УДК 631.363

DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-103-109

М.В. Борисова, А.Ю. Титов, В.В. Новиков, В.В. Коновалов

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПОРОЖНЕНИЯ ТИХОХОДНОГО СМЕСИТЕЛЯ

Ключевые слова: *смеситель; смешивание; качество смеси; частота вращения; лопасть; винтообразная форма.*

Введение. При производстве комбикормов одной из основных операций является смешивание зерновой смеси. Данному вопросу посвящено множество работ, в которых обоснованы рабочие процессы исследования по качественным показателям процесса смешивания [2–4, 6, 7, 9]. Приготовление кормовых смесей осуществляется в основном смесителями разнообразной конструкции, а также экструдерами и шнековыми устройствами [6, 7]. Широкое распространение получили горизонтальные смесители с рабочим органом в виде лопастей, установленных на вращающемся валу. Их отличает низкая энергоемкость смесеобразования и способность за короткое время работы достигать необходимой равномерности смеси [3, 9]. Поэтому совершенствование конструкции лопастного смесителя является важной народнохозяйственной задачей.

Цель исследования – установление выражений, описывающих производительность и длительность опорожнения емкости смесителя в зависимости от степени ее заполнения, частоты вращения мешалки и количества лопастей.

Задачи исследований:

1. Определить влияние частоты вращения мешалки и количества ее лопастей с учетом степени заполнения емкости на длительность опорожнения емкости смесителя.
2. Установить зависимость, адекватно описывающую производительность опорожнения смесительной емкости.

Условия, материалы и методы исследований. На основании обзора литературы и анализа технологического процесса смешивания зерновой смеси в Самарской ГСХА разработана конструкция лопастного смесителя сыпучих материалов (рисунок 1) [1, 5]. Смеситель состоит из бункера 1, разделенного перегородками 2 на секции 3 для различных компонентов. С целью исключения сводообразования компонентов смеси в каждой секции 3 бункера установлены спиральные шнеки 4. Они служат одновременно как для подачи компонентов к выгрузным окнам 5, так и для разрушения сводов во внутреннем пространстве отсеков. Снизу каждой секции 3 бункера, перекрывая выгрузное окно 5, установлен гравитационный дозатор, выполненный в виде регулировочных заслонок 6. Бункер 1 жестко закреплен сверху корпуса смесителя 7. Внутри цилиндрического смесителя расположен горизонтальный приводной вал 8 с рабочими органами, выполненными в виде радиальных винтообразных лопастей 9 трапецевидной формы. При этом плоская развертка лопасти 9 представляет собой равнобедренную трапецию. Лопасти 9 закреплены на валу 8 узкой стороной трапеции под углом в 30 градусов от продольной оси вала 8. Привод вала 8 смесителя осуществляется электродвигателем 14, а привод спиральных шнеков 4 электродвигателем 15. В зависимости от периодического или непрерывного режима работы смесителя открывается ши-

бер нижнего 10 или верхнего 11 выгрузного отверстия смесителя.

Выгрузка готовой смеси из смесителя регулируется шиберами 12 через два выгрузных окна 10 и 11, расположенных одно под другим. Подача исходных компонентов из бункера 1 в

корпус смесителя 7 осуществляется посредством спиральных шнеков 4 через цепную передачу 16 в выгрузные окна 5 дозаторов, расположенные у торца смесителя в противоположном конце от выгрузных окон 10 и 11 смесителя.

Рисунок 1

Конструктивно-технологическая схема смесителя зерновой смеси: 1 – бункер; 2 – перегородка; 3 – секции бункера; 4 – спиральный шнек; 5 – выгрузное окно; 6 – регулировочная заслонка; 7 – корпус смесителя; 8 – приводной вал; 9 – винтообразная лопасть; 10, 11 – выгрузное отверстие; 12 – шиберная задвижка; 13 – выгрузная горловина; 14 – электродвигатель привода смесителя; 15 – электродвигатель привода дозаторов; 16 – цепной привод дозирующих шнеков

Результаты исследований. При конструировании смесителей необходимо решить сложную, разноплановую задачу. С одной стороны, необходимо обеспечить надлежащее качество смеси в соответствии с зоотехническими или технологическими требованиями. Без выполнения указанного условия использование смесителя вообще теряет смысл. С другой стороны, необходима экономическая целесообразность применения смесителя в плане обеспечения потребной его производительности. В данном случае, как правило, смеситель входит в состав технологической линии, и его производительность должна соответствовать производительности технологической линии. Если смеситель – одиночная машина (в мелких хозяйствах), то его производительность должна быть достаточной, чтобы не отвлекать оператора от других потребных операций по балансу времени смены. Третья задача – сокращение удельных затрат энергии на смесеобразование [8].

Энергоемкость смесеобразования можно определить:

$$Y = \frac{A}{Mc} = \frac{\sum (N_i \cdot T_i)}{Mc}, \text{ Дж/кг}, \quad (1)$$

где A – работа, затраченная на приготовление смеси, Дж; Mc – масса приготовленной кормосмеси, кг; N_i – затраченная мощность на выполнение i -ой операции технологического процесса, Вт; T_i – длительность выполнения i -ой операции технологического процесса, с.

При этом соотношение $\frac{Mc}{\sum T_i}$ является производительностью смесительного агрегата в составе как смесителя, так и дозирующих устройств.

Производительность каждого дозатора определяется рецептурой смеси и соответственно долей конкретного компонента в ее составе. Суммарная производительность (массовая подача) всех i -х дозаторов определит производительность смесителя, кг/с:

$$Q_{см} = \frac{\sum M_i}{T_{ц}}, \text{ кг/с}. \quad (2)$$

Цикл работы смесительного устройства как агрегата будет включать ряд операций:

$$T_{ц} = T_z + T_c + T_p + T_b, \text{ с}, \quad (3)$$

где $T_{ц}$ – длительность цикла смесителя, с; T_z – длительность исходной загрузки компонентов в смеситель, с; T_c – длительность такта смешения

компонентов, обеспечивающая качество смеси, с; T_p – длительность такта непрерывной работы смесителя при одновременной загрузке компонентов, выгрузке готовой смеси, с; T_b – длительность опорожнения емкости смесителя от остатков (выгрузки) приготовленной смеси, с.

Для установления длительности опорожнения емкости лабораторного смесителя и произ-

водительности при опорожнении емкости реализовали плана Бокса – Бенкина для трех факторов степень заполнения емкости ε (%), частота вращения n (мин⁻¹) и количество лопастей Z (шт.). В результате обработки результатов эксперимента получено выражение длительности опорожнения емкости смесителя T_b (с):

$$T_b = 306,8819 + 206,9554 \cdot \varepsilon^{0,15345} - 134,226 \cdot n^{0,113576} - 173,981 \cdot Z^{0,514562} + 289,0334 \cdot (\varepsilon \cdot n)^{-58,7998} + 413,2204 \cdot (\varepsilon \cdot Z)^{-50,0641} + 670,3885 \cdot (n \cdot Z)^{-0,17116} + \frac{1285,45}{\varepsilon} - \frac{672,567}{n} - \frac{1460,24}{Z}. \quad (4)$$

Множественный коэффициент корреляции составляет $R = 0,955841$, доверительная вероятность результата по F-тест = 0,900868. Проверка сходимости расчетных и экспериментальных значений на нормальной бумаге для длительности опорожнения смеси (рисунок 2а) и неучтен-

ных отклонений неравномерности смеси (рисунок 2б) показывает сходимость модели и данных эксперимента с 90 % доверительной вероятностью. Тем самым указанная модель на исследуемом интервале изменения факторов адекватно описывает результаты замеров.

Рисунок 2

Результаты проверки сходимости расчетных и экспериментальных значений на нормальной бумаге: а – распределение значений длительности; б – распределение неучтенных отклонений

Учитывая сложность выражения (формула 4) и сложность расчета с его использованием, определим выражение длительности опорожнения емкости исходя из массы смеси M_c (кг) и производительности Q_v (кг/ч) опорожнения емкости смесителя. Длительность опорожнения емкости T_b (с):

$$T_b = 3600 \cdot M_c / Q_v. \quad (5)$$

Для анализа полученных результатов производительности опорожнения смесителя Q_v (кг/ч) установлена парная корреляция факторов (рисунок 3). Сравнивая угол размещения прямых влияния факторов на неравномерность смеси, видим, что рост степени заполнения ε емкости бункера повышает неравномерность смеси v . В то же время увеличение частоты вращения n и количества лопастей Z приблизительно одинаково уменьшают неравномерность смеси v . Парное влияние независимых факторов практически отсутствует.

Более точное влияние факторов на результат (производительность опорожнения Q_v , кг/ч) показывает линейная модель для кодированных значений независимых факторов:

$$Q_v = 194,6497 + 72,1799 \cdot X_1 + 55,3639 \cdot X_2 + 13,6963 \cdot X_3, \quad (6)$$

где X_1 – кодированное значение степени заполнения ε емкости; X_2 – кодированное значение частоты вращения n ; X_3 – кодированное значение количества лопастей Z . Множественный коэффициент корреляции составляет $R = 0,88225$, доверительная вероятность результата по F-тест = 0,64561 и графический анализ (рисунок 3) свидетельствуют о неадекватности полученной модели. Наибольшее значение модуля коэффициентов (формула 1) имеет фактор X_1 – степень заполнения емкости – и равен 72,1799, а поэтому он наиболее значим. Несколько меньшие значения у других факторов X_2 и X_3 : 55,3639 и 13,6963. Влияние частоты вращения выше, чем количества лопастей. Знак «+» перед коэффициентами указывает, что рост значений факторов повышает производительность опорожнения.

Некоторые авторы рекомендуют использовать степенную зависимость производительности [8]. Степенная модель производительности опорожнения Q_v , кг/ч, на основе полученных данных выразится в виде:

$$Q_v = 94,67936 + 0,236853 \cdot \varepsilon^{1,376937} + 0,17948 \cdot n^{1,295169} + 0,191058 \cdot Z^{-0,20651}. \quad (7)$$

Для выявления дополнительно имеющихся тенденций получим квадратичную модель (ри-

сунок 4) производительность опорожнения в кодированном виде:

$$Q_v = 174,7366 + 67,98418 \cdot X_1 + 60,78328 \cdot X_2 + 18,35977 \cdot X_3 + 20,97862 \cdot X_1 \cdot X_2 - 22,3071 \cdot X_1 \cdot X_3 + 47,37258 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (8)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,95511$, F-тест $= 0,86598$ и графический анализ (рисунок 5) свидетельствуют о неадекватности модели.

Квадратичная модель для натуральных значений (рисунок 6):

$$Q_v = 362,9054 + 3,940444 \cdot \varepsilon + 2,559039 \cdot n - 158,995 \cdot Z - 0,02286 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon + 0,007494 \cdot n \cdot n + 14,9146 \cdot Z \cdot Z + 0,076037 \cdot \varepsilon \cdot n - 0,17467 \cdot \varepsilon \cdot Z - 0,33116 \cdot n \cdot Z. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,96687$, F-тест $= 0,901448$ и графический анализ соответствия значений (рисунок 7) свидетельствуют об адекватности модели с 90 % доверительной вероятностью.

Рисунок 3
График корреляции факторов между собой и производительностью опорожнения емкости смесителя

Рисунок 4
Результаты моделирования влияния кодированных значений факторов (частоты вращения X_2 и количества лопастей X_3) на производительность опорожнения Q_v , кг/ч: а – при степени заполнения емкости $X_1 = -1$; б – при $X_1 = 0$; в – при $X_1 = 1$

Рисунок 5
Результаты проверки сходимости расчетных и экспериментальных значений мощности на нормальной бумаге

Рисунок 6

Результаты моделирования влияния натуральных значений факторов частоты вращения n , 20...40 мин^{-1} , и количества лопастей Z , 2...8 шт., на производительность опорожнения Q_v , кг/ч: а – при степени заполнения емкости $\varepsilon = 25\%$; б – при $\varepsilon = 50\%$; в – при $\varepsilon = 75\%$; г – влияние степени заполнения емкости ε , 25...75 %, и частоты вращения n , 20...40 мин^{-1} , при количестве лопастей $Z = 8$ шт.

Рисунок 7

Результаты проверки сходимости расчетных и экспериментальных значений производительности опорожнения на нормальной бумаге

Вывод. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить выражения, описывающие производительность и длительность опорожнения емкости смесителя в зависимости от степени заполнения, частоты вращения мешалки и количества ее лопастей с доверительной вероятностью 90 %. Длительность опорожнения емкости смесителя описывается сложной степенной функцией с большим количеством членов. Рост степени заполнения увеличивает длительность опорожнения емкости смесителя, а повышение частоты вращения ме-

шалки и количество ее лопастей сокращают длительность опорожнения емкости смесителя. Производительность опорожнения емкости смесителя описывается квадратичной функцией. Рост степени заполнения и частоты вращения увеличивает производительность опорожнения емкости смесителя, а количество лопастей мешалки имеет сложную зависимость. При использовании мешалки с 6-ю лопастями производительность опорожнения емкости падает независимо от частоты вращения и степени заполнения емкости.

Библиографический список

1. Новиков, В.В. Методологические основы и обоснование структурно-функциональ-

ной схемы зерновой смеси [Текст] / В.В. Новиков, М.В. Борисова // Эксплуатация автотрак-

торной и сельскохозяйственной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы: сб. науч. трудов. Пенза, 2017. С. 82–88.

2. Коновалов, В.В. Оптимизация параметров барабанного смесителя [Текст] / В.В. Коновалов, Н.В. Дмитриев, А.В. Чупшев, В.П. Терюшков // Нива Поволжья. 2013. № 4 (29). С. 41–47.

3. Коновалов, В.В. Аналитические аспекты гравитационного смешивания барабанных устройств [Текст] / В.В. Коновалов, Н.В. Дмитриев, В.П. Терюшков, А.В. Чупшев // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 2. С. 40–46.

4. Хольшев, Н.В. Совершенствование технологического процесса приготовления сухих рассыпных кормосмесей шнеколопастным смесителем [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н.В. Хольшев. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2015. 209 с.

5. Пат. 179164 Российская Федерация. Смеситель зерновой смеси [Текст] / В.В. Новиков, М.В. Борисова, А.С. Грецов, Д.Н. Котов, В.В. Коновалов. № 2017136899; заявл. 19.10.2017; опубл. 03.05.2018. Бюл. № 13.

6. Петрова, С.С. Сравнительные исследования смесителя с круглыми и плоскими лопастями [Текст] / С.С. Петрова, В.П. Терюшков, А.В. Чупшев, М.В. Коновалова // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 3. С. 121–124.

7. Коновалов, В.В. Аналитическое обоснование длительности цикла работы смесителя периодического действия [Текст] / В.В. Коновалов, М.В. Фомина, В.П. Терюшков, А.В. Чупшев // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 10–15.

8. Chupshev A., Kononov V., Fomina M. Optimization in work modeling of a mixer. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. № 1084-012010.

9. Мартынова, Д.А. Повышение эффективности процесса производства экструдированных кормовых продуктов за счет изменения конструктивных параметров шнека пресс-экструдера [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Д.А. Мартынова. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2017. 167 с.

Сведения об авторах

1. **Борисова Марина Викторовна**, аспирант кафедры сельскохозяйственных машин и механизации животноводства, ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 446442, Самарская область, п. г. т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2, e-mail: morskay6363@mail.ru.

2. **Титов Андрей Юрьевич**, аспирант кафедры сельскохозяйственных машин и механизации животноводства, ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 446442, Самарская область, п. г. т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2, e-mail: titova_iv@mail.ru.

3. **Новиков Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин и механизации животноводства, ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 446442, Самарская область, п. г. т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2, e-mail: morskay6363@mail.ru.

4. **Коновалов Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ, 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: kononov-penza@rambler.ru.

Установлены выражения, описывающие производительность и длительность опорожнения емкости смесителя в зависимости от степени заполнения емкости, частоты вращения мешалки и количества ее лопастей. Приведено описание предложенной конструкции смесителя и методика его исследования. Представлены выражения, описывающие длительность опорожнения емкости смесителя, а также производительность опорожнения емкости смесителя как в кодированном виде, так и при натуральных значениях факторов. Для описания процесса опорожнения лабораторного смесителя периодического действия от готовой смеси смешения

использованы линейные, квадратичные и степенные модели. Наилучшие критериальные значения – у квадратичной модели. Рост степени заполнения увеличивает длительность опорожнения емкости смесителя, а повышение частоты вращения мешалки и количества ее лопастей – сокращают. Рост степени заполнения и частоты вращения увеличивает производительность опорожнения емкости смесителя, а количество лопастей мешалки имеет сложную зависимость. При использовании мешалки с шестью лопастями производительность опорожнения емкости падает независимо от частоты вращения и степени заполнения.

M. Borisova, A. Titov, V. Novikov, V. Kononov

DISCHARGE REGRESSION MODEL OF A LOW-SPEED MIXER

Key words: *mixer; mix; mix quality; rotation frequency; blade; helical form.*

Authors' personal details

1. **Borisova Marina**, Post-graduate student of the department of Agricultural machines and mechanization of livestock breeding, Samara State Agroculural Academy, 446442, Samara region, Ust'-Kinel'sky settlement, Uchebnaya st., 2, e-mail: morskay6363@mail.ru.

2. **Titov Andrei**, Post-graduate student of the department of Agricultural machines and mechanization of livestock breeding, Samara State Agroculural Academy, 446442, Samara region, Ust'-Kinel'sky settlement, Uchebnaya st., 2, e-mail: titova_iv@mail.ru.

3. **Novikov Vladimir**, Candidate of technical sciences, professor of the department of Agricultural machines and mechanization of livestock breeding, Samara State Agroculural Academy, 446442, Samara region, Ust'-Kinel'sky settlement, Uchebnaya st., 2, e-mail: morskay6363@mail.ru.

4. **Kononov Vladimir**, Doctor of technical sciences, professor of the Engineering technology department, Penza State Technological University, 440039, Penza, Baydukov/Gagarin Road, 1A/11, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru.

The purpose of the study is to establish expressions describing the performance and duration of the mixer tank discharge depending on the tank fullness, rotation frequency of the mixer and the number of its blades. There is a description of the proposed design of the mixer and the method of its study. Expressions describing the duration of the mixer tank discharge, as well as the performance of emptying the mixer tank, both in coded form and at natural values of factors are presented. To describe the discharge process of the laboratory mixer of periodic action for ready mix mixing linear, quadratic,

and exponential models were used. The best criteria values were of a quadratic model. The higher fullness increases the duration of the tank discharge while higher rotation frequency of the mixer and the number of blades reduces the time of the mixer tank discharge. The higher mixer tank fullness as well as the rotation speed increases the discharge capacity of the mixer. The number of the mixer blades has a complex relationship. When there are 6 blades discharge capacity drops regardless of the rotation frequency and the tank fullness rate.

© Борисова М.В., Титов А.Ю., Новиков В.В., Коновалов В.В.