 9,532$  – эмпирические коэффициенты. Сплайн эффективной вязкости материала (6) адекватно описывает её изменение, от масла ( $f = 1$ ) до форпрессового жмыха ( $f = 0.15$ ) включая мятку ( $f = 0.5$ ) при изменении скорости сдвига шнека от  $n = 1$  Гц до

$n = 15$  Гц. Объединяя уравнения (5) и (6) получаем зависимость напряжения сдвига, необходимого для начала движения жидкости:

$$\tau_0(p) = [\mu_s(f, n) - \mu_p] \cdot \dot{\gamma}_e \quad (7)$$

Этот параметр ( $\tau_0$ ) фактически определяет границу поршневого течения материала. В случае одномерного безнапорного слоистого течения Куэтта скорость сдвига определяется формулой:

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{H} \quad (8)$$

где  $V$  – скорость подвижной крышки, м/сек;  $H$  – глубина канала шнека, м. При подстановке (8) в (7) с учетом (4) получаем:

$$0,016 \cdot p + 10,604 \text{ Па} = [\mu_s(f, n) - 1,607 \cdot \text{Па} \cdot \text{сек}] \cdot \frac{V}{H}. \quad (9)$$

Уравнение (9) может быть использовано для определения конструктивно-технологических параметров загрузочных витков прессов-экструдеров. В этом случае гидростатическое давление  $p$ , входящее в уравнение (9) приравняем атмосферному давлению и, задаваясь начальной маслячностью  $f = 0,5$ , определяем предельные соотношения скорости  $V$  к глубине канала  $H$ .

### Результаты и их обсуждение

Определение соотношений конструктивно-технологических параметров загрузочных витков прессов-экструдеров проводилось методом численного решения уравнения (9) в виду отсутствия возможности его разрешения аналитически. Учитывая область применимости сплайна (6) рассматривали скорость подвижной крышки по формуле:

$$V = \pi \cdot D_{II} \cdot n_B \cdot \cos \left[ \arctan \left( \frac{S_B}{\pi \cdot D_{II}} \right) \right]. \quad (10)$$

где  $D_{II}$  – диаметр пера витка, м;  $n_B$  – частота вращения шнека, Гц;  $S_B$  – шаг витка, м. Используя (10) с учетом (9) получили уравнение, определяющее предельные значения конструктивно-технологических параметров загрузочных витков прессов-экструдеров:

$$0,016 \cdot p + 10,604 \text{ Па} = \left[ \mu_s \left( 0,5; \frac{\pi \cdot D_{II} \cdot n_B \cdot \cos \left[ \arctan \left( \frac{S_B}{\pi \cdot D_{II}} \right) \right]}{H} \right) - 1,607 \cdot \text{Па} \cdot \text{сек} \right] \cdot \frac{\pi \cdot D_{II} \cdot n_B \cdot \cos \left[ \arctan \left( \frac{S_B}{\pi \cdot D_{II}} \right) \right]}{H} \quad (11)$$

Варьируя частоту вращения шнека в уравнении (11) от 1 до 3 Герц и шаг загрузочного витка от 75 мм до 251 мм, определяли предельные значения глубины канала шнека. Найденная из (11) предельная глубина канала обеспечивает ламинарное течение при практическом отсутствии застойной зоны в виде пластичного жесткого ядра в канале шнека (рис. 1).

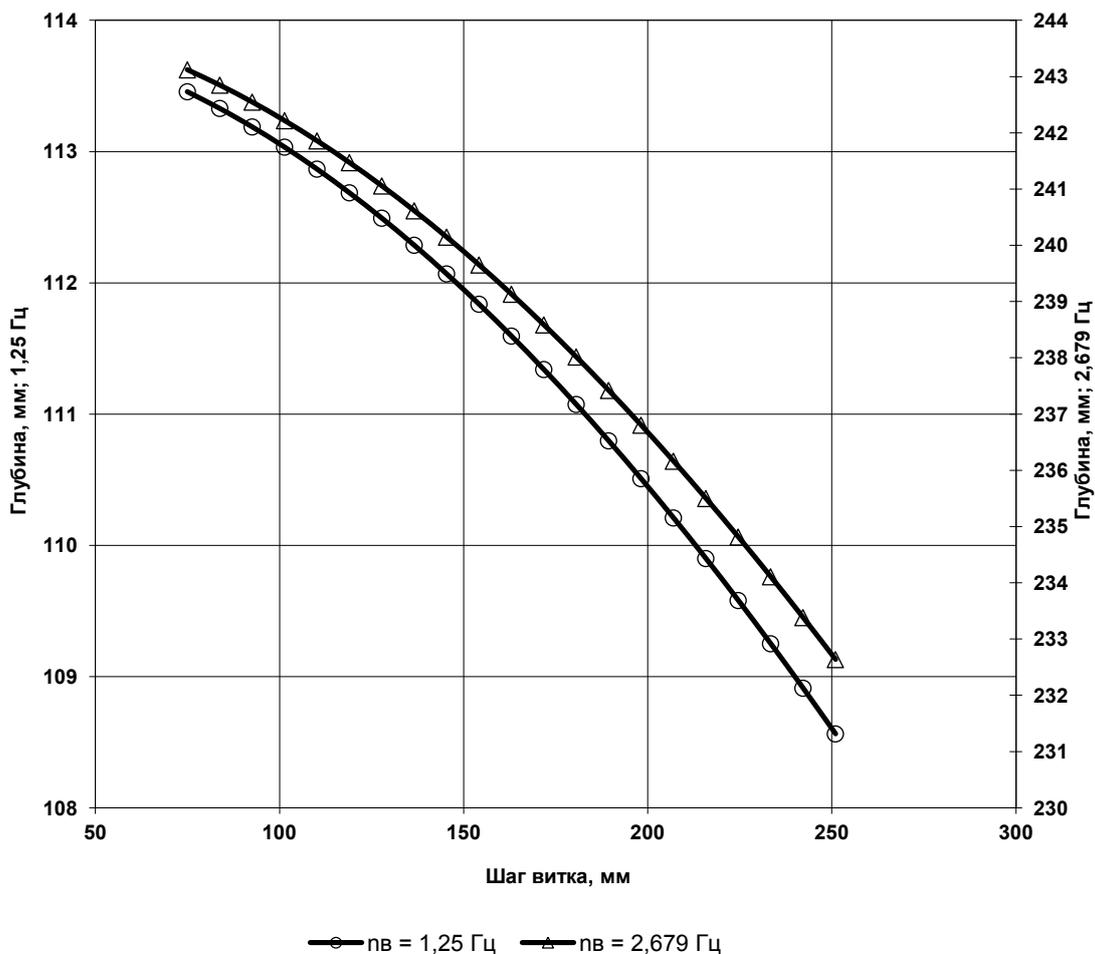


Рис. 1.

*Глубина ламинарной зоны загрузочного витка при  $D_{II} = 250$  мм*

Полученные значения (рис. 1) обобщили в виде инженерной регрессионной зависимости:

$$H_{лп}(S_B, n_B) = 0,04 \cdot S_B + 90,932 \cdot n_B - 0,022 \cdot S_B \cdot n_B - 1,23 \cdot 10^{-4} \cdot S_B^2 + 0,473 \cdot n_B^2 - 1,413 \quad (12)$$

Использование уравнения (12) предполагает ( $D_{II} = 250$  мм) использование  $S_B$  мм;  $n_B$  Гц, тогда глубина ламинарной зоны  $H_{лп}$  мм. Учитывая тот факт, что в настоящее время широкое распространение получили двухшнековые прессы [10], отличающиеся значительно меньшими диаметрами витков провели аналогичное моделирование для этих значений:

$$H_{лп}(S_B, n_B) = 0,081 \cdot S_B + 31,35 \cdot n_B - 0,025 \cdot S_B \cdot n_B - 6,607 \cdot 10^{-4} \cdot S_B^2 + 4,165 \cdot 10^{-4} \cdot n_B^2 - 2,423 \quad (13)$$

Использование уравнения (13) предполагает ( $D_{II} = 84$  мм) использование  $S_B$  мм;  $n_B$  Гц, тогда глубина ламинарной зоны  $H_{лп}$  мм. При этом частота вращения шнека в уравнении (13) от 2 до 5 Герц и шаг загрузочного витка от 50 мм до 72 мм. В результате проведенного исследования рассмотрена концепция течения структурированных дисперсных систем в канале шнека. Показана возможность использования Бингамовской реологической модели для описания как нелинейного пластичного, так и псевдопластичного течения.

### Заключение

В результате проведенного исследования установлена возможность использования реологической модели Бингама для описания структурного вязко-пластичного течения в канале шнека. Установлено что при увеличении глубины шнека в слоистом течении формируется пластичная застойная зона, границы которой определяются при сопоставлении эффективной структурированной Бингамовской вязкости. Получены инженерные зависимости позволяющие определять предельную глубину канала загрузочного шнека, гарантирующие отсутствие этой зоны.

#### *Литература:*

1. Gukasyan A.V. Identification of rheological dependencies of oil material processed in a screw press // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Т. 8, №10. С. 708-718.

2. Gukasyan A.V. Simulation of material viscosity upon expression of vegetable oil in extruder // Вісник Національної академії керівних кадрів в культурі і мистецтв. 2019. №1. С. 103-110.

3. Течение масляного материала в выпускном устройстве пресса / Гукасян А.В. [и др.] // Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств: материалы II Международной научно-практической конференции. Воронеж, 2016. С. 146-150.

4. Шахрай Т.А., Лукьяненко М.В., Схаляхов А.А. Исследование технологических свойств растительных лецитинов / Корнен Н.Н. [и др.] // Новые технологии. 2015. Вып. 3. С. 19-24.

5. Косачев В.С. Повышение эффективности рафинации масел в мыльно-щелочной среде на основе изучения физико-химических особенностей процесса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар: КубГПИ, 1985. 28 с.

6. Косачев В.С. Теоретические и практические основы осложненной поверхностно-активными веществами массопередачи в процессе рафинации масел: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Краснодар: КубГТУ, 1998. 48 с.

7. Матвеев В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестник Московского Университета. Серия, 2: Химия. 2011. Т. 52, №4. С. 243-276.

8. Схаляхов А.А. Математическая модель гидравлики мембранного реактора в линии производства биодизеля // Новые технологии. 2009. Вып. 3. С. 39-42.

9. Схаляхов А.А. Математическое моделирование кинетики и свойств реакционной смеси при производстве биодизельного топлива из масел // Новые технологии. 2009. Вып. 3. С. 29-35.

10. Деревенко В.В., Диденко А.В., Новоженова А.Д. Импортзамещающая техника и технология маслодобывающей отрасли // Научные труды КубГТУ. 2019. №1. С. 358-366.

#### *Literature:*

1. Gukasyan A.V. Identification of rheological dependencies of oil material processed in a screw press // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. V. 8, No. 10. P. 708-718.

2. Gukasyan A.V. Simulation of material viscosity upon expression of vegetable oil in extruder // Вісник Національної академії керівних кадрів в культурі і мистецтв. 2019. No. 1. P. 103-110.
3. Oil material flow in a release slide of a press / A. Gukasyan [et al.] // Transfer phenomena in processes and apparatus of chemical and food industries: materials of the II International Scientific and Practical Conference. Voronezh, 2016. P. 146-150.
4. Shakhrai T.A., Lukyanenko M.V., Shkhalyakhov A.A. Research of technological properties of plant lecithins / Kornen N.N. [et al.] // New technologies. 2015. Issue. 3. P. 19-24.
5. Kosachev V.S. Improving the efficiency of oil refining in a soap-alkaline medium based on a study of physicochemical characteristics of the process: abstract. dis. ... Cand. Tech. sciences. Krasnodar: KubSPI, 1985. 28 p.
6. Kosachev V.S. Theoretical and practical fundamentals of mass transfer complicated by surfactants in oil refining: abstract. dis. ... Dr. Tech. sciences. Krasnodar: Kuban State Technical University, 1998. 48 p.
7. Matveenko V.N., Kirsanov E.A. Viscosity and structure of disperse systems // Bulletin of Moscow University. Series 2: Chemistry. 2011. V. 52, No. 4. P. 243-276.
8. Shkhalyakhov A.A. Mathematical model of membrane reactor hydraulics in a biodiesel production line // New Technologies. 2009. Issue. 3. P. 39-42.
9. Shkhalyakhov A.A. Mathematical modeling of the kinetics and properties of the reaction mixture in the production of biodiesel from oils // New Technologies. 2009. Issue. 3. P. 29-35.
10. Derevenko V.V., Didenko A.V., Novozhenova A.D. Import-substituting equipment and technology for oil industry // Scientific works of KubSTU. 2019.No 1. P. 358-366.