

EDN: OHFKIO

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-35-40



Научная статья

УДК 621.867.4



Силовой анализ движения материала в горизонтальном смесителе гидrolитической камеры на примере переработки соевого шрота

Михаил Геннадьевич Загоруйко¹,
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Марина Евгеньевна Бельшккина¹,
доктор сельскохозяйственных наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: bely-mari@yandex.ru;

Игорь Андреевич Башмаков¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: igorbash@bk.ru;

Алексей Максимович Марадудин²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ZeroCool23@yandex.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Российская Федерация;

²Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Российская Федерация

Реферат. Отмечен рост спроса на растительный белок в комбикормовой промышленности. Ожидается, что сырье, полученное из зерновых бобовых растений, в частности сои, одной из самых высокобелковых культур, займет центральное место как источник кормового протеина. В результате аналитических исследований определены ключевые направления для разработки проекта универсальной комбикормовой линии производства высокобелковых ингредиентов из соевого шрота. С целью повышения биологической ценности и усвояемости белка экструдированный соевый шрот подвергается ферментативному гидролизу в горизонтальном смесителе непрерывного действия. Представлено теоретическое описание процесса перемещения материала шнековым рабочим органом в гидrolитической камере. (*Цель исследования*) Провести силовой анализ движения материала в горизонтальном смесителе шнекового типа для выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров гидrolитической камеры. (*Материалы и методы*) Рассмотрена система сил, которые действуют на частицу материала, опирающуюся на винтовую поверхность горизонтального шнека и прижатую к стенке кожуха. (*Результаты и обсуждение*) В результате проекции всех активных сил, действующих на частицу материала, и условно приложенных к ней сил инерции получили систему уравнений. Установили, что мощность, необходимая на привод вала шнека, будет зависеть от состояния поверхностей винта шнека и кожуха, массы частицы, геометрических параметров шнека, полярных координат, характеризующих расположение частицы в шнеке, а также кинематических параметров переносного вращения шнека. (*Выводы*) Заключили, что разработанное математическое описание процесса движения, которое учитывает физико-механические свойства и геометрию потока материала, позволит при проектировании выбрать оптимальные конструктивные и режимные параметры смесителя для эффективной транспортировки материалов.

Ключевые слова: кормовой растительный белок, соевый шрот, ферментация, гидролизат, гидrolитическая камера, горизонтальный смеситель, шнек, частица, силы, системы координат.

■ **Для цитирования:** Загоруйко М.Г., Бельшккина М.Е., Башмаков И.А., Марадудин А.М. Силовой анализ движения материала в горизонтальном смесителе гидrolитической камеры на примере переработки соевого шрота // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N1. С. 35-40. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-35-40. EDN: OHFKIO.

Scientific article

Force Analysis of Material Movement in a Horizontal Mixer of a Hydrolytic Chamber: a Case Study of Soybean Meal Processing

Michail G. Zagoruiko¹,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor, leading researcher,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Marina E. Belyshkina¹,
Dr.Sc.(Agri.), chief researcher,
e-mail: bely-mari@yandex.ru;

Igor A. Bashmakov¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: igorbash@bk.ru;

Alexey M. Maradudin²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: ZeroCool23@yandex.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Centre VIM, Moscow, Russian Federation;

²Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russian Federation

Abstract. The paper addresses the increasing demand for plant-based protein in the compound feed industry. It emphasizes the role of grain legumes, particularly soy, one of the most protein-rich crops, as a primary feed protein source. Analytical studies have identified key strategies for developing a universal compound feed production line that integrates high-protein ingredients derived from soybean meal. To enhance protein digestibility and biological value, extruded soybean meal undergoes enzymatic hydrolysis in a continuous horizontal mixer. Additionally, the paper describes material movement within a hydrolytic chamber equipped with a screw-driven working unit. (*Research purpose*) The primary objective of the study is to conduct a force analysis of material movement in a horizontal screw mixer to determine the optimal structural and operational parameters of the hydrolytic chamber. (*Materials and methods*) The analysis focuses on the system of forces acting on a material particle resting on the helical surface of a horizontal screw and pressed against the inner wall of the casing. (*Results and discussion*) By projecting all active and assumed inertial forces acting on a material particle, a system of equations was derived. The study found that the power required to drive the screw shaft depends on multiple factors, including the condition of the screw and casing surfaces, particle mass, screw geometry, polar coordinates defining the particle's position within the screw, and the kinematic parameters of its rotational motion. (*Conclusions*) The developed mathematical model of material movement, which accounts for the physical and mechanical properties of the material and the geometry of its flow, facilitates the selection of optimal structural and operational parameters for the mixer. This ensures efficient material transport during the design process.

Keywords: feed vegetable protein, soybean meal, fermentation, hydrolysate, hydrolytic chamber, horizontal mixer, screw, particle, forces, coordinate systems.

For citation: Zagoruiko M.G., Belyshkina M.E., Bashmakov I.A., Maradudin A.M. Force analysis of material movement in a horizontal mixer of a hydrolytic chamber: a case study of soybean meal processing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 35-40. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-35-40. EDN: OHFKIO.

В последние годы наблюдается увеличение потребности в растительном белке при производстве кормов для сельскохозяйственных животных. Ожидается, что сырье, полученное из зерновых бобовых культур и прежде всего сои, известное своим высоким содержанием питательных белков, займет центральное место в качестве основного источника растительного белка в кормах [1]. Существуют технологии извлечения полнофункционального белка из растительного сырья, благодаря которым соевый шрот может эффективно использоваться в получении порошковых концентрированных форм для последующего применения в комбикормовой промышленности. Такие технологии возможно организовать на любом маслоэкстракционном или смежном заводе по глубокой переработке соевого шрота при производстве комбикормов [2].

В результате аналитических исследований были определены ключевые направления для дальнейшей разработки проекта универсальной комбикормовой линии производства высокобелковых кормовых ингредиентов в виде гидролизованного продукта из соевого шрота. Для определения исходных требований и технологических параметров линий были выявлены показатели, характеризующие технологические свойства компонентов комбикорма, которые обуславливают особенности процесса производства и дозирования комбикорма.

Исследование закономерностей рабочих процессов гидролитической камеры с определенными параметрами гидролиза позволит теоретически обосновать конструктивные и режимно-технологические параметры линии.

На рис. 1 представлена схема устройства для производства кормовых ферментативных гидролизатов, которое разделено на четыре рабочие зоны: ввода сырья I, охлаждения экструдированного сырья II, образования гидромодуля III и выгрузки гидролизованной массы IV.

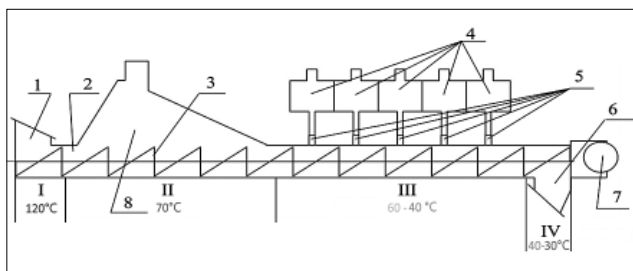


Рис. 1. Принципиальная схема установки для производства кормовых ферментативных гидролизатов: I – зона ввода сырья; II – зона охлаждения экструдированного сырья; III – зона образования гидромодуля; IV – зона выгрузки гидролизованной массы

Fig. 1. Schematic diagram of the installation for producing feed enzymatic hydrolysates: I – raw material input zone; II – cooling zone for extruded raw material; III – hydromodule formation zone; IV – hydrolysate mass output zone

Экструдированный соевый шрот через приемный отсек 1 зоны ввода сырья 1 загружается в цилиндрический корпус 2 и шнеком-смесителем 3 с электроприводом 7 перемещается вдоль установки. В зоне II экструдат дополнительно измельчается и гомогенизируется, а также за счет отвода пара через выступ 8 охлаждается до 50-70°C. Далее масса шнеком подается в зону III – гидролитическую камеру, в которой из резервуаров 4 через форсунки-дозаторы 5 в шрот добавляется водный раствор протеазы. Гидролизованная масса поступает в зону IV и выгружается через отсек 6.

Технологическое решение процесса автоматизированного гидролиза заключается во внесении экструдированной полножирной сои с высоким аминокислотным потенциалом непосредственно в рабочую массу с протеолитическими ферментами (гидро модуль), что приводит к увеличению степени гидролиза и ускорению расщепления белкового сырья. При непрерывном течении процесса исключается возможность пенообразования экструдата. Процесс осуществляется по принципу движения сред в реакторах вытеснения. Для достижения оптимальных режимов работы гидролитической камеры необходимо обосновать ее конструктивно-режимные параметры.

Следующим технологическим параметром работы гидролитической камеры является мощность перемешивания или число оборотов шнека. Частота вращения шнека существенно влияет на надежность и производительность устройства. Данный показатель зависит от вязкости и теплопроводности сырья. Вязкость реакционной массы необходимо поддерживать в пределах 10 000-20 000 мПа·с, что обеспечит оптимальную скорость движения сырья по зонам устройства, а также обеспечит равномерное вмешивание ферментной жидкости в субстратную массу. Чем выше частота вращения, тем большее давление может быть развито за один цикл вращения шнека.

Заданная частота обеспечит необходимую производительность и качественную работу гидро модуля. При работе с сырьем различной вязкости необходимо выбирать оптимальную частоту вращения шнека, чтобы избежать риска перегрева привода шнека, а также его заклинивания. Таким образом, баланс необходим для достижения оптимальных параметров при выборе частоты вращения.

Теоретическое описание процесса перемещения материала шнековым рабочим органом проводилось рядом авторов в различных областях его применения [3]. При этом исследователи прибегали к научной абстракции, т.е. рассматривали не реальное материальное тело, а его упрощенную модель [4]. В зависимости от физико-механических свойств пресуемого материала за его реологическую мо-

дель принималось течение вязкой жидкости (ньютоновской или неньютоновской) [5] или перемещение сыпучей среды (сплошной или зернистой) [6]. Во втором случае удобнее рассматривать сплошную модель сыпучей среды, так как при этом дифференциальные уравнения равновесия тела аналогичны уравнениям в теории упругости и пластичности [7]. Такой подход при рассмотрении напряженного состояния пресуемой массы позволяет все силы, действующие на отдельные частицы в точках соприкосновения с другими частицами, заменять мнимыми усилиями, непрерывно распределенными по произвольному сечению материала [8]. Это, в свою очередь, позволяет переходить от рассмотрения материальной частицы к системе частиц, совокупность которых составляет сыпучую среду [9].

Цель исследования. Провести силовой анализ движения материала в горизонтальном смесителе шнекового типа для выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Рассмотрим систему сил, действующую на частицу материала M , опирающуюся на винтовую поверхность горизонтального шнека и прижатую к стенке кожуха (рис. 2) [10]. Введем две системы координат: инерциальную $O_1x_1y_1z_1$ и неинерциальную $Oxyz$, совершающую переносное вращательное движение относительно инерциальной. Переносное вращение шнека вокруг оси Ox будет носить неравномерный характер, так как привод шнека осуществляется посредством прохождения материала через лопасти крыльчатки, установленной в начале вала [11].

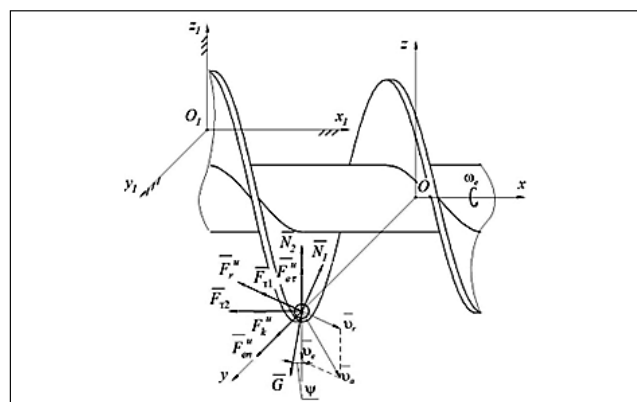


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу, перемещаемую шнековым смесителем

Fig. 2. Diagram of forces acting on a particle transported by the screw mixer

На частицу материала M будут действовать следующие усилия [12]:

- N_1 – нормальная реакция наклонной поверхности шнека, Н;
- N_2 – нормальная реакция поверхности кожуха, Н;

- G – вес частицы материала, Н;
- $F_{\tau 1}$ – сила трения частицы о поверхность шнека, Н; $F_{\tau 1} = N_1 f_1$, где f_1 – коэффициент трения материала о лопасть винта;
- $F_{\tau 2}$ – сила трения частицы о поверхность кожуха, Н; $F_{\tau 2} = N_2 f_2$, где f_2 – коэффициент трения материала о стенку кожуха;
- F_{en}^u – нормальная составляющая переносной силы инерции, Н; $F_{en}^u = m r \omega_e^2$, где m – масса частицы материала, кг; r – радиус удаления частицы от оси переносного вращения шнека Ox , м; ω_e – угловая скорость переносного вращения, c^{-1} ;
- F_{er}^u – тангенциальная составляющая переносной силы инерции, Н; $F_{er}^u = m r \frac{d^2 \psi}{dt^2}$, где ψ – угол, на который отклоняется частица при переносном вращении с угловой скоростью ω_e , рад;
- F_r^u – относительная сила инерции, Н;
 $F_r^u = m \frac{dv_r}{dt}$, где v_r – скорость относительного перемещения частицы в неинерциальной системе $Oxyz$, м/с;
- F_k^u – сила инерции Кориолиса, Н;
 $F_k^u = 2 m \omega_e v_r \cos \alpha$, где α – угол подъема винтовой линии шнека, рад [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Используя принцип Даламбера [14], спроецируем все активные силы, действующие на частицу материала M , и условно приложенные к ней силы инерции на оси неинерциальной системы координат $Oxyz$ [15]. В результате получим систему уравнений:

$$\begin{cases} -F_{\tau 2} + N_1 \cos \alpha - F_{\tau 1} \sin \alpha - F_r^u \sin \alpha = 0; \\ F_{en}^u + F_k^u + G \sin \psi = 0; \\ F_{er}^u + N_2 + N_1 \sin \alpha - G \cos \psi + F_{\tau 1} \cos \alpha + F_r^u \cos \alpha = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Подставим значения всех известных усилий, указанные нами ранее. Тогда система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} -f_2 N_2 + N_1 \cos \alpha - f_1 N_1 \sin \alpha - m \frac{dv_r}{dt} \sin \alpha = 0; \\ m \omega_e^2 r + 2 m \omega_e v_r \cos \alpha + mg \sin \psi = 0; \\ m r \frac{d^2 \psi}{dt^2} + N_2 + N_1 \sin \alpha - mg \cos \psi + f_1 N_1 \cos \alpha + m \frac{dv_r}{dt} \cos \alpha = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Из первого уравнения системы (2) выразим нормальную реакцию поверхности кожуха N_2 :

$$N_2 = \frac{1}{f_2} \left(N_1 \cos \alpha - f_1 N_1 \sin \alpha - m \frac{dv_r}{dt} \sin \alpha \right). \quad (3)$$

Из второго уравнения системы (2) выразим относительную скорость v_r :

$$v_r = -\frac{\omega_e r}{2 \cos \alpha} - \frac{g \sin \psi}{2 \omega_e \cos \alpha}. \quad (4)$$

Продифференцируем по времени обе части выражения (4):

$$\frac{dv_r}{dt} = -\frac{1}{2 \cos \alpha} \left[\varepsilon_e r + g \left(\cos \psi - \sin \psi \frac{\varepsilon_e}{\omega_e} \right) \right], \quad (5)$$

где $\varepsilon_e = \frac{d\omega_e}{dt}$ – угловое ускорение переносного вращения, c^{-2} .

Подставим полученные выражения (3) и (5) в третье уравнение системы (2) и выразим нормальную реакцию наклонной поверхности шнека N_1 . После упрощений и преобразований получим:

$$N_1 = m \frac{\varepsilon_e r + g \cos \psi + \left(\frac{tg \alpha}{f_2} - \frac{1}{2} \right) \left[\varepsilon_e r + g \left(\cos \psi - \sin \psi \frac{\varepsilon_e}{\omega_e} \right) \right]}{\sin \alpha \left(\frac{f_1}{f_2} - 1 \right) - \cos \alpha \left(\frac{1}{f_2} + f_1 \right)}. \quad (6)$$

Крутящий момент, необходимый для вращения вала шнека при перемещении частицы материала M без учета трения в подшипниках, может быть найден следующим образом [16]:

$$M_{кр} = N_1 r. \quad (7)$$

Мощность, необходимая на привод вала шнека или с учетом формул (6) и (7) [17]:

$$P_{шн} = m \omega_e r \frac{\varepsilon_e r + g \cos \psi + \left(\frac{tg \alpha}{f_2} - \frac{1}{2} \right) \left[\varepsilon_e r + g \left(\cos \psi - \sin \psi \frac{\varepsilon_e}{\omega_e} \right) \right]}{\sin \alpha \left(\frac{f_1}{f_2} - 1 \right) - \cos \alpha \left(\frac{1}{f_2} + f_1 \right)}. \quad (8)$$

Таким образом, мощность, необходимая на привод вала шнека, будет зависеть от состояния поверхностей винта шнека и кожуха (коэффициенты трения f_1 и f_2), массы частицы m , геометрических параметров шнека (угол подъема винтовой линии α), полярных координат, характеризующих расположение частицы M в шнеке (радиус r и угол ψ), а также кинематических параметров переносного вращения шнека (угловая скорость ω_e и угловое ускорение ε_e).

Выводы. Для производства кормовых ферментативных гидролизатов из соевых семян предлагается использовать принцип горизонтального смешивания. Экструдированная полножирная соя шнеком передвигается по зоне охлаждения, обеспечивающей дополнительное плющение и гомогенизацию, и далее в зону формирования гидро модуля.

Современная методика расчета горизонтальных смесителей шнекового типа основана на расчетной схеме движения материальной точки, которая лежит на поверхности шнековой лопасти и прижата к внутренней поверхности корпуса конвейера. Однако игнорирование реальных законов движения потока материала в горизонтальном смесителе может привести к неправильному выбору конструктивных и режимных параметров при проектировании и созданию неэффективных транспортирующих машин.

Разработанное математическое описание процесса движения, которое учитывает физико-механические свойства и геометрию потока материала, позволит выбрать оптимальные конструктивные и режимные параметры устройства для эффективно-го перемешивания экструдированного соевого шрота в процессе гидролиза с параллельным вмешива-

нием водного раствора ферментов при дальнейшем продвижении сформированного гидро модуля посредством вращения шнека к выгрузному отсеку.

Полученный гидролизат в дальнейшем может использоваться в зависимости от качественных показателей для различных целей в комбикормовой промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Милушев Р.К., Епифанов В.Г. Использование белковых концентратов из растительного сырья для замещения в комбикормах кормов животного происхождения // *Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство*. 2019. N5. С. 48-68. EDN: STLKGL.
2. Булатов С.Ю., Симачкова М.С., Сергеев А.Г. и др. Особенности производства комбикормов в условиях сельскохозяйственных организаций в современных реалиях // *Вестник НГИЭИ*. 2022. N10(137). С. 59-67. DOI: 10.24412/2227-9407-2022-10-59-67.
3. Dorokhov A.S., Zagoruiko M.G., Maradudin A.M., Bashmakov I.A. Material movement within a single-screw extruder. *Inmateh – Agricultural Engineering*. 2021. N3(65). 421-429. DOI: 10.35633/INMATEH-65-44.
4. Савиных П.А., Алешкин А.В., Турубанов Н.В., Зырянов Д.А. Определение рациональных параметров смесителя теоретическими исследованиями взаимодействия винтовой поверхности шнека с материалом // *Техника и технологии в животноводстве*. 2021. N1(41). С. 76-84. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-76.
5. Шагарова А.А., Шапошников А.П., Тарасенко Л.Е. Реометрические исследования характеристик течения высоковязких сред в шнековых машинах при наличии тонкого пристенного слоя // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2014. N1(128). С.87-90. EDN: RVFVUZ.
6. Петренко С.С., Черненко Г.В., Адигамов К. Применение шнекового конвейера с оребренным кожухом в качестве рабочего органа смесителя сыпучих материалов // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. N4. С. 77-82. EDN: ROFSQJ.
7. Зубкова Т.М., Мустюков Н.А., Токарева М.А. Построение архитектуры САПР одношнековых экструдеров с применением элементов искусственного интеллекта // *Программные продукты и системы*. 2016. Т. 29. N4. С. 176-182. DOI: 10.15827/0236-235x.116.176-182.
8. Брагинцев С.В., Хлыстунов В.Ф., Бахчевников О.Н. и др. Исследование процесса смешивания компонентов кормов в горизонтальном смесителе // *Проблемы развития АПК региона*. 2016. N3(27). С. 110-114. DOI: 10.15217/issn2079-0996.2016.3.
9. Евстарова А.В. Закономерности движения потока буровой мелочи по винтовой поверхности шнека при бурении вертикальных скважин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. N3. С. 306-312. EDN: RGRBLH.
10. Загоруйко М.Г., Васильчиков В.В., Мамахай А.К. Имитационное моделирование параметров шнека экструдера // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. N4(14). С. 71-77. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-71-77.
11. Протасов А.А., Макаров С.А., Данилин А.В., Левченко Г.В. Теоретические исследования кинематических параметров движения материала в пресс-экструдере // *Аграрный научный журнал*. 2019. N12. С. 105-109. DOI: 10.28983/asj.y2019i12pp105-109.
12. Брусенков А.В., Коновалов Д.Н. Разработка, проектирование и методика расчета конструктивно-технологических характеристик шнекового измельчителя корнеплодов // *Вестник машиностроения*. 2022. N10. С. 24-31. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-10-24-31.
13. Загоруйко М.Г., Дорохов А.С., Марадудин А.М. Обоснование основных параметров шнекового экспандера для переработки высокопротеиновых культур // *Нива Поволжья*. 2020. N2(55). С. 124-131. DOI: 10.36461/NP.2020.2.55.019.
14. Зубелевич О.Э. Принцип Даламбера - Лагранжа: геометрический аспект // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2020. N3(83). С. 31-39. DOI: 10.33048/SIBJIM.2020.23.303.
15. Богданова С.Б., Гладков С.О. О траекториях тел в неинерциальных системах отсчета // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2023. N84. С. 68-80. DOI: 10.17223/19988621/84/6.
16. Marczuk A., Misztal W., Savinykh P. et al. Improving efficiency of horizontal ribbon mixer by optimizing its constructional and operational parameters. *Eksplotacja i niezawodnosc*. 2019. N2(21). 220-225. DOI: 10.17531/ein.2019.2.5.
17. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Пронин А.Н., Сергеев А.Г. Результаты исследований рабочего процесса шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов с шаговым электродвигателем // *Техника и оборудование для села*. 2024. N1(319). С. 33-36. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-1-33-36.

REFERENCES

1. Milushev R.K., Epifanov V.G. The use of protein concentrates from vegetable raw materials for replacement in compound feed of feed of animal origin. *Feeding of Agricultural Animals and Feed Production*. 2019. N5. 48-68 (In Russian). EDN: STLKGL.
2. Bulatov S.Yu., Simachkova M.S., Sergeev A.G. et al. Features of the production of compound feeds in the conditions of agricultural organizations in modern realities.

- Bulletin NGIEI*. 2022. N10(137). 59-67 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2022-10-59-67.
3. Dorokhov A.S., Zagoruiko M.G., Maradudin A.M., Bashmakov I.A. Material movement within a single-screw extruder. *Inmateh – Agricultural Engineering*. 2021. N3(65). 421-429 (In English). DOI: 10.35633/INMATEH-65-44.
 4. Savinykh P.A., Aleshkin A.V., Turubanov N.V., Zyryanov D.A. Determination of mixer tap's rational parameters by theoretical studies of the interaction of the screw's helix surface with the material. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2021. N1(41). 76-84 (In Russian). DOI: 10.51794/27132064-2021-1-76.
 5. Shagarova A.A., Shaposhnikov A.P., Tarasenko L.E. Rheometric studies of high-viscosity fluid flow characteristics in the schneck machines with a thin wall layer. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2014. N1(128). 87-90 (In Russian). EDN: RVFVUZ.
 6. Petrenko S.S., Chernenko G.V., Adigamov K. The use of a screw conveyor with a finned cover as a working body of the mixer bulk materials. *Modern Problems of Science and Education*. 2013. N4. 77-82 (In Russian). EDN: ROFSQJ.
 7. Zubkova T.M., Mustyukov N.A., Tokareva M.A. Single screw extruder engineering with artificial intelligence elements. *Software & Systems*. 2016. Vol. 29. N4. 176-182 (In Russian). DOI: 10.15827/0236-235X.116.176-182.
 8. Braginets S.V., Khlystunov V.F., Bakhchevnikov O.N. et al. Study of the process of mixing fodder components in a horizontal mixer. *AIC development problems of the region*. 2016. N3(27). 110-114 (In Russian). DOI: 10.15217/issn2079-0996.2016.3.
 9. Evstarova A.V. Regularities of the drilling fines flow on the screw surface of the auger at drilling of vertical boreholes. *Mining Information-Analytical Bulletin*. 2007. N3. 306-312 (In Russian). EDN: RGRBLH.
 10. Zagoruiko M.G., Vasilchikov V.V., Mamakhai A.K. Simulation of the extruder screw parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. N4(14). 71-77 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-71-77.
 11. Protasov A.A., Makarov S.A., Danilin A.V., Levchenko G.V. Theoretical studies of kinematic parameters of material motion in a press-extruder. *Agrarian Scientific Journal*. 2019. N12. 105-109 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2019i12pp105-109.
 12. Brusenkov A.V., Konovalov D.N. Development, design and methodology for calculating the structural and technological characteristics of a screw grinder of root crops. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2022. N10. 24-31 (In Russian). DOI: 10.36652/0042-4633-2022-10-24-31.
 13. Zagoruiko M.G., Dorokhov A.S., Maradudin A.M. Substantiation of the basic parameters of the screw expander for processing high protein crops. *Niva Povolzhya*. 2020. N2(55). 124-131 (In Russian). DOI: 10.36461/NP.2020.2.55.019.
 14. Zubelevich O.E. The D'Alembert - Lagrange principle: a geometrical aspect. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 2020. N3(83). 31-39 (In Russian). DOI: 10.33048/SIBJIM.2020.23.303.
 15. Bogdanova S.B., Gladkov S.O. On the trajectories of bodies in non-inertial reference frames. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2023. N84. 68-80 (In Russian). DOI: 10.17223/19988621/84/6.
 16. Marczuk A., Misztal W., Savinykh P. et al. Improving efficiency of horizontal ribbon mixer by optimizing its constructional and operational parameters. *Eksplotacja i niezawodnosc*. 2019. N2(21). 220-225 (In English). DOI: 10.17531/ein.2019.2.5.
 17. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Pronin A.N., Sergeev A.G. Results of studies of the working process of a screw feeder for dry bulk components with a stepper motor. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024. N1(319). 33-36 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2024-1-33-36.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Загоруйко М.Г. – научное руководство, формулирование основных целей и задач исследования, создание окончательной версии рукописи;
Белышкина М.Е. – обсуждение материалов статьи, формирование общих выводов;
Башмаков И.А. – литературный анализ, визуализация, редактирование текста и оформление материалов.
Марадудин А.М. – разработка теоретических предположений, проведение расчетов.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Zagoryiko M.G. – scientific supervision, formulation of the main research goals and objectives of the research, refinement of the draft manuscript version;
Belyshkina M.E. – discussion of the article's materials, formulation of general conclusions;
Bashmakov I.A. – literature review, visualisation, text editing and material design;
Maradudin A.M. – development of theoretical assumptions, and execution of calculations.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

03.12.2024
25.02.2025