

Регрессионная модель мощности привода тихоходного смесителя

М.В. Борисова, аспирантка, В.В. Новиков, к.т.н., А.Ю. Титов, аспирант, ФГБОУ ВО Самарский ГАУ; В.В. Коновалов, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ

Одной из основных задач при повышении продуктивности животных является производство высококачественных комбикормов. Из-за низкого качества и недостаточного количества комбикормов генетический потенциал животных реализуется всего на 40–60%. Генетический потенциал животных, высокая интенсивность физиологических и биохимических процессов требуют постоянного и стабильного поступления питательных и биологиче-

ски активных веществ. Ни в одном виде корма нет полного набора таких веществ, поэтому кормовые смеси приготавливают из нескольких составляющих. В перспективе около 54% производимого в стране фуражного зерна будет перерабатываться комбикормовой промышленностью, а оставшаяся часть – использоваться для производства кормовых смесей непосредственно в хозяйствах [1].

Приготовление кормовых смесей осуществляется в основном смесителями разнообразной конструкции, а также экструдерами и шнековыми устройствами [2–4]. Широкое распространение получили горизонтальные смесители с рабочим

органом в виде лопастей, установленных на вращающемся валу. Их отличает низкая энергоёмкость смесеобразования и способность за достаточно короткое время работы достигать необходимой равномерности смеси [5, 6].

Материал и методы исследования. На основании обзора литературы и анализа технологического процесса смешивания зерновой смеси в Самарской ГСХА разработана конструкция лопастного смесителя сыпучих материалов (рис. 1) [4].

Смеситель состоит из бункера 1, разделённого 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 жёстко закреплён 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 развёртка лопасти 9 представляет собой равнобедренную трапецию. Лопасти 9 закреплены на валу 8 узкой стороной трапеции под углом в 30 град. от продольной оси вала 8. Привод вала 8 смесителя осуществляется электродвигателем 14, а привод спиральных шнеков 4 – электродвигателем 15. В зависимости от периодического или непре-

рывного режима работы смесителя открывается шибер 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 [7]. Выгрузные окна 5 дозаторов расположены у торца смесителя в противоположном конце от выгрузных окон 10 и 11 смесителя.

Методика исследования соответствовала СТО АИСТ 19.2-2008 и предусматривала экспериментальное определение числовых значений затрачиваемой мощности на привод тихоходного смесителя. Изменение частоты вращения мешалки и замер потребляемой мощности производился частотным преобразователем Altivar-71, а количество лопастей – установкой съёмных лопастей в подготовленные отверстия вала. Частота вращения мешалки соответствовала 20, 30 и 40 мин⁻¹. Количество лопастей устанавливалось 4, 6 и 8 шт. Степень заполнения ёмкости смесителя соответствовала 25, 50 и 75%. При проведении эксперимента реализовывался план Бокса – Бенкина для трёх факторов. Обработка данных результатов исследования с целью получения регрессионных моделей осуществлялась компьютерной программой Statistica 5.5.

Результаты исследования. В процессе реализации плана Бокса – Бенкина для трёх факторов по определению потребляемой мощности определя-

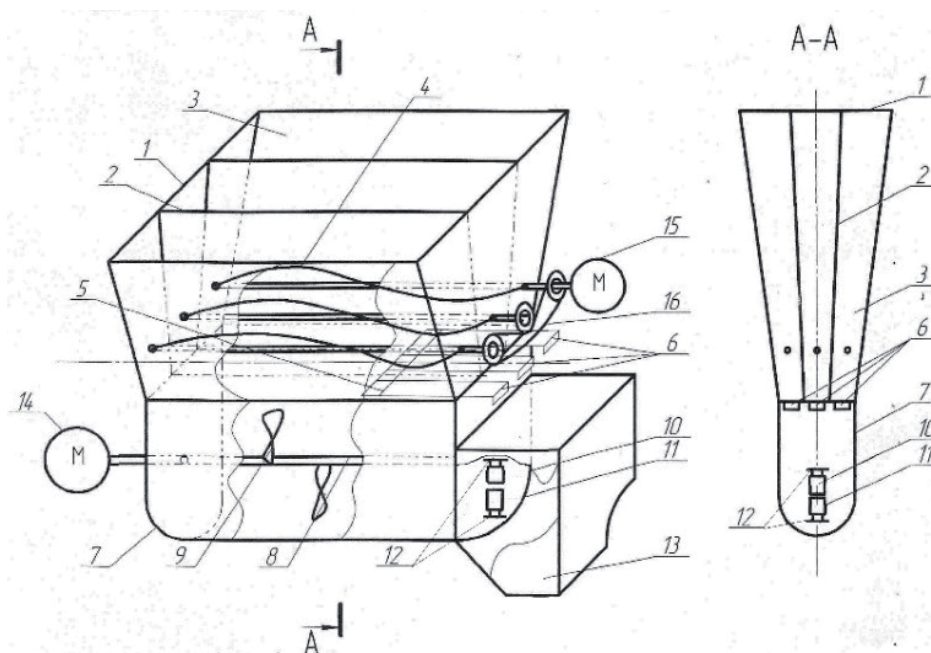


Рис. 1 – Конструктивно-технологическая схема смесителя зерновой смеси:

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

лись величины силы тока и напряжения у электродвигателя привода вала смесителя. По результатам произведения указанных величин рассчитываем потребляемую мощность в каждом опыте.

Для анализа полученных результатов установлена парная корреляция факторов, участвующих в эксперименте (рис. 2). Сравнивая угол размещения прямых (правый столбик) влияния факторов на затрачиваемую мощность, видим, что рост как X_1 – степени заполнения ёмкости бункера, так и X_2 – частоты вращения n , и X_3 – количества лопастей Z повышает величину затрачиваемой мощности P , Вт. Наиболее крутой угол – у частоты вращения, а пологий – у количества лопастей.

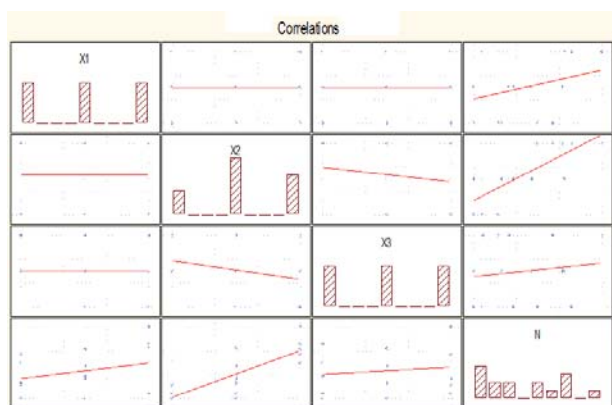


Рис. 2 – График корреляции факторов между собой и мощностью P

Более точное влияние факторов на результат (мощность P , Вт) показывает линейная модель для кодированных значений независимых факторов:

$$P = 200,2284 + 34,52 \cdot X_1 + 113,0873 \cdot X_2 + 38,77745 \cdot X_3, \quad (1)$$

где X_1 – кодированное значение степени заполнения ёмкости;
 X_2 – кодированное значение частоты вращения n ;

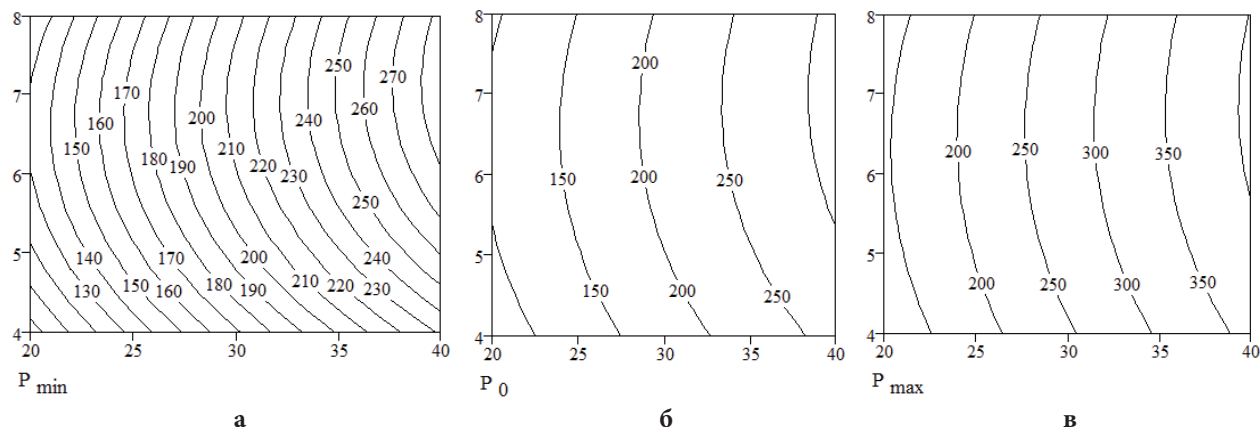


Рис. 5 – Результаты моделирования влияния натуральных значений факторов частоты вращения n , мин⁻¹, и количества лопастей Z , шт., на затрачиваемую мощность P , Вт:
 а – при степени заполнения емкости $\epsilon=25\%$; б – при $\epsilon=50\%$; в – при $\epsilon=75\%$

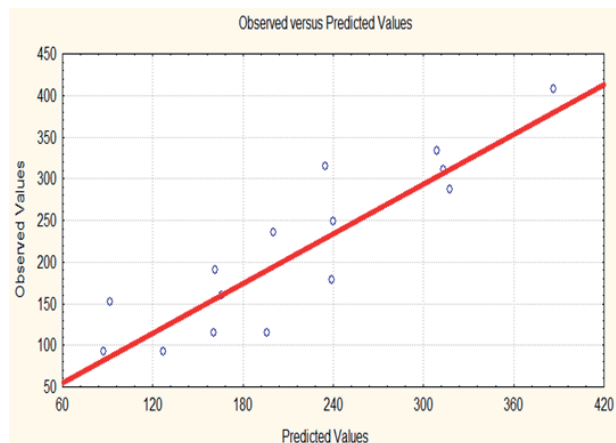


Рис. 3 – Результаты проверки сходимости расчётных и экспериментальных значений мощности на нормальной бумаге

X_3 – кодированное значение количества лопастей Z .

Множественный коэффициент корреляции полученной модели составляет $R=0,89180$, доверительная вероятность результата по F-тест = $0,674159$. Величина указанных критериев и проверка сходимости расчётных и экспериментальных значений на нормальной бумаге для мощности (рис. 3)

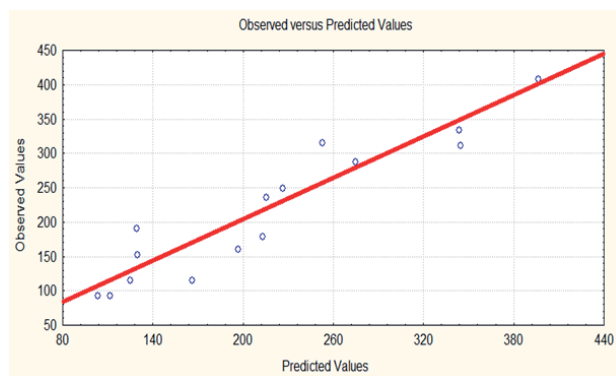


Рис. 4 – Результаты проверки сходимости расчётных и экспериментальных значений мощности на нормальной бумаге

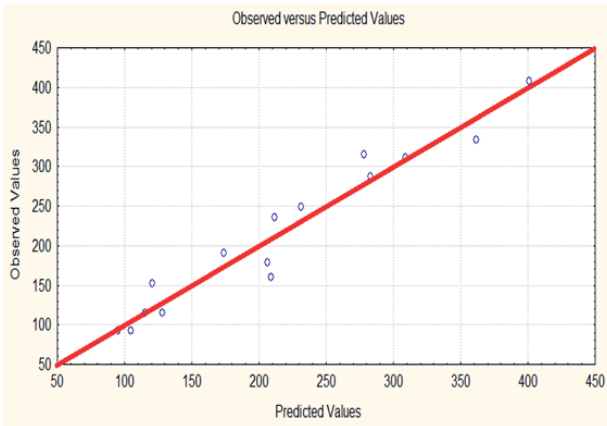


Рис. 6 – Результаты проверки сходимости расчетных и экспериментальных значений мощности на нормальной бумаге

показывает низкую сходимость модели и данных эксперимента. Тем самым указанная линейная модель на исследуемом интервале изменения факторов неадекватно описывает результаты замеров.

Наибольшее значение модуля коэффициентов имеет фактор X_2 – частота вращения и равен 113,1,

а поэтому он наиболее значим. Несколько меньшие значения у других факторов X_3 и X_1 : 38,78 и 34,52. Знак «+» перед коэффициентами указывает, что рост любого фактора повышает затраты мощности на перемешивание компонентов смеси.

Для выявления вновь появляющихся тенденций получим квадратичную модель мощности P (Вт) в кодированном виде:

$$P = 107,6519 + 28,22143 \cdot X_1 + 120,6966 \cdot X_2 + 41,89179 \cdot X_3 + 9,532069 \cdot X_1 \cdot X_1 + 8,708276 \cdot X_2 \cdot X_2 - 43,9679 \cdot X_3 \cdot X_3 + 31,49286 \cdot X_1 \cdot X_2 + 107,6519 \cdot X_1 \cdot X_3 - 16,6707 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Коэффициент корреляции $R = 0,93857$ и F-тест = 0,815077 и графический анализ соответствия значений (рис. 4) свидетельствуют о неадекватности модели при доверительной вероятности менее 90%.

Квадратичная модель (рис. 5) мощности P , Вт для натуральных значений факторов запишется:

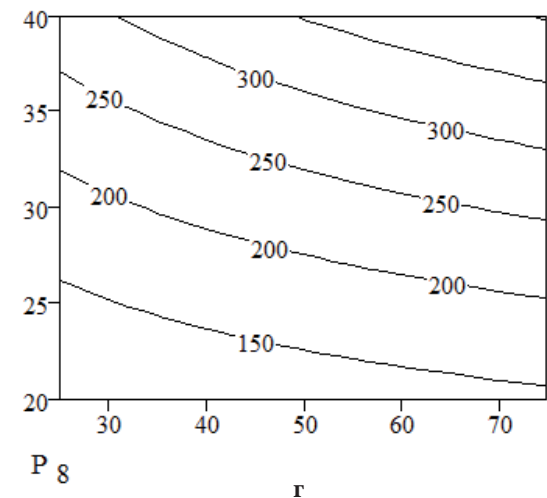
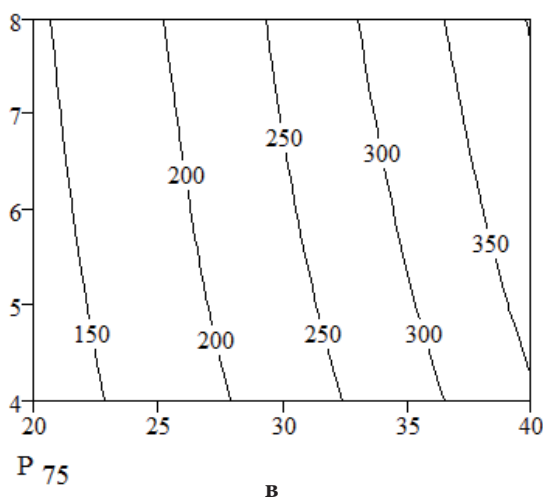
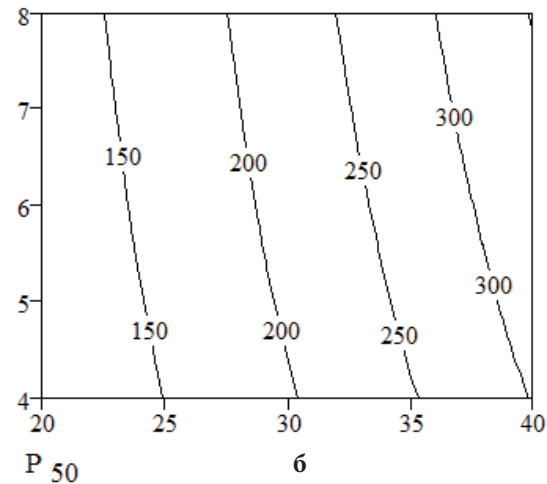
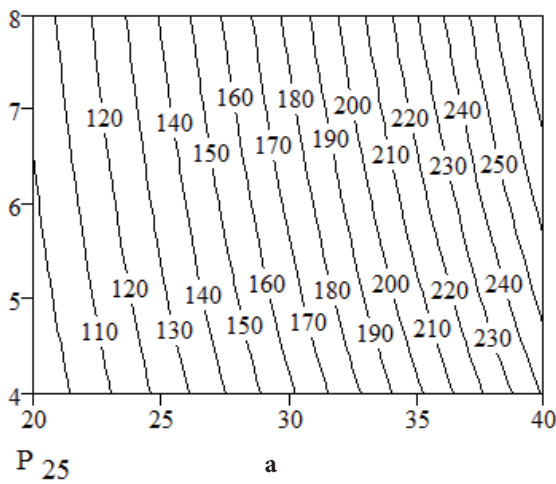


Рис. 7 – Результаты моделирования влияния натуральных значений факторов частоты вращения n , 20–40 мин⁻¹, и количества лопастей Z , 4–8 шт., на затрачиваемую мощность P , Вт: а – при степени заполнения ёмкости $\epsilon = 25\%$; б – при $\epsilon = 50\%$; в – при $\epsilon = 75\%$; г – влияние степени заполнения ёмкости ϵ , 25–75%, и частоты вращения n , 20–40 мин⁻¹, при количестве лопастей $Z = 8$ шт.

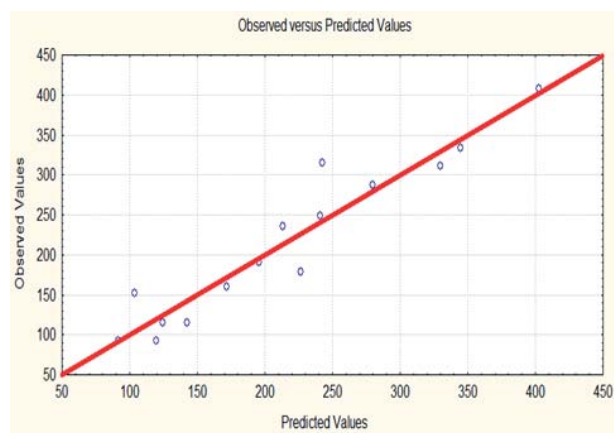


Рис. 8 – Результаты проверки сходимости расчётных и экспериментальных значений мощности на нормальной бумаге

$$P = -118,125 - 6,6562 \cdot \varepsilon + 5,6765 \cdot n + 66,4175 \cdot Z + 0,05088 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon - 0,049 \cdot n \cdot n - 5,425 \cdot Z \cdot Z + 0,1104 \cdot \varepsilon \cdot n - 0,0605 \cdot \varepsilon \cdot Z + 0,32625 \cdot n \cdot Z.$$

Коэффициент корреляции $R=0,97102$ и F-тест = $0,91393$ и графический анализ соответствия значений (рис. 6) свидетельствуют об адекватности модели. Доверительная вероятность более 90% говорит о достаточно хорошей адекватности модели. Числовые значения коэффициентов перед факторами выделяют влияние числа лопастей. Согласно модели (рис. 7) при количестве лопастей $Z=6$ шт. имеется выраженный максимум мощности. Однако указанный экстремум физически ничем не обоснован и может являться как ошибкой опыта, так и недостатком полиномиальной модели 2-го порядка, вынуждающей получение экстремума [8].

Некоторые авторы рекомендуют использовать степенную зависимость мощности [9, 10].

Степенная модель затрачиваемой мощности P , Вт на основе полученных данных (рис. 7) выразится в виде выражения:

$$P = 21,74529 + (0,570228 \cdot \varepsilon^{0,353387}) \cdot (0,236583 \cdot n^{1,653896}) \cdot (0,839224 \cdot Z^{0,237452}). \quad (2)$$

Коэффициент корреляции $R=0,95185$ и F-тест = $0,90056094$ и графический анализ соответствия значений (рис. 8) свидетельствуют об адекватности модели с 90-процентной доверительной вероятностью. Числовые значения коэффициентов показателей степени подтверждают ранее отмеченные тенденции влияния факторов на затрачиваемую мощность.

Характер изменения мощности остался сопоставим с предыдущими моделями и подтверждает ранее отмеченное влияние факторов на интенсификацию роста мощности при увеличении степени

заполнения и частоты вращения. Однако экстремальность мощности при количестве лопастей $Z=6$ шт. не подтверждается.

Выводы. Проведённое экспериментальное исследование позволило установить выражения, описывающие мощность, затрачиваемую на привод мешалки при смешивании компонентов сыпучей сухой смеси в зависимости от степени заполнения ёмкости, частоты вращения мешалки и количества её лопастей.

Линейная модель неадекватно описывает результаты экспериментов. Квадратичная модель мощности адекватно описывает экспериментальные результаты с доверительной вероятностью 90%. При этом замечена экстремальность мощности при 6 лопастях мешалки.

Степенная функция также адекватно описывает экспериментальные результаты с доверительной вероятностью 90%. При этом данная модель точнее отражает существующие тенденции реального процесса. Экстремальность мощности при 6 лопастях отсутствует. Наибольшее влияние имеет частота вращения мешалки (показатель степени $-1,65$), несколько меньшие значения показателя у степени заполнения ёмкости ($+0,35$) и количества её лопастей ($+0,24$). Рост значений всех изучаемых факторов увеличивает затраты мощности.

Литература

1. Сыроватка В.И. Ресурсосбережение при производстве комбикормов в хозяйствах // Техника и оборудование для села. 2011. № 6. С. 22–26.
2. Коновалов В.В. Оптимизация параметров барабанного смесителя / В.В. Коновалов, Н.В. Дмитриев, А.В. Чупшев [и др.] // Нива Поволжья. 2013. № 4 (29). С. 41–47.
3. Мартынова Д.А. Повышение эффективности процесса производства экструдированных кормовых продуктов за счёт изменения конструктивных параметров шнека пресс-экструдера: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2017. 167 с.
4. Хольшев Н.В. Совершенствование технологического процесса приготовления сухих рассыпных кормосмесей шнеколопастным смесителем: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2015. 209 с.
5. Новиков В.В., Борисова М.В. Методологические основы и обоснование структурно-функциональной схемы зерновой смеси // Эксплуатация автотракторной и сельскохозяйственной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы: сб. науч. трудов. Пенза, 2017. С. 82–88.
6. Борисова М.В., Новиков В.В., Титов А.Ю. Рациональное деформирование лопастей смесителя и его влияние на динамику процесса // Инновационные достижения науки и техники АПК: сб. науч. трудов. Кинель, 2018. С. 376–379.
7. Пат. 179164 Российская Федерация. Смеситель зерновой смеси / 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.
8. Chupshv A., Konovalov V., Fomina M. Optimization in work modeling of a mixer // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. № 1084–012010.
9. Чупшев А.В., Коновалов В.В., Петрова С.С. Оптимизация параметров смесителя по минимуму энергоёмкости перемешивания // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2009. № 3. С. 72–76.
10. Фомина М.В. Моделирование мощности вертикального лопастного смесителя на основе статистических выражений / М.В. Фомина, В.В. Коновалов, А.В. Чупшев [и др.] // Инновационная техника и технология. 2016. № 3 (8). С. 50–56.