

**Гукасян А.В.****ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЯЗКОСТИ  
МАСЛИЧНОГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ  
ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Гукасян Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологического оборудования и систем жизнеобеспечения ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия  
E-mail: aleksandr\_gukasyan@mail.ru  
Тел.: 8 (861) 275 22 79

*Целью исследования было изучение эффективной вязкости масличного материала в процессе отжима при экструзионной обработке масличных материалов на прессе ФП. Использовали феноменологическую модель слоистого течения для описания процесса экструдирования и потоковую балансовую модель фильтрации.*

*В результате проведенных исследований получена оценка эффективной вязкости масличного материала в процессе изменения потока масличного материала в зеерной камере на витках шнека маслоотжимного агрегата. Получено уравнение, обобщающее известное одномерное уравнение Пуазейля, использование которого позволяет определить функциональную зависимость объемного расхода потока структурированного бингамова тела через выпускное устройство пресса, что существенно повышает точность идентификации реологических показателей потока при известных геометрических параметрах выпускного устройства.*

*Проведен сравнительный анализ альтернативных моделей течения пластиичной массы при экструзионной транспортировке масличных материалов, который показал, что на определение зависимости пропускной способности шнекового канала пресса (экструдера) существенным образом влияет, переход от одномерной к двумерной модели. Главным выводом является необходимость использования теоретически обоснованной модели слоистого течения в канале шнека при описании процесса извлечения растительного масла.*

*В результате были определены давления, развиваемые шнеком на витках зеерной камеры при различных режимах работы маслоотжимного агрегата. Показана возможность использования технологических режимов работы для прогнозирования извлечения масла и давления, развиваемого витками шнека в зеерной камере.*

**Ключевые слова:** феноменологическая модель, кинетика отжима, слоистое течение, эффективная вязкость, процесс экструдирования, масличный материал.



**Для цитирования:** Гукасян А.В. / Феноменологическая модель эффективной вязкости масличного материала в процессе экструзионной обработки // Новые технологии. 2019. Вып. 4(50). С. 23-34. DOI: 10.24411/2072-0920-2019-10402.

Gukasyan A.V.

## PHENOMENOLOGICAL MODEL OF EFFECTIVE VISCOSITY OF OIL MATERIAL DURING EXTRUSION PROCESSING

Gukasyan Alexander Valerievich, Candidate of Technical Sciences, an associate Professor, head of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems FSBEI of HE «Kuban State Technological University», Russia  
E-mail: aleksandr\_gukasyan@mail.ru  
Tel.: 8 (861) 275 22 79

*The aim of the research is to study the effective viscosity of oil-bearing material during the extraction process during extrusion processing of oil-bearing materials in the FP press. A phenomenological model of a layered flow has been used to describe the extrusion process and a flow balance model of filtration. As a result of the research, an estimation of the effective viscosity of the oil-bearing material in the process of changing the flow of oil-bearing material in the curb chamber on the flight screw of the oil-press unit has been obtained. An equation has been obtained that generalizes the well-known one-dimensional Poiseuille equation, the use of which allows us to determine the functional dependence of the volumetric flow rate of the structured Bingham body flow through the press outlet device, which significantly increases the accuracy of identifying the flow rheological parameters with known geometric parameters of the outlet device. A comparative analysis of alternative models of the flow of plastic mass during the extrusion transportation of oilseed materials has been carried out, which shows that the transition from a one-dimensional to a two-dimensional model significantly affects the determination of the capacity of the screw press channel of (extruder). The main conclusion is the need to use a theoretically based model of layered flow in the screw channel when describing the process of extracting vegetable oil. As a result, the pressures developed by the screw on the turns of the curb chamber under various operating conditions of the oil extraction unit have been determined.*

*The possibility of using technological operating modes to predict the extraction of oil and pressure developed by the flight screw in the curb chamber is shown.*

**Keywords:** *phenomenological model, pressing kinetics, layered flow, effective viscosity, extrusion process, oilseed material.*

**For citation:** Ghukasyan A.V. / Phenomenological model of effective viscosity of oil material during extrusion processing // Novye Tehnologii. 2019. Issue. 4(50). P. 23-34. DOI: 10.24411/2072-0920-2019-10402.

### **Введение**

По «феноменологической» моделью обычно понимают такую формулировку закономерностей в области наблюдаемых физических явлений, в которой делается попытка свести описываемые связи к лежащим в их основе общим законам природы [1], через которые они могли бы быть понятыми.

Для технических приложений феноменологический подход важен с чисто прагматической точки зрения, так как позволяет строить инженерные модели [2] процессов и аппаратов.

Феноменологические модели используются в том случае, когда наблюдаются явления не могут быть сведены к общим законам природы из-за чрезвычайной сложности соответствующих явлений [3], которые не допускают такой возможности из-за возникающих математических трудностей.

В гидродинамике к таким моделям относятся отношения между скоростным напором и сопротивлением потоку, обменом теплотой и импульсом в неньютоновских реологических системах.

### **Методика**

Методика базируется на том, что объемный расход потока структурированной жидкости, определяемый для бингамова тела через выпускное устройство пресса, представляет собой течение с жестким ядром. При этом напряжение в этой области не превышает предел текучести бингамова тела.

Получено уравнение, обобщающее известное одномерное уравнение Пуазейля, использование которого позволяет определить функциональную зависимость объемного расхода потока структурированного бингамова тела через выпускное устройство пресса, что существенно повышает точность идентификации реологических показателей потока при известных геометрических параметрах выпускного устройства [4].

Учитывая базовые геометрические параметры, представленные в этой работе, были определены эквивалентные габаритные размеры каналов шнека маслоотжимного агрегата ФП (таблица 1).

Габариты ( $a$  – высота канала;  $b$  – ширина канала;  $L_9$  – длина канала) эквивалентных по гидравлическому радиусу прямоугольных каналов шнека с учетом эквивалентных диаметров ( $d_9$  – вала и  $D_9$  – витка) определялись с учетом 3D мо-

делирования свободного объема витков ( $V_{c6}$ ) реального маслоотжимного агрегата ФП.

Таблица 1 - Эквивалентные габаритные размеры параметры шнека маслоотжимного агрегата ФП

| Габариты прямоугольного канала шнека |          |          |                      |                      |                      |                       |
|--------------------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| <i>i<sub>6</sub></i>                 | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>L<sub>9</sub></i> | <i>d<sub>9</sub></i> | <i>D<sub>9</sub></i> | <i>V<sub>c6</sub></i> |
| Индекс витка п/п                     | 0        | 62,1     | 231,4                | 595,4                | 123,9                | 248,1                 |
|                                      | 1        | 62,8     | 191,2                | 567,4                | 123,2                | 248,8                 |
|                                      | 2        | 63,4     | 129,5                | 662,6                | 122,6                | 249,4                 |
|                                      | 3        | 38,6     | 108,2                | 660,5                | 122,4                | 199,6                 |
|                                      | 4        | 32,8     | 95,6                 | 624,7                | 134,2                | 199,8                 |
|                                      | 5        | 22,9     | 91,6                 | 682,1                | 174,1                | 219,9                 |
|                                      | 6        | 17,9     | 82,1                 | 792,2                | 184,1                | 219,9                 |
|                                      | 7        | 17,9     | 66,7                 | 763,8                | 204,1                | 239,9                 |
| б/р                                  |          | мм       |                      |                      | литр                 |                       |

Проведенный сравнительный анализ альтернативных моделей течения пластичной массы при экструзионной транспортировке масличных материалов, показал, что на определение зависимости пропускной способности шнекового канала пресса (экструдера) существенным образом влияет, переход от одномерной к двумерной модели [5]. Поэтому использовали решение задачи Куэтта-Пуассона на прямоугольном сечении в виде ограниченного ряда из пяти слагаемых:

$$V_s(x, y, a, b, \Delta P \mu) = v(x) - \sum_{k=0}^4 \left\{ \left[ \frac{4 \cdot v(x)}{\pi \cdot (2 \cdot k + 1)} - \frac{4 \cdot b^2}{\pi^3 \cdot (2 \cdot k + 1)^3} \cdot \Delta P \mu \right] \cdot ch\left(\pi \cdot x \cdot \frac{2 \cdot k + 1}{b}\right) + \frac{4 \cdot b^2}{\pi^3 \cdot (2 \cdot k + 1)^3} \cdot \Delta P \mu + \right. \\ \left. + \frac{4 \cdot sh\left(\pi \cdot x \cdot \frac{2 \cdot k + 1}{b}\right)}{\pi^3 \cdot (2 \cdot k + 1)^3} \cdot \left[ b^2 \cdot th\left(\pi \cdot a \cdot \frac{2 \cdot k + 1}{b}\right) \cdot \Delta P \mu - v(x) \cdot cth\left(\pi \cdot a \cdot \frac{2 \cdot k + 1}{b}\right) \cdot \pi^2 \cdot (2 \cdot k + 1)^2 \right] \right] \cdot \sin\left(\pi \cdot y \cdot \frac{2 \cdot k + 1}{b}\right) \right\} \quad (1)$$

где  $v(x)$  – скорость канала витка по его текущей высоте  $x$ , м/сек;  $\Delta P \mu = \frac{\Delta P}{\mu}$  –

гидравлическое сопротивление потоку слоистого течения,  $(\text{м}\cdot\text{сек})^{-1}$ ;  $a, b$  – габариты канала  $a \leq b$  соответственно его высота и ширина, м;  $x, y$  – текущая высота и ширина сечения канала соответственно,  $0 \leq x \leq a$ ,  $0 \leq y \leq b$ , м.

Использование формулы (1) предполагает использование скорости канала витка по его текущей высоте, определяемой по угловым скоростям вала и пера витка с учетом его габаритов (таблица) при различной частоте вращения шнека маслоотжимного агрегата (таблица 2).

Таблица 2 - Эквивалентные скорости стенок витков маслоотжимного агрегата ФП  
при изменении частоты вращения шнека  $\omega_0 = 1,571$  Гц;  $\omega_1 = 2,094$  Гц;  
 $\omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 2,827$  Гц

| Индекс опыта, п/п | Индекс витка п/п |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | $v^3$ , м/сек    | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 0                 | 0,547            | 0,564 | 0,585 | 0,585 | 0,647 | 0,846 | 0,897 | 1,000 |
| 1                 | 0,730            | 0,752 | 0,780 | 0,780 | 0,863 | 1,128 | 1,196 | 1,333 |
| 2                 | 0,985            | 1,015 | 1,052 | 1,053 | 1,164 | 1,522 | 1,615 | 1,800 |
| 3                 | 0,985            | 1,015 | 1,052 | 1,053 | 1,164 | 1,522 | 1,615 | 1,800 |
| 4                 | 0,985            | 1,015 | 1,052 | 1,053 | 1,164 | 1,522 | 1,615 | 1,800 |
| $V^3$ , м/сек     | 0                | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| 0                 | 1,097            | 1,139 | 1,190 | 0,954 | 0,963 | 1,068 | 1,072 | 1,175 |
| 1                 | 1,463            | 1,519 | 1,586 | 1,272 | 1,284 | 1,425 | 1,429 | 1,567 |
| 2                 | 1,974            | 2,051 | 2,142 | 1,718 | 1,734 | 1,923 | 1,930 | 2,116 |
| 3                 | 1,974            | 2,051 | 2,142 | 1,718 | 1,734 | 1,923 | 1,930 | 2,116 |
| 4                 | 1,974            | 2,051 | 2,142 | 1,718 | 1,734 | 1,923 | 1,930 | 2,116 |

Зная угловые скорости на валу ( $v^3$ ) и верхней части пера витка ( $V^3$ ) определяли изменение этого показателя по высоте канала шнека:

$$v(x, i_e, j_o) = v_{i_e, j_o}^3 + \frac{v_{i_e, j_o}^3 - v_{i_e, j_o}^3}{a_{i_e}} \cdot x \quad (2)$$

где  $i_e$  – индекс витка,  $i_e = 0, 1, \dots, 7$ ;  $j_o$  – индекс опыта,  $j_o = 0, 1, \dots, 4$ .

В уравнение скоростного напора (1) входит гидравлическое сопротивление потоку слоистого течения, определение которого связано с потоком экструдируемого материала:

$$Q_s(i_e, j_o, \Delta P \mu) = \int_0^{b_{i_e}} \int_0^{a_{i_e}} V_s(x, y, a_{i_e}, b_{i_e}, \Delta P \mu) dx dy \quad (3)$$

Сопоставляя результаты расчетов по формуле (3) с учетом (2) можно определить изменение гидравлического сопротивления потоку слоистого течения.

В настоящее время, используя известные способы расчета процесса отжима, не позволяют моделировать течения неильтоновских жидкостей, осложненных процессами сжимаемости, диффузии и массопереноса с требуемой для проектирования оборудования точностью. Поэтому использовали инженерный метод расчета характеристик пресса [6] базирующийся на одномерной модели экструдирования масличного материала в процессе отжима [7] на прессе ФП (таблица 3).

Таблица 3 - Распределение потоков масличного материала по виткам  
маслоотжимного агрегата ФП при изменении частоты вращения шнека  
 $\omega_0 = 1,571 \text{ Гц}$ ;  $\omega_1 = 2,094 \text{ Гц}$ ;  $\omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 2,827 \text{ Гц}$

| Одномерная модель |   | Индекс опыта, п/п |           |           |           |           |
|-------------------|---|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                   |   | $j_o = 0$         | $j_o = 1$ | $j_o = 2$ | $j_o = 3$ | $j_o = 4$ |
| $i_e$             |   | $q_{i,e}$         | $q_{i,e}$ | $q_{i,e}$ | $q_{i,e}$ | $q_{i,e}$ |
| Индекс витка п/п  | 0 | 1323              | 1672      | 1724      | 1864      | 1896      |
|                   | 1 | 1296              | 1641      | 1699      | 1834      | 1865      |
|                   | 2 | 1216              | 1543      | 1608      | 1733      | 1762      |
|                   | 3 | 1131              | 1439      | 1510      | 1623      | 1651      |
|                   | 4 | 1041              | 1328      | 1403      | 1506      | 1532      |
|                   | 5 | 944               | 1206      | 1285      | 1376      | 1402      |
|                   | 6 | 851               | 1085      | 1164      | 1247      | 1274      |
|                   | 7 | 724               | 895       | 925       | 1046      | 1089      |
| б/п               |   | литр/час          |           |           |           |           |

Сопоставляя потоковые данные  $Q_e(i_e, j_o, \Delta P \mu) = q_{i_e, j_o}$  по уравнению (3) и полученные на основе одномерной модели экструдирования масличного материала в процессе отжима на прессе ФП (Таблица 3) получили возможность определить изменение гидравлического сопротивления  $\Delta P \mu_{i_e, j_o}$  потоку слоистого течения в каналах шнека (Таблица 4).

Таблица 4 - Изменение гидравлического сопротивления потоку слоистого течения в каналах шнека при изменении частоты вращения шнека  $\omega_0 = 1,571 \text{ Гц}$ ;  
 $\omega_1 = 2,094 \text{ Гц}$ ;  $\omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 2,827 \text{ Гц}$

| Двумерная модель |   | Индекс опыта, п/п  |                    |                    |                    |                    |
|------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                  |   | $j_o = 0$          | $j_o = 1$          | $j_o = 2$          | $j_o = 3$          | $j_o = 4$          |
| $i_e$            |   | $\Delta P / \mu_0$ | $\Delta P / \mu_1$ | $\Delta P / \mu_2$ | $\Delta P / \mu_3$ | $\Delta P / \mu_4$ |
| Индекс витка п/п | 0 | 1836               | 2455               | 3353               | 3342               | 3340               |
|                  | 1 | 1986               | 2656               | 3631               | 3619               | 3616               |
|                  | 2 | 2438               | 3262               | 4473               | 4455               | 4451               |
|                  | 3 | 4294               | 5773               | 8092               | 8014               | 7995               |
|                  | 4 | 5855               | 7882               | 11132              | 11003              | 10970              |
|                  | 5 | 11921              | 16085              | 22949              | 22620              | 22528              |
|                  | 6 | 17669              | 23965              | 34816              | 34134              | 33916              |
|                  | 7 | 21260              | 29089              | 42244              | 40972              | 40521              |
| б/п              |   | 1/(м·сек)          |                    |                    |                    |                    |

Зная величины гидравлического сопротивления (Таблица 4) определили эффективную вязкость масличного материала в процессе отжима с учетом гидростатических давлений, развивающихся шнеком маслоотжимного агрегата, определенных из одномерной модели кинетики отжима на прессе ФП.

Таблица 5 - Распределение гидростатического давления в каналах шнека при изменении частоты вращения шнека  $\omega_0 = 1,571 \text{ Гц}$ ;  $\omega_1 = 2,094 \text{ Гц}$ ;  
 $\omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 2,827 \text{ Гц}$

| Одномерная модель | Индекс опыта, п/п |           |           |           |           |
|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                   | $j_o = 0$         | $j_o = 1$ | $j_o = 2$ | $j_o = 3$ | $j_o = 4$ |
| $i_6$             | $p_{i,0}$         | $p_{i,1}$ | $p_{i,2}$ | $p_{i,3}$ | $p_{i,4}$ |
| Индекс витка п/п  | 0                 | 2209      | 2424      | 2743      | 2735      |
|                   | 1                 | 2392      | 2549      | 2782      | 2794      |
|                   | 2                 | 3248      | 3169      | 3020      | 3122      |
|                   | 3                 | 5195      | 4550      | 3566      | 3863      |
|                   | 4                 | 10575     | 8181      | 4901      | 5698      |
|                   | 5                 | 31465     | 21230     | 8900      | 11415     |
|                   | 6                 | 141996    | 84960     | 23298     | 32984     |
|                   | 7                 | 4458974   | 4217379   | 965432    | 570566    |
| $b/p$             |                   | Па        |           |           |           |

Используя соотношение  $\Delta P = \frac{P}{L_9}$  по данным распределения гидростатического давления в каналах шнека (Таблица 5) и длине каналов витков (Таблица 1) определили градиент давления в каждом витке.

Таблица 6 - Градиент давления в каналах шнека при изменении частоты вращения шнека  $\omega_0 = 1,571 \text{ Гц}$ ;  $\omega_1 = 2,094 \text{ Гц}$ ;  $\omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 2,827 \text{ Гц}$

| $L_9$ | $\Delta P_0$ | $\Delta P_1$ | $\Delta P_2$ | $\Delta P_3$ | $\Delta P_4$ |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,595 | 3710         | 4072         | 4608         | 4593         | 4592         |
| 0,567 | 323          | 220          | 69           | 104          | 110          |
| 0,663 | 1291         | 935          | 358          | 495          | 513          |
| 0,661 | 2948         | 2091         | 828          | 1122         | 1154         |
| 0,625 | 8612         | 5813         | 2136         | 2937         | 3002         |
| 0,682 | 30626        | 19130        | 5863         | 8382         | 8446         |
| 0,792 | 139532       | 80451        | 18175        | 27229        | 26325        |
| 0,764 | 5652020      | 5410386      | 1233493      | 703830       | 452286       |
| M     | Па/м         |              |              |              |              |

Зная градиент давления (Таблица 6) определили изменение эффективной вязкости масличного материала в каналах витков шнека в процессе отжима расти-

тельного масла по соотношению  $\Delta P \mu = \frac{\Delta P}{\mu}$ , которое определяет влияние параметров прессования на изменение этого показателя.

Таблица 7 - Изменение эффективной вязкости масличного материала  
в каналах витков шнека в процессе отжима

| Двумерная модель |   | Индекс опыта, п/п |             |             |             |             |
|------------------|---|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  |   | $j_o = 0$         | $j_o = 1$   | $j_o = 2$   | $j_o = 3$   | $j_o = 4$   |
| $i_e$            |   | $\mu_{i,0}$       | $\mu_{i,1}$ | $\mu_{i,2}$ | $\mu_{i,3}$ | $\mu_{i,4}$ |
| Индекс витка п/п | 0 | 2,02              | 1,66        | 1,37        | 1,37        | 1,37        |
|                  | 1 | 0,16              | 0,08        | 0,02        | 0,03        | 0,03        |
|                  | 2 | 0,53              | 0,29        | 0,08        | 0,11        | 0,12        |
|                  | 3 | 0,69              | 0,36        | 0,10        | 0,14        | 0,14        |
|                  | 4 | 1,47              | 0,74        | 0,19        | 0,27        | 0,27        |
|                  | 5 | 2,57              | 1,19        | 0,26        | 0,37        | 0,37        |
|                  | 6 | 7,90              | 3,36        | 0,52        | 0,80        | 0,78        |
|                  | 7 | 265,85            | 185,99      | 29,20       | 17,18       | 11,16       |
| б/р              |   | Па·сек            |             |             |             |             |

Полученные данные изменения эффективной вязкости масличного материала (Таблица 7) обобщали на основе мультиплекативной модели изменения вязкости в зависимости от логистической зависимости вязкости масличного материала ( $\mu_s$ ) от его масличности ( $f$ ) и Бингамовской эффективной вязкости от скорости сдвига ( $\gamma$ ) в канале витка, определенной по уточненной двумерной модели слоистого течения [8] и среднего гидростатического давления ( $p$ ) на витке:

$$\mu^*(f, \gamma, p) = \frac{a_f}{1 + b_f \cdot \exp(-c_f \cdot f)} \cdot \left( a_\gamma \cdot \text{Па} \cdot \text{сек} + \frac{b_\gamma \cdot p + c_\gamma \cdot \text{Па}}{\gamma} \right) \quad (4)$$

где  $a_f, b_f, c_f$  – коэффициенты логистической зависимости эффективной вязкости;  $a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma$  – коэффициенты Бингамовской эффективной вязкости. Для определения коэффициентов мультиплекативной модели изменения вязкости использовали квадратичную целевую функцию  $Z(a_f, b_f, c_f, a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma)$  отклонений изменения эффективной вязкости масличного материала в каналах витков шнека в процессе отжима (Таблица 7) от её расчетного значения, определяемого уравнением (4):

$$Z(a_f, b_f, c_f, a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma) = \sum_{i_e=0}^7 \left\{ \sum_{j_o=0}^4 \left[ \frac{a_f}{1 + b_f \cdot \exp(-c_f \cdot f_{i_e, j_o})} \cdot \left( a_\gamma \cdot \text{Па} \cdot \text{сек} + \frac{b_\gamma \cdot p_{i_e, j_o} + c_\gamma \cdot \text{Па}}{\gamma_{i_e, j_o}} \right) - \mu_{i_e, j_o} \right]^2 \right\} \quad (5)$$

Для расчета коэффициентов мультиплекативной модели эффективной вязкости, определяемых минимумом (5) целевой функции  $Z(a_f, b_f, c_f, a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma)$  необходимо

ходимо получить оценку скорости сдвига  $\gamma_{\vartheta}(i_e, j_o, \Delta P \mu_{i_e, j_o})$  масличного материала в каналах шнека. Этот параметр рассчитывали по среднему модулю градиента скорости сдвига скоростного напора (1) в канале на основе потоковых данных  $Q_{\vartheta}(i_e, j_o, \Delta P \mu_{i_e, j_o}) = q_{i_e, j_o}$  по уравнению (3) и полученных на основе одномерной модели экструдирования масличного материала в процессе отжима на прессе ФП (Таблица 3) с учетом гидравлических сопротивлений потоку (Таблица 4):

$$\gamma_{\vartheta}(i_e, j_o, \Delta P \mu_{i_e, j_o}) = \frac{\int_0^{b_{i_e}} \int_0^{a_{i_e}} |\nabla_{x,y} [V_{\vartheta}(x, y, a_{i_e}, b_{i_e}, \Delta P \mu_{i_e, j_o})]| dx dy}{a_{i_e} \cdot b_{i_e}} \quad (6)$$

Результаты расчетов скорости сдвига (6) представлены по виткам маслоотжимного агрегата ФП при изменении частоты вращения шнека  $\omega_0 = 1,571$  Гц;  $\omega_1 = 2,094$  Гц;  $\omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 2,827$  Гц и различном гидравлическом сопротивлении выпускного устройства пресса (Таблица 8).

Таблица 8 - Изменение средней скорости сдвига масличного материала в каналах витков шнека в процессе отжима

| Двумерная модель |   | Индекс опыта, п/п |                |                |                |                |
|------------------|---|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  |   | $j_o = 0$         | $j_o = 1$      | $j_o = 2$      | $j_o = 3$      | $j_o = 4$      |
| $i_e$            |   | $\gamma_{i,0}$    | $\gamma_{i,1}$ | $\gamma_{i,2}$ | $\gamma_{i,3}$ | $\gamma_{i,4}$ |
| Индекс витка п/п | 0 | 34                | 46             | 62             | 62             | 62             |
|                  | 1 | 37                | 49             | 66             | 66             | 66             |
|                  | 2 | 42                | 56             | 77             | 76             | 76             |
|                  | 3 | 48                | 65             | 89             | 89             | 89             |
|                  | 4 | 56                | 75             | 104            | 104            | 103            |
|                  | 5 | 81                | 109            | 153            | 151            | 151            |
|                  | 6 | 96                | 130            | 184            | 182            | 181            |
|                  | 7 | 113               | 153            | 217            | 212            | 211            |
| б/р              |   | Гц                |                |                |                |                |

Данные изменения средней скорости сдвига масличного материала в каналах витков шнека в процессе отжима (Таблица 8) использовали для расчета коэффициентов мультипликативной модели эффективной вязкости с помощью встроенной функции Minimize PTC Math CAD, которая решает задачу поиска экстремума целевой функции  $Z(a_f, b_f, c_f, a_{\gamma}, b_{\gamma}, c_{\gamma})$ .

#### Результаты и их обсуждение

На основе изменений конструктивно-технологических параметров работы маслоотжимного агрегата ФП были установлены коэффициенты мультипликативной модели эффективной вязкости (Таблица 9).

Таблица 9 - Коэффициенты мультипликативной модели эффективной вязкости масличного материала в каналах витков шнека в процессе отжима

| $a_f$   | $b_f$    | $c_f$                    | $a_\gamma$                | $b_\gamma$               | $c_\gamma$ |
|---------|----------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|------------|
| 0,01037 | -0,99995 | $2,39344 \times 10^{-4}$ | $-5,06697 \times 10^{-3}$ | $1,11446 \times 10^{-4}$ | 1,52837    |

Найденные в результате применения встроенной функции Minimize PTC Math CAD, по поиску экстремума целевой функции  $Z(a_f, b_f, c_f, a_\gamma, b_\gamma, c_\gamma)$  коэффициенты мультипликативной модели эффективной вязкости позволили получить феноменологическую модель эффективной вязкости масличного материала в процессе его экструзионной обработки (Таблица 10).

Таблица 10 - Мультипликативная модель эффективной вязкости масличного материала в каналах витков шнека в процессе отжима

| Двумерная модель |   | Индекс опыта, п/п |             |             |             |             |
|------------------|---|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  |   | $j_o = 0$         | $j_o = 1$   | $j_o = 2$   | $j_o = 3$   | $j_o = 4$   |
| $i_6$            |   | $\mu_{i,0}$       | $\mu_{i,1}$ | $\mu_{i,2}$ | $\mu_{i,3}$ | $\mu_{i,4}$ |
| Индекс витка п/п | 0 | 2,791             | 1,993       | 1,353       | 1,372       | 1,375       |
|                  | 1 | 2,869             | 2,056       | 1,402       | 1,425       | 1,428       |
|                  | 2 | 2,654             | 1,865       | 1,226       | 1,255       | 1,260       |
|                  | 3 | 2,629             | 1,779       | 1,079       | 1,125       | 1,132       |
|                  | 4 | 2,931             | 1,856       | 0,992       | 1,067       | 1,076       |
|                  | 5 | 3,601             | 1,957       | 0,753       | 0,879       | 0,889       |
|                  | 6 | 10,460            | 4,735       | 1,069       | 1,438       | 1,432       |
|                  | 7 | 265,852           | 182,474     | 27,400      | 16,625      | 11,162      |
| б/р              |   | Па·сек            |             |             |             |             |

Сравнительный анализ данных по изменению эффективной вязкости (Таблица 7) и мультипликативной модели (Таблица 10) показал высокую корреляционную связь ( $R = 0,9998$ ) этих величин.

Следовательно, мультипликативная феноменологическая модель вязкости может быть использована для прогнозирования давлений, развиваемых витками шнека в зеерной камере.

### Заключение

В результате проведенного исследования установлена возможность использования усредненных интегральных показателей при описании установившегося режима экструдирования масличных материалов. Использование феноменологической модели эффективной вязкости для описания процессов экструдирования вязко-пластичных материалов позволило прогнозировать давление, раз-

виваемое витками маслоотжимного агрегата и перейти в дальнейшем к моделированию кинетики отжима растительного масла на зеерных витках пресса.

*Литература:*

1. Течение масличного 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.
2. Зависимости для описания теплообмена в слое / Косачев В.С. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. №2/3. С. 82-83.
3. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Математическое моделирование процессов сушки и кондиционирования зерна. Потенциалы массопереноса: монография. Saarbrücken: LAPLAMBERT, 2012. 136 с.
4. Gukasyan A.V. Identification of rheological dependencies of oil material processed in a screw press // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. T. 8, №10. C. 708-718.
5. Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. Two-dimensional mathematical model of oil-bearing materials in extrusion-type transportation over rectangular screw core // Journal of Physics: Conference Series. 2018. T. 1015. C. 032-051.
6. Gukasyan A.V. Simulation of material viscosity upon expression of vegetable oil in extruder // Вісник Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв. 2019. №1. С. 103-110.
8. Кошевой Е.П., Гукасян А.В., Косачев В.С. Двумерная модель течения материала в канале шнека с неподвижной крышкой // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80, №1(75). С. 20-24.

*Literature:*

1. The flow of oilseed material in the exhaust device of the press / Gukasyan A.V. [et al.] // Transport phenomena in processes and apparatuses of chemical and food industries: materials of the II International Scientific and Practical Conference. Voronezh, 2016. P. 146-150.
2. Dependencies for the description of heat transfer in a layer / Kosachev V.S. [et al.] // Proceedings of higher educational institutions. Food technology. 2008. No. 2/3. P. 82-83.
3. Podgorny S.A., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. Mathematical modeling of drying and conditioning processes of grain. Mass Transfer Potentials: a monograph. Saarbrücken: LAPLAMBERT, 2012. 136 p.
4. 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.

5. Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. Two-dimensional mathematical model of oil-bearing materials in extrusion-type transportation over rectangular screw core // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1015. P. 032-051.

6. Gukasyan A.V. Simulation of material viscosity upon expression of vegetable oil in extruder // News of the National Academy of Sciences of Culture and Mystery. 2019. No 1. P. 103-110.

7. Koshevoi E.P., Gukasyan A.V., Kosachev V.S. A two-dimensional model of the flow of material in the curb channel with a fixed cover // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018. V. 80, No. 1(75). P. 20-24.

УДК 664.683.61:664.642

DOI: 10.24411/2072-0920-2019-10403

**Демченко В.А., Иванова М.А., Верболоз Е.И., Ерофеев А.В., Нестеренко И. Г.**

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОПАРЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕКСОВ**

Демченко Вера Артемовна, кандидат технических наук, старший преподаватель факультета пищевой биотехнологии и инженерии

Университет ИТМО, Россия

E-mail: dem8484@gmail.com

Иванова Марина Александровна, кандидат технических наук, доцент факультета пищевой биотехнологии и инженерии

Университет ИТМО, Россия

E-mail: mtomz85@mail.ru

Верболоз Елена Игоревна, доктор технических наук, профессор, доцент факультета пищевой биотехнологии и инженерии

Университет ИТМО, Россия

E-mail: elenaverboloz@mail.ru

Ерофеев Артем Васильевич, магистр 2-го года обучения факультета пищевой биотехнологии и инженерии

Университет ИТМО, Россия

E-mail: temka2102@gmail.com

Нестеренко Иван Геннадьевич, аспирант 2-го года обучения факультета пищевой биотехнологии и инженерии

Университет ИТМО, Россия

E-mail: nester93iv@gmail.com