



Математическая модель процесса смешивания полужидких кормов в устройстве с пропеллером

© 2024. М. А. Лушнов✉

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы применения пропеллерного аппарата для смешивания полужидких кормовых смесей в смесителе с эксцентрично расположенным рабочим органом в виде пропеллера (винта). До сих пор при изучении процесса смешивания мало внимания уделяли транспортирующей способности рабочего органа в виде пропеллерной мешалки. При приготовлении влажных мешанок широко используют мешалки с вертикально расположенным валом, который находится в центре вертикального цилиндрического резервуара. При установке рабочего органа горизонтально пропеллер, обладая насосным эффектом (осевое движение), может быть использован не только для смешивания, но и для выгрузки готовой кормосмеси, а также перемещения её по трубам на небольшие расстояния. Существующие модели процесса смешивания не учитывают его стохастическую природу. Приемы математического описания процессов смешивания, учитывающих преобладающее осевое движение потока, разработаны недостаточно. Предлагаемые математические модели позволяют определить производительность смесителя и потребную мощность на смешивание. Исследования проводили с целью повышения эффективности приготовления кормосмеси в горизонтальном смесителе пропеллерного типа с эксцентрично расположенным рабочим органом (винтом) и снижению энергозатрат при увеличении производительности. Объектом исследования служила смесительная камера с эксцентрично расположенным рабочим органом различного диаметра (0,20, 0,25 и 0,35 м). При проведении экспериментов определяли производительность, необходимую на привод вала двигателя мощностью. Экспериментально установлено, что увеличение частоты вращения мешалки с 200 до 400 мин⁻¹ с диаметром пропеллера от 0,20 до 0,35 м и при влажности кормовой смеси 84 % приводит к росту потребляемой мощности до 3,5 кВт, производительности смесителя до 12 м³/ч и степени однородности кормосмесей до 98 %.

Ключевые слова: кормосмесь, смеситель, производительность, мощность, рабочий орган, винт

Благодарности: работа выполнена в рамках инициативной научно-исследовательской темы ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет».

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лушнов М. А. Математическая модель процессов смешивания и подачи полужидких кормов в устройстве с пропеллером. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(4):712-719.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.4.712-719>

Поступила: 12.03.2024

Принята к публикации: 05.07.2024

Опубликована онлайн: 28.08.2024

Mathematical model of the process of mixing semi-liquid feeds in a device with a propeller

© 2024. Maksim A. Lushnov✉

Kazan State Agrarian University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

The article considers the issues of using a propeller apparatus for mixing semi-liquid feed mixtures in a mixer with an eccentrically positioned working body in the form of a propeller (screw). Until now, when studying the mixing process, little attention has been paid to the transporting ability of the working body in the form of a propeller agitator. When preparing wet mixtures, agitators with a vertically positioned shaft, which is located in the center of a vertical cylindrical tank, are widely used. When installing the working body horizontally, the propeller having a pumping effect (axial movement), can be used not only for mixing, but also for unloading the finished feed mixture, as well as moving it through pipes over short distances. The existing models of the mixing process do not take into account its stochastic nature. Methods of mathematical description of mixing processes considering the prevailing axial movement of the flow are scarcely developed. The proposed mathematical models make it possible to determine the mixer's performance and the required mixing power. The research was aimed at increasing the effectiveness of preparing a feed mixture in a horizontal mixer of propeller type with an eccentrically positioned working body (screw) and saving energy costs along with raising the productivity. The object of the study was a mixing chamber with eccentrically located working bodies of various diameters (0.2, 0.25 and 0.35 m). During the experiments, the productivity required to drive the motor shaft was determined. It has been experimentally established that increasing the agitator rotation speed from 200 to 400 min⁻¹ with a propeller diameter from 0.2 to 0.35 m and a feed mixture humidity of 84 % leads to an increase in power consumption to 3.5 kW and mixer productivity to 12 m³/h, and the degree of uniformity of feed mixtures is up to 98 %.

Keywords: feed mixture, mixer, performance, power, working element, screw

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the initiative research topic of the Kazan State Agrarian University.

The author thanks the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

Conflict of interest: The author stated that there was no conflict of interest

For citations: Lushnov M. A. Mathematical model of the process of mixing semi-liquid feeds in a device with a propeller. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(4):712–719. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.4.712-719>

Received: 12.03.2024

Accepted for publication: 05.07.2024

Published online: 28.08.2024

На сегодняшний день выявлены эффективные методы смешивания кормов с целью получения влажных мешанок (полужидких смесей) и подачи их к месту раздачи. Число технических средств осуществления отмеченных процессов непрерывно растет, удовлетворяя потребности как крупных, так и мелких сельскохозяйственных производств [1, 2, 3].

Смешивание – один из наиболее важных технологических процессов, определяющих уровень качества готовой продукции. После смешивания, как правило, кормовая масса транспортируется к месту раздачи.

При формировании математических моделей важно принимать во внимание то, что транспортирование может быть продолжением смешивания. Математическая модель модуля – смеситель – трубопровод – транспортирующее техническое средство – должна учитывать режимные параметры и внешние характеристики последнего в том случае, когда оно предусмотрено. Такая модель представляет собой формализованное описание одно- или многоуровневых систем смешивания и транспортирования и может выглядеть как суммарная функция вида:

$$K = F(y \dots y_i), \quad (1)$$

где K – критерий оптимальности; y_i – математические модели, описывающие каждый агрегат или участок трубопровода с точки зрения его оптимальной работы.

При этом не следует проводить оценку работы агрегата только с точки зрения его наибольшей эффективности (максимальная производительность при минимальных энергозатратах, либо наиболее высокий КПД), так как основной критерий работы модуля – K , который не обязательно предполагает «наилучшую» работу отдельно взятого агрегата. Относительно модулей «у» можно сказать, что они сами служат функциями от переменного факторного пространства (реологические свойства смесей, геометрические размеры машин, трубопровода и др.).

Отсюда очевидно, что выходные факторы предшествующего агрегата служат входными для последующего. В связи с этим воз-

никает задача стыковки ступеней модуля с точки зрения математического моделирования. Быстродействие современных вычислительных машин позволяет рассчитывать параметры модуля или отдельного агрегата в реальном времени, даже итерационным методом.

Несмотря на достаточно хорошо изученную работу пропеллерной мешалки при смешивании материалов в химической промышленности и гидравлических насосов на воде, установленные при их работе закономерности и формулы расчетов невозможно перенести на сложные и кормовые смеси [4, 5]. Поэтому, используя для выбора факторов будущей модели параметры известных формул и зависимостей, необходимо добавлять дополнительные факторы, обусловленные исходными сырьевыми материалами и факторами конфигураций элементов мешалки и трубопровода [6, 7].

Процесс смешивания реализуется различными аппаратами, в том числе пропеллерными. С их использованием можно перемешивать не только вязкие, но и жидкие среды, к которым относят различного рода гомогенные (однородные) смеси, в том числе дезинфицирующие растворы [8, 9]. Пропеллерные аппараты дают возможность одновременно со смешиванием материальных потоков осуществлять тепло-массообменные процессы и транспортирование. Пропеллер, обладая насосным эффектом (осевое движение), может быть использован для выгрузки готовой кормосмеси, а также перемещения её по трубам на небольшие расстояния.

При анализе работ, связанных с пропеллерными устройствами, можно увидеть, что основной упор направлен на изучение процесса смешивания, транспортным способностям пропеллера уделяли значительно меньше внимания. При этом никакая из полученных моделей процесса смешивания не учитывает их стохастическую природу. В целом математические модели процесса смешивания разработаны недостаточно, а предложения по расчету пропеллерной мешалки имеют эмпирический характер [10, 11, 12].

В этой связи изучение и отработка конструкций пропеллерных устройств важны и актуальны. Успех в их разработке и внедрении возможен при наличии математического описания протекающих процессов.

Цель исследования – разработка математической модели определения параметров смесительной системы и повышение эффективности приготовления полужидких кормосмесей в смесителе путем увеличения его производительности и снижения энергозатрат.

Задача исследования – определение конструктивных и технологических показателей работы смесителя.

Научная новизна – разработаны математические модели определения потребной мощности и производительности при смешивании и лабораторная установка для смешивания полужидких кормосмесей.

Материал и методы. Известно, что смешиванию свойственны признаки марковских случайных процессов (процесс без последовательности). То есть состояние в будущем напрямую зависит от происходящего в настоящем и не зависит от того, каким оно было в прошлом для каждого момента времени [12]. Таким образом, с использованием математической модели марковских процессов можно описать процесс смешивания влажных мешанок.

Приемы математического описания процессов смешивания, учитывающих преобладающее осевое движение потока, разработаны недостаточно, а рекомендации по расчетам пропеллерной мешалки носят полуэмпирический характер.

Один из распространенных методов расчета перемещения среды является тот, в котором производительность остается постоянной в течение длительного промежутка времени при наличии соответствующих флуктуаций. Такой метод можно описать с помощью однородных пуассоновских марковских процессов [13].

Для этого допустим, что $x(t)$ – случайная величина, характеризующая число частиц материала, которое принимает участие в пуассоновском потоке, $x = 0, 1, 2, 3, \dots, x_k$ – целочисленные значения, которые может принимать эта случайная величина. В соответствии с постулатами однородного пуассоновского процесса запишем соотношение:

$$P_x(t + \Delta t) = (1 - \nu \cdot \Delta t) \cdot P_x + \nu \cdot P_{x-1}(t), \quad (2)$$

где P_x – давление частицы материала, которое принимает участие в пуассоновском потоке, Па;

t – время, с; Δt – изменение времени, с; ν – параметр процесса, характеризующий интенсивность перемещения потока; P_{x_i} – давление i -той частицы материала, которое принимает участие в пуассоновском потоке, Па. При $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциально-разностное уравнение:

$$\frac{\partial P_{x_i}(t)}{\partial t} = -\nu [P_{x_i}(t) - P_{x_{i-1}}(t)]. \quad (3)$$

Умножим и просуммируем по x уравнение (3):

$$\sum_{i=0}^{x_k} x_i \cdot \frac{\partial P_{x_i}(t)}{\partial t} = \nu \sum_{i=0}^{x_k} P_{x_i}(t), \quad (4)$$

где $\sum_{i=0}^{x_k} x_i \cdot \frac{\partial P_{x_i}(t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_R x \partial P_x(t) = \frac{\partial}{\partial t} m_x(t)$.

С учетом того, что $\int_R x \partial P_x(t)$ это математическое ожидание числа транспортируемых частиц, записанное для дискретного распределения случайной величины $x(t)$ в области значений R через интеграл Стилтгеса, уравнение (4) примет вид:

$$\frac{\partial m_x(t)}{\partial t} = \nu.$$

Решение этого уравнения с учетом начальных условий $t = 0$ имеет вид:

$$\partial m_x(t) = \nu.$$

Умножив это выражение на $\pi \cdot d^3 \cdot \gamma$, получим:

$$Q_T = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \gamma}{6} \cdot m_x(t) = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \gamma}{6} \cdot \nu \cdot t, \quad (5)$$

где Q – расход за время t , м³/ч; d – средний диаметр перемещаемых частиц, м; γ – средний удельный вес транспортируемого материала, Н/м³; $m_x(t)$ – математическое ожидание случайной величины $x(t)$.

Уравнение (5) содержит величину ν , которая влияет на следующие параметры: наличие смесительной трубы у пропеллера; размеры пропеллера; наличие транспортирующей трубы у пропеллера; размеры смесителя; расстояние пропеллера от стенок емкости и др. [13].

Эксперименты проводили на кафедре машин и оборудования в агробизнесе Казанского ГАУ.

Результаты и их обсуждение. Переходя от моделирования технологического процесса смешивания к определению конструктивных и режимных параметров смесительной установки, рассмотрим схему (рис. 1) для определения производительности смесителя с эксцентрично расположенным рабочим органом (винтом).

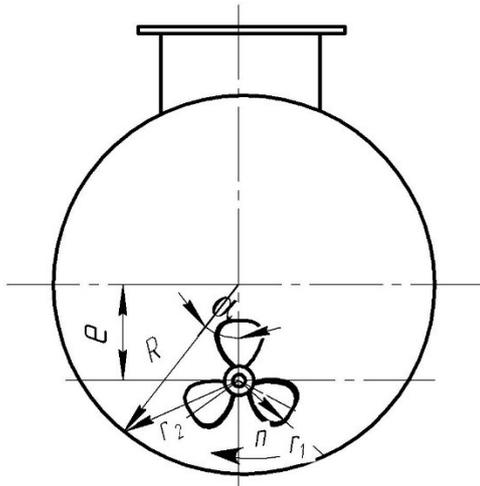


Рис. 1. Схема для расчета производительности смесителя с эксцентрично расположенным рабочим органом (винтом): e – эксцентриситет; r_1 – радиус внутренней кромки мешалки; r_2 – радиус мешалки; R – радиус смесительной емкости; n – частота вращения мешалки, α – угол наклона лопастей /

Fig. 1. Diagram for calculating the productivity of a mixer with an eccentrically positioned working body (screw): e – eccentricity; r_1 – radius of the inner edge of the agitator; r_2 – radius of the agitator; R – radius of the mixing tank; n – speed of rotation of the agitator, α – angle of inclination of the blades

Установить связь влияния частоты вращения рабочего органа на необходимую мощность и производительность нужно для объяснения конструктивных характеристик смесителя.

Потребная мощность определяется для правильного подбора привода смесителя в будущем. Величина этого показателя для привода пропеллера определяется из следующего выражения¹:

$$N_T = \frac{1}{4} n \zeta_{л} \rho \left[\frac{r_0^4}{4} (r^4 - r_0^4) \cdot [n^2 - 2kn + \kappa^2] - R \left[0,5 \left(\pi D - \left[2a + \frac{1}{3} (2a - e) \right] \right) L H c + \psi \pi \frac{R^4}{3} \right] \right], \quad (6)$$

где n – частота вращения пропеллера, c^{-1} ; $\zeta_{л}$ – коэффициент гидравлического сопротивления лопастей мешалки; ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$; r_0 – внутренний радиус кромки пропеллера, $м$; r – радиус мешалки, $м$; κ – поправочный коэффициент, c^{-1} ; R – радиус смесительной емкости, $м$; D – диаметр смесительной емкости, $м$; $2a$ – хорда дуги верхней части смесительной емкости, не смоченной жидкостью, $м$; e – хорда дуги, определяемая высотой наполнения емкости смешиваемой жидкостью, $м$; L – длина смесительной емкости, $м$; H – высота смесительной емкости, $м$; c – поправочный коэффициент, $м/с^2$; ψ – поправочный коэффициент, c^{-2} .

$$Q_T = \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{2} n L + a \cdot \frac{L_{max}^2}{4} (R^2 - r_2^2), \quad (8)$$

где r_1 – радиус внутренней кромки мешалки, $м$; r_2 – радиус мешалки, $м$; n – частота вращения мешалки, c^{-1} ; L – длина смесительной емкости, $м$; R – радиус смесительной емкости, $м$; S – смоченная площадь цилиндрической поверхности, $м^2$; a – поправочный коэффициент, $л/м \cdot с$.

Уравнение расхода – это математическое выражение закона сохранения массы и для технических устройств записывается как равенство расхода жидкости через два произвольных сечения. В соответствии с обозначениями, приведенными на рисунке 1, для жидкостного кольца уравнение расхода для смешиваемого потока запишется в виде:

Расстояния от центра рабочего органа и центра смесительной камеры (рис. 1) до произвольной точки связаны между собой уравнением:

$$r_2 = \sqrt{(R - e \cos \alpha)^2 + (e \sin \alpha)^2}. \quad (9)$$

Преобразовав уравнения (7), (8), (9), можно определить производительность:

$$Q_T = \frac{R^2 - 2R e \cos \alpha + e^2 - r_1^2}{2} n L + \frac{a L_{max}^2}{4} (e^2 - 2e \cos \alpha), \quad (10)$$

где e – эксцентриситет, $м$.

Интегрируя выражение (7) в пределах от 0 до L_{max} и от r_2 до R получим, что теоретическая производительность определяется следующим выражением:

Увеличение производительности достигается путем изменения расположения рабочего органа (добавляется эксцентриситет) и диаметра пропеллера, так как при этом образуется осевой эффект, который снижает сопротивление корма при его движении внутри смесительной камеры.

¹Лушнов М. А. Разработка конструкции и совершенствование рабочего процесса смесителя-запарника полужидких кормов с горизонтальной мешалкой: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2014. 161 с.

Результаты предварительных расчетов² свидетельствуют, что существует зависимость потребной мощности и производительности от диаметра рабочего органа, в качестве которого выступает винт.

На основании математических моделей мощности (6) и производительности предлагаемого смесителя (7), которые позволяют определить отношение длины емкости к ее диаметру $\frac{L}{D}=1,2^3$, разработан и исследован экспериментальный смеситель полужидких кормосмесей (рис. 2). При проведении экспериментальных исследований определяли влияние диаметра мешалки d_M на мощность N и производительность Q смесителя, а также на энергетические (затраты мощности) параметры в зависимости от частоты вращения пропеллера n . Для этого проведены однофакторные эксперименты со смесями различной влажности. Частоту вращения привода поддерживали, равной 400, 350, 300, 250 и 200 мин⁻¹. Влажность W кормосмеси соответствовала 76–84 %. В качестве

рабочих органов использовали винты диаметром 0,20, 0,25 и 0,35 м (рис. 3) [14, 15].

Однородность полученной кормовой смеси определяли общепринятыми методиками [16, 17, 18].

Среднюю величину каждого параметра определяли по результатам трехкратного измерения, а достоверность зависимостей – на основе коэффициента корреляции (R) и его ошибки (mR). Зависимость считали достоверной при выполнении условия $R > 3mR$.

На основании полученных теоретических зависимостей (6) и (8) и экспериментальных исследований построены зависимости мощности смешивания (рис. 4) и производительности смесителя (рис. 5), имеющего диаметры рабочего органа, равного 0,35, 0,25 и 0,20 м, при влажности кормосмеси 76–88 % (рис. 6). Оптимальной влажностью кормосмеси, при которой происходит качественное смешивание и увеличивается производительность, принята $W = 84 %$.



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки и его рабочий орган / Fig. 2. General view of the experimental installation and its working body

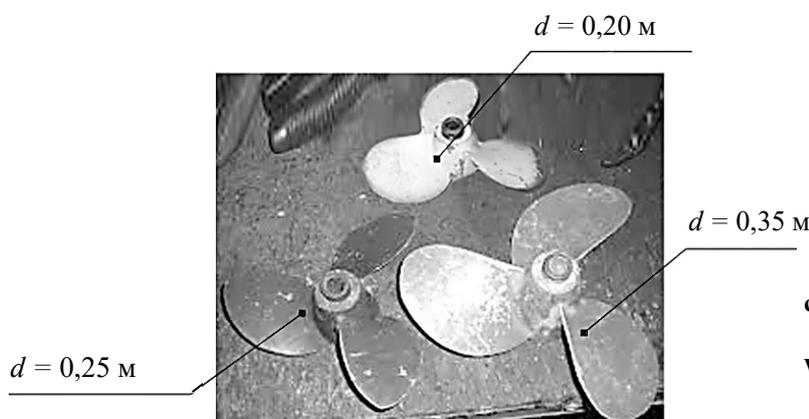


Рис. 3. Виды винтов (пропеллеров) с диаметрами 0,20, 0,25 и 0,35 м / Fig. 3. Types of screws (propellers) with diameters of 0.20, 0.25 and 0.35 m

²Лушнов М. А. Указ. соч.

³Там же.

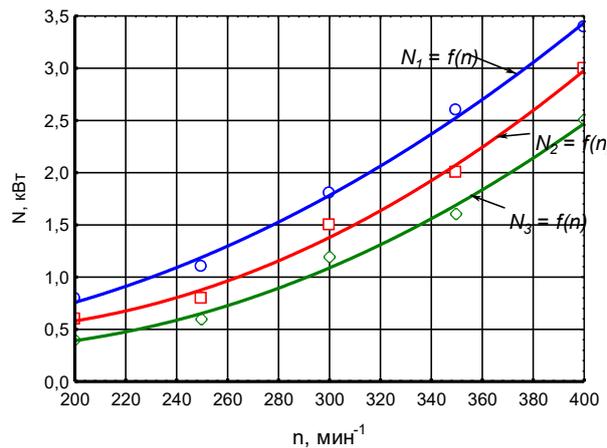


Рис. 4. Зависимости потребной мощности смешивания N_{π} , кВт от частоты вращения n кормосмесей влажностью 84 % с диаметром пропеллера: \circ – 0,35; \diamond – 0,25; \square – 0,20 м /

Fig. 4. Dependences of the required mixing power N_{π} on the rotation speed of n feed mixtures with a humidity of 84% with a propeller diameter equal to: \circ – 0,35; \diamond – 0,25; \square – 0,20 m

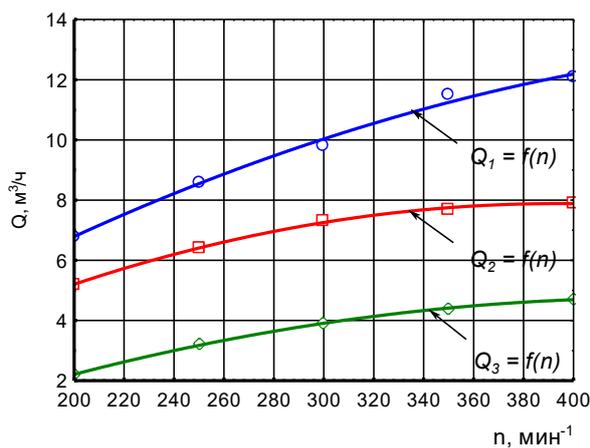


Рис. 5. Зависимости производительности смешивания Q от частоты вращения n кормосмесей влажностью 84 % с диаметром пропеллера: \circ – 0,35; \diamond – 0,25; \square – 0,20 м /

Fig. 5. The dependence of the mixing performance Q on the rotation frequency n of feed mixtures with a humidity of 84 % with a propeller diameter equal to: \circ – 0,35; \diamond – 0,25; \square – 0,2 m.

Результаты анализа представленных зависимостей свидетельствуют о том, что при увеличении частоты вращения мешалки с 200 до 400 мин⁻¹, диаметре пропеллера с 0,20 до

0,35 м и оптимальной влажности $W = 84$ % производительность смесителя изменяется от 2,0 до 12 м³/ч, потребная мощность от 1,0 до 3,5 кВт, а степень однородности кормосмесей возрастает с 90 до 98 %.

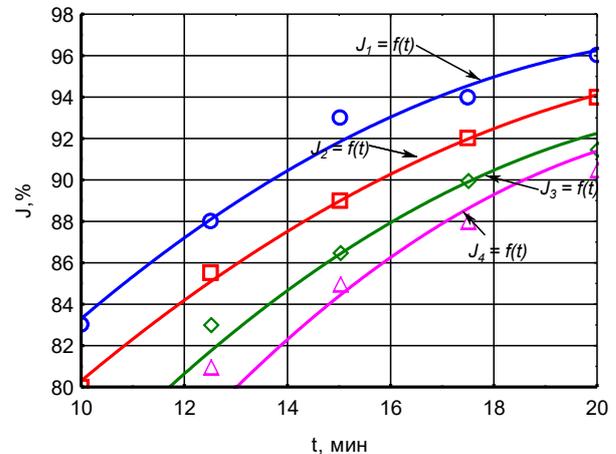


Рис. 6. Зависимости степени однородности кормосмесей $J = f(t_{CM})$ при влажности: \circ – 88 %; \square – 84 %; \diamond – 80 %; Δ – 76 % (при частоте вращения пропеллера $n = 300$ мин⁻¹)

Fig. 6. Dependences of the degree of uniformity of feed mixtures $J = f(t_{CM})$ at humidity: \circ – 88 %; \square – 84 %; \diamond – 80 %; Δ – 76 % (at the propeller rotation speed $n = 300$ мин⁻¹)

Выводы. Предложенный подход к составлению математической модели определения параметров смесительной системы позволил определять режимные и конструктивные параметры смесителя и пропеллера, а также производительность и мощность смешивания.

Экспериментально установлено, что увеличение частоты вращения мешалки с 200 до 400 мин⁻¹ при диаметре пропеллера с 0,20 до 0,35 м и оптимальной влажности кормовой смеси 84 % приводит к росту потребляемой мощности до 3,5 кВт, производительности смесителя до 12 м³/ч, а степень однородности кормосмесей до 98 %. Полученные результаты позволяют повысить качество смешивания кормосмеси с небольшими энергетическими затратами.

Список литературы

1. Нафиков И. Р., Хусаинов Р. К., Лукманов Р. Р., Галиев И. Г., Лушнов М. А., Кашапов И. И. Обоснование параметров вакуум-откачных средств с пульсирующим активным потоком. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022;17(1(65)):67–72. DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-67-72> EDN: MEVLIY
2. Сабиров Б. М., Зиганшин Б. Г., Дмитриев А. В., Нафиков И. Р., Сабирова Р. Р. Исследование устройства для дробления зерна. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023;18(1(69)):75–79. DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-75-79> EDN: JVHYQP
3. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Исупов А. Ю., Зырянов Д. А. Определение оптимальных параметров горизонтального смесителя с ленточным шнеком. Техника и технологии в животноводстве. 2021;(3(43)):66–70.

4. Лушнов М. А. Построение классификационной схемы и анализ устройств для тепловой обработки полужидких кормосмесей. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2013;(5(36)):65–68. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20250678> EDN: RBDUGH
5. Пополднев Р. С., Сабиров Б. М. Обзор конструкций измельчителей кормов. Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса: научн. тр. Международ. научн.-практ. конф., посвящ. памяти д.т.н., проф. Мудрова П. Г. Казань: Казанский ГАУ, 2021. С. 13–22.
6. Зиннатуллин Н. Х., Зиганшин Б. Г., Нафиков И. М., Лушнов М. А., Зиннатуллина Г. Н. Инжекционный смеситель твердых сыпучих материалов. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2017;12(3):68–71. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5a1d96936b0656.58609817 EDN: YMOULQ
7. Петряев А. Л., Чупшев А. В. Установка для тепловой обработки зерна при производстве кормов. Технологии, машины и оборудование в сельском хозяйстве: сб. научн. тр. научн.-практ. конф., Самара, 24 декабря 2021 года. Кинель: Самарский ГАУ, 2022. С. 80–83. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qoczaf> EDN: QOCZAF
8. Abdelfattah A. H., Sabirov R. F., Ivanov B. L., Lushnov M. A., Sabirov R. A. Calibration of soil humidity sensors of automatic irrigation controller. *BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”*. 2020;17:00249. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700249>
9. Иванов Б. Л., Зиганшин Б. Г., Рудаков А. И., Лушнов М. А. Оценка распределения капель дезинфицирующей жидкости по обрабатываемой поверхности. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019;14(3(54)):103–107. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5db969d80165a4.44685655 EDN: HNUTDX
10. Gabdrafikov F., Kharisov D., Galiev I., Khusainov R. Modernization of the fuel supply system in the internal combustion engine by electronic control of the ring valve. *BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”*. 2022;52:00028. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200028>
11. Yahin S., Gabdrafikov F., Khaliullin F., Khusainov R., Nafikov I. Improving the operational efficiency of tractors by ensuring their ability to perform work. *International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”*. 2020;17:00111. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700111>
12. Konovalov V., Chupshev A., Teryushkov V., Dontsova M. Simulation of pig productivity under feed consumption. *Scientific Papers. Series D. Animal Scienc.* 2022;65(1):150–157. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49533891> EDN: UCVTGP
13. Мохнаткин В. Г., Брагин А. Ю. Оценка качества работы технологических процессов в животноводстве на примере линий приготовления кормов. Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: мат-лы XVI Международ. научн.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение». Киров, 06 февраля 2023 г. Киров: ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ, 2023. Вып. 23. С. 176–178.
14. Шакиров Р. М., Хусаинов Р. К., Галиев И. Г. Общий подход к процессу смешивания кормов. Современные достижения аграрной науки: науч. тр. Всеросс. (национальной) научн.-практ. конф., посвящ. памяти засл. деятеля науки и техники РФ, проф. Гайнанова Х. С. Казань: Казанский ГАУ, 2021. Т. 1. С. 156–161.
15. Al-Maidi A. A. H., Himoud M. S., Kaliganov A. C., Teryushkov V. P., Chupshev A. V., Konovalov V. V., Rodionov Y. V. Modelling the quality of the mixture in a continuous paddle mixer. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*. 2021;16:1769–1774. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44973645> EDN: NIZZWM
16. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Исупов А. Ю. Определение оптимальных технологических параметров горизонтального смесителя рассыпных комбикормов. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(2):293–300. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.293-300> EDN: ТВЕТWK
17. Мохнаткин В. Г., Поярков М. С., Горбунов Р. М. Оптимизация параметров реактора-смесителя методами планирования эксперимента. Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: мат-лы XV Международ. научн.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение». Киров, 14 февраля 2022 г. Киров: ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ, 2022. Вып. 22. С. 63–66.
18. Мохнаткин В. Г., Поярков М. С., Горбунов Р. М. Статистическая оценка качества смешивания кормов. Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: мат-лы XV Международ. научн.-практ. конф. «Наука – Технология – Ресурсосбережение». Киров, 14 февраля 2022 г. Киров: ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ, 2022. Вып. 22. С. 70–73.

References

1. Nafikov I. R., Khusainov R. K., Lukmanov R. R., Galiev I. G., Lushnov M. A., Kashapov I. I. Substantiation of the parameters of vacuum pumping facilities with a pulsing active flow. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2022;17(1(65)):67–72. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-67-72>
2. Sabirov B. M., Ziganshin B. G., Dmitriev A. V., Nafikov I. R., Sabirova R. R. Study of a device for crushing grain. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2023;18(1(69)):75–79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-75-79>
3. Savinykh P. A., Turubanov N. V., Isupov A. Yu., Zyryanov D. A. Determination of optimal parameters of a horizontal mixer with a belt screw. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve* = *Machinery and technologies in livestock*. 2021;(3(43)):66–70. (In Russ.).

4. Lushnov M. A. The construction of a classification scheme and analysis of devices for heat treatment of semi-fluid feeding mixtures. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2013;(5(36)):65–68. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20250678>
5. Popoldnev R. S., Sabirov B. M. Feed chopper design overview. The current state and prospects for the development of the technical base of the agro-industrial complex: scientific papers of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor P. G. Mudrov. Kazan: *Kazanskiy GAU*, 2021. pp. 13–22.
6. Zinnatullin N. Kh., Ziganshin B. G., Nafikov I. M., Lushnov M. A., Zinnatullina G. N. Injection mixture of solid, loose materials. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2017;12(3):68–71. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5a1d96936b0656.58609817
7. Petryaev A. L., Chupshev A. V. Installation for thermal processing of grain in the production of feed. Technologies, machinery and equipment in agriculture: collection of scientific papers of the Scientific and Practical Conference, Samara, December 24, 2021. Kinel: *Samarskiy GAU*, 2022. pp. 80–83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qocza>
8. Abdelfattah A. H., Sabirov R. F., Ivanov B. L., Lushnov M. A., Sabirov R. A. Calibration of soil humidity sensors of automatic irrigation controller. BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. 2020;17:00249. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700249>
9. Ivanov B. L., Ziganshin B. G., Rudakov A. I., Lushnov M. A. Assessment of distribution of disinfecting liquid drops on the surface processed. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2019;14(3(54)):103–107. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5db969d80165a4.44685655
10. Gabdrafikov F., Kharisov D., Galiev I., Khusainov R. Modernization of the fuel supply system in the internal combustion engine by electronic control of the ring valve. BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. 2022;52:00028. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200028>
11. Yahin S., Gabdrafikov F., Khaliullin F., Khusainov R., Nafikov I. Improving the operational efficiency of tractors by ensuring their ability to perform work. International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. 2020;17:00111. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700111>
12. Konovalov V., Chupshev A., Teryushkov V., Dontsova M. Simulation of pig productivity under feed consumption. Scientific Papers. Series D. Animal Scienc. 2022;65(1):150–157. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49533891>
13. Mokhnatkin V. G., Bragin A. Yu. Assessment of the quality of technological processes in animal husbandry using the example of feed preparation lines. Improving the operational performance of agricultural energy: Proceedings of the XVI International scientific and practical Conference "Science – Technology – Resource Saving", Kirov, February 06, 2023. Kirov: *FGBOU VO Vyatskiy GATU*, 2023. Iss. 23. pp. 176–178.
14. Shakirov R. M., Khusainov R. K., Galiev I. G. General approach to the process of mixing feeds. Modern achievements of agricultural science: Scientific papers of the All-Russian (national) Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor Gainanova H. S. Kazan: *Kazanskiy GAU*, 2021. Vol. 1. pp. 156–161.
15. Al-Maidi A. A. H., Himoud M. S., Kaliganov A. C., Teryushkov V. P., Chupshev A. V., Konovalov V. V., Rodionov Y. V. Modelling the quality of the mixture in a continuous paddle mixer. International Journal of Agricultural and Statistical Sciences. 2021;16:1769–1774. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44973645>
16. Savinyh P. A., Turubanov N. V., Isupov A. J. Determination of optimal technological parameters of a horizontal mixer of loose compound feeds. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(2):293–300. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.293-300>
17. Mokhnatkin V. G., Poyarkov M. S., Gorbunov R. M. Optimization of the parameters of the mixing reactor by methods of experiment planning. Improving the operational performance of agricultural energy: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference "Science – Technology – Resource Saving ". Kirov, February 14, 2022. Kirov: *FGBOU VO Vyatskiy GATU*, 2022. Iss. 22. pp. 63–66.
18. Mokhnatkin V. G., Poyarkov M. S., Gorbunov R. M. Statistical assessment of the quality of feed mixing. Improving the operational performance of agricultural energy: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference "Science – Technology – Resource Saving ". Kirov, February 14, 2022. Kirov: *FGBOU VO Vyatskiy GATU*, 2022. Iss. 22. pp. 70–73.

Сведения об авторе

✉ **Лушнов Максим Александрович**, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Машины и оборудования в агробизнесе», ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», ул. Карла Маркса, дом 65, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015, e-mail: info@kazgau.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7339-5408>, e-mail: maksim-lushnov@mail.ru

Information about the authors

✉ **Maksim A. Lushnov, PhD in Engineering**, associate professor at the Department "Machinery and Equipment in Agribusiness", Kazan State Agrarian University, 65 Karl Marx Str., Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015, e-mail: info@kazgau.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7339-5408>, e-mail: maksim-lushnov@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author