

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ ДЛЯ СУСПЕНЗИИ СОЕВОВОГО ШРОТА

MODELING A VIBRATORY MIXER FOR SOYBEAN MEAL SUSPENSION

Ключевые слова: виброперемешиватель, соевый шрот, суспензия, псевдопластичная жидкость, модель Оствальда-де Ваале, скорость сдвига, напряжение сдвига, разрушение агломератов, зона эффективного воздействия, кинематика рабочего органа, мощность привода, тепловыделение.

Традиционные лопастные и пропеллерные мешалки не обеспечивают достаточного сдвигового воздействия для разрушения агломератов при высокой концентрации твёрдой фазы, что делает виброперемешиватели перспективным решением. Реологические свойства суспензии описываются моделью Оствальда-де Ваале, что характеризует суспензию как псевдопластичную жидкость: с ростом скорости сдвига её эффективная вязкость снижается. Разработанная модель охватывает кинематику рабочего органа, поля скоростей сдвига и напряжений, динамику привода, тепловыделение и кинетику разрушения агломератов. Рабочий орган — шток с перфорированными дисками — совершает гармонические колебания с амплитудой $A = 0,009$ м при различных частотах. Критический радиус зоны эффективного воздействия, при котором напряжение сдвига τ превышает пороговое значение, необходимое для разрушения агломератов, возрастает с ростом частоты; площадь зоны увеличивается с 21 до 264% от площади поперечного сечения рабочего органа. Средняя мощность вязкостных потерь для суспензии шрота превышает аналогичный показатель для воды в 142–191 раз; при каждой смене направления вибрации эффективная вязкость резко возрастает, создавая пиковые нагрузки на привод. Применение ньютоновской модели систематически занижает потребляемую мощность и не позволяет правильно определить зону эффективного воздействия. При кратковременной работе тепловой нагрев незначителен, однако при длительных режимах необходимо предусматривать охлаждение рабочей камеры. Электродвигатель следует выбирать на основе модели Оствальда с коэффициентом запаса по моменту не менее 1,25–1,35 от максимального расчётного

значения. Результаты применимы при проектировании виброперемешивателей для кормопроизводства и перерабатывающей промышленности.

Keywords: vibratory mixer, soybean meal, suspension, pseudoplastic liquid, Ostwald-de Waele model, shear rate, shear stress, agglomerate breakup, effective action zone, working element kinematics, drive power, heat generation.

Traditional paddle and propeller mixers do not provide sufficient shear action to break up agglomerates at high solids concentrations making vibratory mixers a promising solution. The rheological properties of the suspension are described by the Ostwald-de Waele model which characterizes the suspension as a pseudoplastic fluid: with an increase in shear rate, its effective viscosity decreases. The developed model involves the kinematics of the working element, the shear and stress fields, the drive dynamics, heat generation, and the kinetics of agglomerate breakdown. The working element, a rod with perforated disks, performs harmonic oscillations with an amplitude of $A = 0.009$ m at various frequencies. The critical radius of the effective impact zone when the shear stress exceeds the threshold value required to break up agglomerates increases with increasing frequency; the zone area increases from 21 to 264% of the working element cross-sectional area. The average viscous power loss for meal suspension exceeds that for water 142–191 times; with each change in vibration direction, the effective viscosity increases sharply creating peak loads on the drive. Using the Newtonian model systematically underestimates power consumption and does not allow for accurate determination of the effective zone of action. During short-term operation, thermal heating is insignificant; however, for long-term operation, cooling of the working chamber is necessary. The electric motor should be selected based on the Ostwald model with a torque safety factor of at least 1.25–1.35 times the maximum design value. The results are applicable to the design of vibratory mixers for feed production and processing industries.

Комоликов Алексей Сергеевич, ассистент, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: komolikovaleksey1994@mail.ru.

Komolikov Aleksey Sergeevich, Asst., Orel State Agricultural University named after N.V. Parakhin, Orel, Russian Federation, e-mail: komolikovaleksey1994@mail.ru.

Березина Наталья Александровна, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: jrdan@yandex.ru.

Мищенко Елена Владимировна, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: art_lena@inbox.ru.

Севостьянов Александр Леонидович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка и тракторы, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: sewostya@list.ru.

Berezina Natalya Aleksandrovna, Dr. Tech. Sci., Prof., Orel State Agricultural University named after N.V. Parakhin, Orel, Russian Federation, e-mail: jrdan@yandex.ru.

Mishchenko Elena Vladimirovna, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Orel State Agricultural University named after N.V. Parakhin, Orel, Russian Federation, e-mail: art_lena@inbox.ru.

Sevostyanov Aleksandr Leonidovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Head, Dept. of Machinery and Tractor Fleet Operation and Tractors, Orel State Agricultural University named after N.V. Parakhin, Orel, Russian Federation, e-mail: sewostya@list.ru.

Введение

Производство комбикормов и кормовых смесей на основе соевого шрота предполагает его равномерное диспергирование в жидкой фазе. Традиционные лопастные и пропеллерные мешалки не всегда обеспечивают достаточно высокое сдвиговое воздействие для разрушения агломератов, особенно при высокой концентрации твёрдой фазы [1]. Виброперемешиватели создают интенсивное сдвиговое поле непосредственно у поверхности рабочего органа без применения вращательных механизмов [2], что делает их перспективными для обработки суспензий с неньютоновскими реологическими свойствами.

Суспензия соевого шрота является псевдопластичной жидкостью: при увеличении скорости сдвига её эффективная вязкость снижается. Игнорирование этого факта при проектировании оборудования ведёт к систематическому занижению мощности привода и некорректной оценке зоны механического воздействия. В связи с этим разработка адекватной математической модели, учитывающей псевдопластичность суспензии, является актуальной задачей инженерного расчёта вибрационных перемешивателей [3].

Цель – разработка математической модели виброперемешивателя возвратно-поступательного действия, описывающей механику рабочего органа и реологическое воздействие на суспензию соевого шрота, а также сравнительный анализ псевдопластичной модели Оствальда-де Ваала и ньютоновской модели жидкости применительно к данному процессу.

Для этого решались следующие **задачи**:

1) разработка модели движения рабочего органа;

2) получение аналитического выражения для полей скоростей сдвига и напряжений;

3) определение границ зоны эффективного воздействия при различных рабочих частотах;

4) анализ динамики привода и средней мощности вязкостных потерь;

5) анализ кинетики разрушения агломератов.

Объекты и методы

Объектом исследования является виброперемешиватель – устройство, рабочий орган которого совершает возвратно-поступательное движение в суспензии соевого шрота. Математическая модель описывает две взаимосвязанные группы явлений: механику рабочего органа (силы, мощность, нагрузки на привод) и реологическое воздействие на продукт (поле напряжений сдвига, зону эффективной обработки, тепловыделение и условия разрушения агломератов) [4].

Рабочий орган – шток с перфорированными дисками – совершает возвратно-поступательное движение с амплитудой $A = 0,009$ м при частотах $f = 16,55; 33,31; 49,97$ Гц. Диапазон частот выбран в соответствии с технически реализуемыми режимами работы вибрационных приводов для пищевой промышленности.

Реологическое поведение суспензии соевого шрота описывается моделью Оствальда-де Ваала (степенной закон) [1]:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n; \quad \eta_{\text{eff}}(\dot{\gamma}) = K \cdot |\dot{\gamma}^{n-1}|, \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига, Па;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ;

$K = 0,18$ Па·с – коэффициент консистенции [2];

$n = 0,72$ – индекс течения [3];

η_{eff} – эффективная динамическая вязкость, Па·с.

При $n < 1$ вязкость убывает с ростом скорости сдвига (псевдопластичность), что физически соответствует разориентации и разрушению агломератов соевого шрота в потоке. Модель обеспечивает аналитически замкнутые выражения для всех расчётных величин, что делает её наиболее удобной для инженерного расчёта на стадии проектирования.

При анализе поля скоростей сдвига используется приближение потенциального обтекания с профилем $(R/r)^2$. При рассматриваемых рабочих частотах числа Уомерсли составляют $Wo \approx 39-68$, что соответствует режиму развитого пограничного слоя. Профиль $(R/r)^2$ применяется как интегральное приближение для оценки зоны воздействия [5].

Экспериментальная часть

Кинематика рабочего органа. Рабочий орган совершает гармонические колебания:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega t); \quad (2)$$

скорость и ускорение:

$$\dot{y}(t) = A\omega \cdot \cos(\omega t); \quad (3)$$

$$\ddot{y}(t) = -A\omega^2 \cdot \sin(\omega t), \quad (4)$$

где $A = 0,009$ м – амплитуда колебаний;

$\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, рад/с.

Скорость максимальна в центральном положении и равна нулю в крайних точках. Ускорение максимально при смене направления – именно в эти моменты скорость сдвига $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, и псевдо-

пластичная жидкость резко увеличивает эффективную вязкость. Это ключевой нелинейный эффект, принципиально отличающий суспензию шрота от воды.

Поля скоростей сдвига, напряжений и зона эффективного воздействия. Вокруг рабочего органа радиуса R поле скоростей сдвига убывает с расстоянием r по закону [5, 6]:

$$\dot{\gamma}(r,t) = \frac{R^2}{r} \cdot A\omega \cdot \cos(\omega t), \quad (5)$$

где $\dot{\gamma}(r,t)$ – скорость сдвига в точке r в момент t , c^{-1} ;

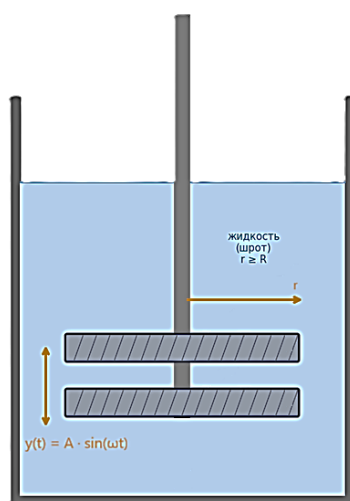
R – радиус рабочего органа, м;

r – расстояние от оси рабочего органа, м ($r \geq R$).

Напряжение сдвига в псевдопластичной среде описывается выражением:

$$\tau(r,t) = K \cdot |\dot{\gamma}(r,t)|^n = K \cdot \left| \frac{R^2}{r} \cdot A\omega \cdot \cos(\omega t) \right|^n. \quad (6)$$

Для воды (ньютоновская жидкость) $\tau(r,t) = \eta \cdot \dot{\gamma}(r,t)$, где $\eta = 0,001$ Па·с, зависимость линейная. Для суспензии шрота зависимость нелинейная: при малых $\dot{\gamma}$ в дальней зоне эффективная вязкость $\eta_{\text{eff}} \rightarrow \infty$, поэтому напряжение убывает медленнее. Зона механического воздействия на шрот, следовательно, больше, чем у воды. На рисунке 1 представлена схема полей скоростей сдвига и напряжений вокруг рабочего органа.



Профиль $\dot{\gamma}$ и τ по радиусу r

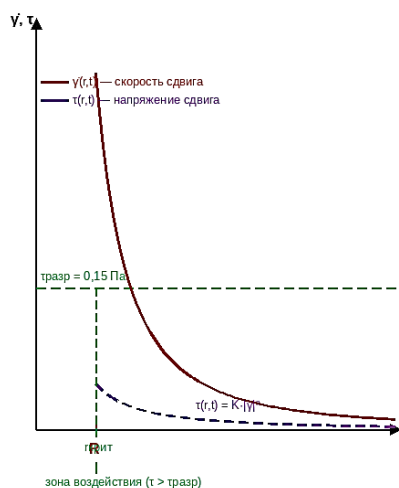


Рис. 1. Схема полей скоростей сдвига и напряжений вокруг рабочего органа

В таблице 1 приведены расчётные значения максимального напряжения сдвига $\tau_{\text{max}}(r)$ при различных расстояниях от оси рабочего органа для различных рабочих частот.

Зона эффективного воздействия – область, в которой τ превышает критическое значение $\tau_{\text{разр}} = 0,15$ Па, при котором происходит разру-

шение агломератов шрота. Граница зоны $r_{\text{крит}}$ определяется аналитически:

$$r_{\text{крит}} = R \cdot \frac{K \cdot (A\omega)^n}{\tau_{\text{разр}}^{\frac{1}{2n}}} \quad (7)$$

Из рисунка 2 видно, что напряжение резко убывает с расстоянием. Пунктирная линия соответствует $\tau_{\text{разр}} = 0,15$ Па. Точки пересечения кривых с ней определяют $r_{\text{крит}}$. Расчётные зна-

чения для различных частот приведены в таблице 2.

Повышение частоты с 16,55 до 49,97 Гц расширяет зону эффективного воздействия в 1,74 раза, а площадь зоны увеличивается с 21 до 264% от площади поперечного сечения рабочего органа. Это свидетельствует о целесообразности работы на повышенных частотах.

Таблица 1

Максимальное напряжение сдвига $\tau_{\text{max}}(r)$ при $A = 9$ мм

r , м	τ_{max} (16,55 Гц), Па	τ_{max} (33,31 Гц), Па	τ_{max} (49,97 Гц), Па	Интерпретация
0,05	0,1716	0,2840	0,3803	Разрушение агломератов
0,08	0,0872	0,1443	0,1933	Интенсивный сдвиг
0,10	0,0633	0,1047	0,1402	Интенсивный сдвиг
0,15	0,0353	0,0584	0,0782	Слабый сдвиг
0,20	0,0130	0,0215	0,0288	Слабый сдвиг

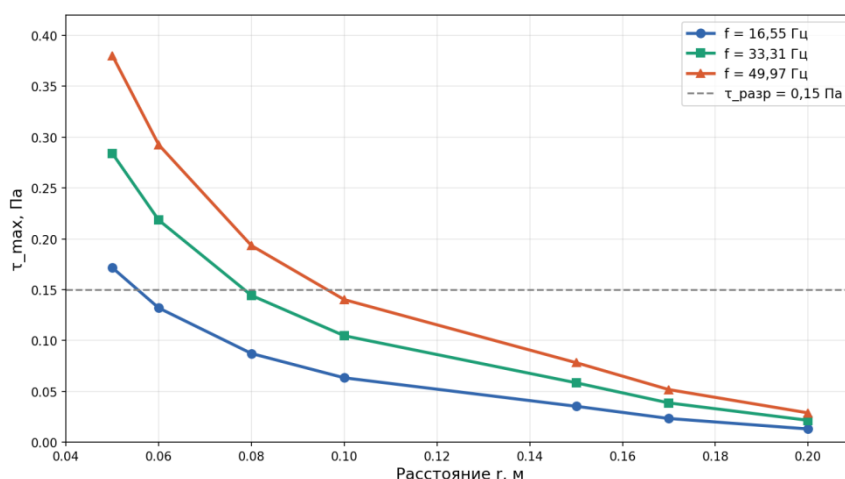


Рис. 2. Зависимость максимального напряжения сдвига τ_{max} от расстояния до оси рабочего органа при $A = 9$ мм для различных рабочих частот

Таблица 2

Зона эффективного воздействия (разрушение агломератов шрота)

Параметр	$f = 16,55$ Гц	$f = 33,31$ Гц	$f = 49,97$ Гц
$r_{\text{крит}}$ (шрот), м	0,0549	0,0779	0,0954
$r_{\text{крит}} / R$ (кратность)	В 1,10 раза	В 1,56 раза	В 1,91 раза
Площадь зоны (% от $R = 50$ мм)	21%	143%	264%

Динамика привода и мощность. Суммарная сила на рабочем органе складывается из трёх составляющих: силы Архимеда, инерционной и вязкостной. Для псевдопластичной жидкости:

$$F_{\text{вязк}}(t) = 4\pi \cdot K \cdot |A\omega \cdot \cos(\omega t)|^{n-1} \cdot R \cdot L \cdot A\omega \cdot \cos(\omega t). \quad (8)$$

Средняя мощность за цикл:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T F_{\text{вязк}}(t) dt, \quad (9)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность, расходуемая на преодоление вязкостного сопротивления за период, Вт;

$T = 1/f$ – период колебаний, с.

Расчётные значения средней мощности для различных частот приведены в таблице 3. При каждой смене направления вибрации $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, эффективная вязкость шрота резко возрастает, создавая пиковые нагрузки на привод.

Таблица 3

Средняя мощность на преодоление вязкостного сопротивления

Параметр	f = 16,55 Гц	f = 33,31 Гц	f = 49,97 Гц
P _{ср} (шрот), Вт	0,00534	0,01780	0,03575
P _{ср} (вода), Вт	0,000028	0,000111	0,000251
Отношение P _{шрот} / P _{вода}	190,7	160,4	142,4

Тепловыделение. Объёмная мощность тепловыделения в вязкой среде:

$$q(r,t) = \eta_{\text{eff}}(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}^2(r,t), \quad (10)$$

где $q(r,t)$ – объёмная мощность тепловыделения, Вт/м³;

$\eta_{\text{eff}}(\dot{\gamma}) = K \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1}$ – эффективная динамическая вязкость, Па·с;

$\dot{\gamma}(r,t)$ – скорость сдвига, с⁻¹.

$$\Delta T = \frac{Q \cdot t_{\text{обр}}}{\rho \cdot c_p \cdot V}, \quad (11)$$

где ΔT – увеличение температуры суспензии, °С;

$t_{\text{обр}}$ – время обработки, с;

ρ – плотность суспензии, кг/м³ (для суспензии соевого шрота $\rho = 1020\text{--}1050$ кг/м³) [6];

c_p – удельная теплоёмкость суспензии, Дж/(кг·°С);

V – объём суспензии, м³ [8].

Тепловыделение в суспензии шрота значительно превышает аналогичный показатель для воды. За 60 с обработки прирост температуры составляет от $2 \cdot 10^{-6}$ до $1,2 \cdot 10^{-5}$ °С – практически нулевой нагрев. Однако при длительных режимах работы накопленный нагрев может стать

значимым для термолабильных компонентов шрота, что необходимо учитывать при проектировании.

Кинетика разрушения агломератов. Агломераты частиц шрота разрушаются при условии $t > t_{\text{разр}} = 0,15$ Па. Кинетика разрушения описывается упрощённой моделью первого порядка и представлена на рисунке 3 [7]:

$$\frac{dN}{dt} = -k_{\text{разр}} \cdot N, \quad k_{\text{разр}} = C \cdot \left(\frac{\tau_{\text{max}}}{\tau_{\text{разр}}} - 1 \right)^m, \quad (12)$$

где N – относительная доля неразрушенных агломератов;

$C = 1,0 \text{ с}^{-1}$ – эмпирическая константа;

$m \approx 0,5\text{--}1,0$ – эмпирический показатель степени.

Модель содержит лишь 2 параметра ($\tau_{\text{разр}}$ и m) и верно воспроизводит зависимость скорости диспергирования от превышения порога τ_{max} над $\tau_{\text{разр}}$. Переход к расширенной модели (учёт пространственной неоднородности поля, вторичной агрегации, экранирования частиц) целесообразен при наличии детальных реологических данных для конкретного сырья [8, 9].

Таблица 4

Тепловыделение от сил вязкого сопротивления

Частота, Гц	Q _{шрот} , Вт	Q _{вода} , Вт	Q _{шрот} / Q _{вода}	ΔT _{шрот} за 60 с, °С
16,55	0,0003	0,000001	300,0	$2 \cdot 10^{-6}$
33,31	0,0009	0,000004	225,0	$6 \cdot 10^{-6}$
49,97	0,0019	0,000009	211,1	$1,2 \cdot 10^{-6}$

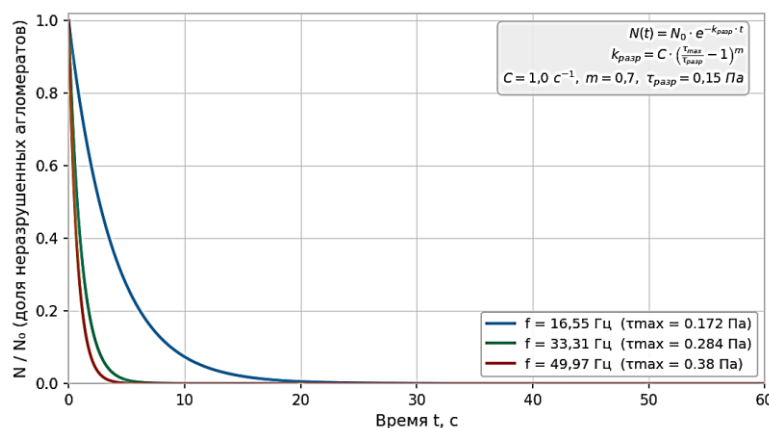


Рис. 3. Кинетика разрушения агломератов для различных рабочих частот
($C = 1,0 \text{ с}^{-1}$, $m = 0,7$, $\tau_{\text{разр}} = 0,15 \text{ Па}$)

Результаты исследования и их обсуждение

Принципиальные отличия псевдопластичной суспензии шрота от воды при вибрационной обработке проявляются по четырём ключевым аспектам.

Во-первых, эффективная вязкость шрота не постоянна: при каждой смене направления вибрации $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, и вязкость резко возрастает. Это требует закладывать запас по пиковому крутящему моменту привода не менее 25-30% от среднего расчётного значения.

Во-вторых, зона эффективного воздействия у шрота значительно превышает аналогичную зону для воды. Критический радиус воздействия при $f = 49,97$ Гц достигает $r_{\text{крит}} = 0,0954$ м против практически нулевой зоны для воды. Это позволяет проектировать рабочую камеру с увеличенным расстоянием между рабочими органами в многовалковых установках без потери производительности.

В-третьих, мощность привода по расчёту для шрота в 142-191 раз выше, чем для воды. Применение ньютоновской модели при проектировании систематически занижает потребляемую мощность, что недопустимо. Электродвигатель необходимо выбирать по расчёту на основе модели Оствальда с коэффициентом запаса по моменту не менее 1,25-1,35.

В-четвёртых, тепловыделение в суспензии шрота в 211-300 раз выше, чем в воде. При кратковременной работе нагрев незначителен, однако при длительных режимах необходимо предусматривать охлаждение рабочей камеры – водяную рубашку или принудительную циркуляцию теплоносителя.

Разрушение агломератов происходит только при $\tau > \tau_{\text{разр}} = 0,15$ Па, что позволяет целенаправленно подбирать частоту и амплитуду вибрации. Оптимальная частота выбирается из условия $\tau_{\text{max}} \geq \tau_{\text{разр}}$ при минимально необходимой мощности, обеспечивая эффективное диспергирование без избыточного энергопотребления.

Заключение

Разработанная математическая модель виброперемешивателя для суспензии соевого шрота охватывает кинематику рабочего органа, реологическое воздействие на продукт, динамику привода, тепловыделение и кинетику разрушения агломератов. Использование модели Оствальда-Ваале позволяет получить аналитически замкнутые выражения для всех расчётных величин,

что делает её наиболее удобной для инженерного расчёта на стадии проектирования.

Установлено, что повышение рабочей частоты с 16,55 до 49,97 Гц расширяет зону эффективного воздействия в 1,74 раза ($r_{\text{крит}}$ возрастает с 0,0549 до 0,0954 м), обеспечивая обработку большего объёма продукта. Средняя мощность вязкостных потерь для шрота превышает аналогичный показатель для воды в 142-191 раз. Тепловой нагрев незначителен при кратковременной работе, однако при длительных режимах необходимо предусматривать охлаждение рабочей камеры.

Применение ньютоновской модели при проектировании виброперемешивателя для суспензии шрота систематически занижает потребляемую мощность привода и не позволяет правильно определить зону эффективного воздействия. Электродвигатель необходимо выбирать по расчёту на основе модели Оствальда с коэффициентом запаса по моменту не менее 1,25-1,35 от максимального расчётного значения.

Результаты работы могут применяться при проектировании виброперемешивателей для кормопроизводства и перерабатывающей промышленности. Переход к расширенным моделям кинетики диспергирования целесообразен при наличии детальных реологических данных для конкретного сырья.

Библиографический список

1. Pal R. (2024). Non-Newtonian behavior of suspensions and emulsions: Review of different mechanisms. *Advances in Colloid and Interface Science*. 333: 103299. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103299.
2. Denn, M. M., Morris, J. F. (2014). Rheology of non-Brownian suspensions. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 5, 203–228. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060713-040221>.
3. Bhargava N., et al. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70: 105293. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105293.
4. Матвеевко, В. Н. Реология структурированных дисперсных систем / В. Н. Матвеевко, Е. А. Кирсанов. – Москва: Техносфера, 2025. – 498 с. – Текст: непосредственный.
5. Мищенко, Е. В. Моделирование перемешивающего устройства в среде Matlab/Simulink/Simmechanics / Е. В. Мищенко, В. Я. Мищенко, А. С. Печурин. – Текст: непосредственный //

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 5 (337). – С. 30-36.

6. Вистовская, В. П. Оптимизация параметров ферментализации подсолнечной лузги с использованием методов математического моделирования / В. П. Вистовская, Д. С. Кожемякин, Е. П. Каменская. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.012. – Текст: непосредственный // Ползуновский вестник. – 2025. – № 1. – С. 103-109.

7. Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., Stroeve, P. (2009). Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729. <https://doi.org/10.1021/ie801542g>.

8. Сарафанова Л.А. Пищевые добавки: Энциклопедия. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2022. – 808 с. – Текст: непосредственный.

9. Mokhefi, A. (2024). Hydrodynamic and thermal performance analysis of an inclined anchor impeller designed for yield stress food mixing applications. *Food and Bioprocess Processing*. 143: 255-270. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.12.006>.

References

1. Pal R. (2024). Non-Newtonian behavior of suspensions and emulsions: Review of different mechanisms. *Advances in Colloid and Interface Science*. 333: 103299. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103299.

2. Denn, M. M., Morris, J. F. (2014). Rheology of non-Brownian suspensions. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 5,

203–228. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060713-040221>.

3. Bhargava N., et al. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70: 105293. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105293.

4. Matveenko V.N., Kirsanov E.A. Reologiya strukturirovannykh dispersnykh sistem. – Moskva: Tekhnosfera, 2025. – 498 s.

5. Mishchenko E.V., Mishchenko V.Ya., Pechurin A.S. Modelirovanie peremeshivayushchego ustroystva v srede Matlab/Simulink/Simmechanics // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2019. – No. 5 (337). – S. 30-36.

6. Vistovskaya V.P., Kozhemyakin D.S., Kamenskaya E.P. Optimizatsiya parametrov fermentoliza podsolnechnoy luzgi s ispolzovaniem metodov matematicheskogo modelirovaniya // Polzunovskiy vestnik. – 2025. – No. 1. – S. 103-109. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.012.

7. Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., Stroeve, P. (2009). Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729. <https://doi.org/10.1021/ie801542g>.

8. Sarafanova L.A. Pishchevye dobavki: Entsiklopediya. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2022. – 808 с.

9. Mokhefi, A. (2024). Hydrodynamic and thermal performance analysis of an inclined anchor impeller designed for yield stress food mixing applications. *Food and Bioprocess Processing*. 143: 255-270. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.12.006>.



УДК 621.9Т

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-261-7-83-89

Р.С. Чернусь, А.А. Багаев

R.S. Chernus, A.A. Bagaev

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ЦЕТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

EVALUATION OF ELECTROMECHANICAL TRANSIENT PROCESS PARAMETER INFLUENCE ON THE RESPONSE TIME OF A CENTRIFUGAL FLOW METER FOR LOOSE AGRICULTURAL MATERIALS

Ключевые слова: центробежный расходомер сыпучих материалов, переходный процесс, механическая характеристика, угловая скорость.

Keywords: centrifugal flow meter of loose materials, transient process, mechanical characteristic, angular velocity.