

Влияние частоты вращения мешалки и количества её лопастей на качество приготавливаемой смеси тихоходным смесителем

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

Рост развития сельского хозяйства определяется не только увеличением объёмов продукции растениеводства, но и эффективным использованием произведённой продукции, позволяющим обеспечить население страны отечественными продуктами

животноводства. Для этого корма должны составлять полнорационные смеси, что невозможно получить без применения смесителей. Учитывая, что порядка 45% производимого в России фуражного зерна должно использоваться для производства комбикормов на животноводческих предприятиях, в основе которых покупные БВД и дерти собственного фуражного зерна, то разработка и использование отечественных смесителей является актуальной задачей [1, 2].

Одним из эффективных типов смесителей для приготовления сухих сыпучих смесей являются лопастные конструкции [3–5]. Среди них наиболее распространены горизонтальные смесители с рабочим органом в виде разнообразных лопастей, установленных на вращающемся валу. Они способны с невысокой энергоёмкостью за достаточно короткое время работы приготовить порцию качественной смеси [6–8].

Материал и методы исследования. На основании обзора литературы и анализа технологического процесса смешивания сыпучих смесей в Самарском ГАУ разработана конструкция смесительного агрегата сыпучих материалов [9, 10].

Методика исследования соответствовала СТО АИСТ 19.2-2008 и предусматривала экспериментальное определение числовых значений неравномерности смешивания. Повторность проведения замеров трёхкратная. При определении качества смеси контрольным компонентом были зёрна ячменя с долей 1% от массы смеси. Количество взятых проб – 15 шт. с массой пробы 100 г. Основным наполнителем смеси являлись дерти: пшеничная, ячменная и кукурузная. Длительность смешивания компонентов смеси была 6 мин. В качестве критерия качества приготовленной смеси использовался показатель неравномерность смеси v , как коэффициент вариации содержания контрольного компонента в пробах [5]. Обработка результатов исследования с целью получения регрессионных моделей осуществлялась компьютерной программой Statistica 5.5.

Результаты исследования. В результате проведения экспериментов по изучению неравномерности приготавливаемой смеси в соответствии с планом эксперимента по реализации дробной реплики по плану Бокса–Бенкина для трёх факторов (табл.) установлено влияние на качество смеси степени заполнения ёмкости бункера ϵ (%), частоты вращения мешалки смесителя n (мин⁻¹) и количества её лопастей Z (шт.).

Для анализа полученных результатов установлено парная корреляция факторов (рис. 1). Сравнивая угол размещения прямых (правый столбик) влияния факторов на неравномерность смеси, видим, что рост степени заполнения ϵ ёмкости 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.

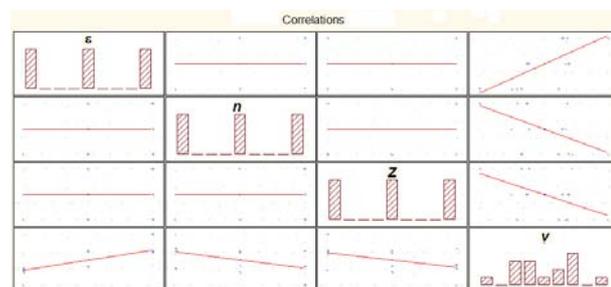


Рис. 1 – График корреляции факторов между собой и неравномерностью смеси v

Более точное влияние факторов на результат (неравномерность смеси v , %) показывает линейная модель для кодированных значений независимых факторов:

$$v = 25,85091 + 3,05 \cdot X_1 - 2,73182 \cdot X_2 - 2,77636 \cdot X_3 \quad (1)$$

где X_1 – кодированное значение степени заполнения ϵ ёмкости (таблица);
 X_2 – кодированное значение частоты вращения n ;
 X_3 – кодированное значение количества лопастей Z .

Множественный коэффициент корреляции составляет $R = 0,97608406$, доверительная вероятность результата по F-тест = 0,929109. Проверка сходимости расчётных и экспериментальных значений на нормальной бумаге для неравномерности смеси

Результаты реализации плана Бокса–Бенкина для трёх факторов по определению неравномерности смеси

№	X_1	X_2	X_3	ϵ , %	n , мин ⁻¹	Z , шт.	v , %
1	1	0	0	75	30	6	23,8
2	0	0	0	50	30	6	17,7
3	-1	0	0	25	30	6	22,7
4	0	-1	0	50	20	6	28,9
5	0	1	0	50	40	6	23,6
6	1	1	1	75	40	8	28,1
7	-1	1	1	25	40	8	28,3
8	-1	-1	1	25	20	8	33,2
9	1	-1	1	75	20	8	22,2
10	0	0	1	50	30	8	27,2
11	0	0	-1	50	30	4	27,7
12	1	1	-1	75	40	4	25,5
13	1	0	-1	75	20	4	21,6
14	-1	1	-1	25	40	4	28,4
15	-1	0	-1	25	20	4	23,4

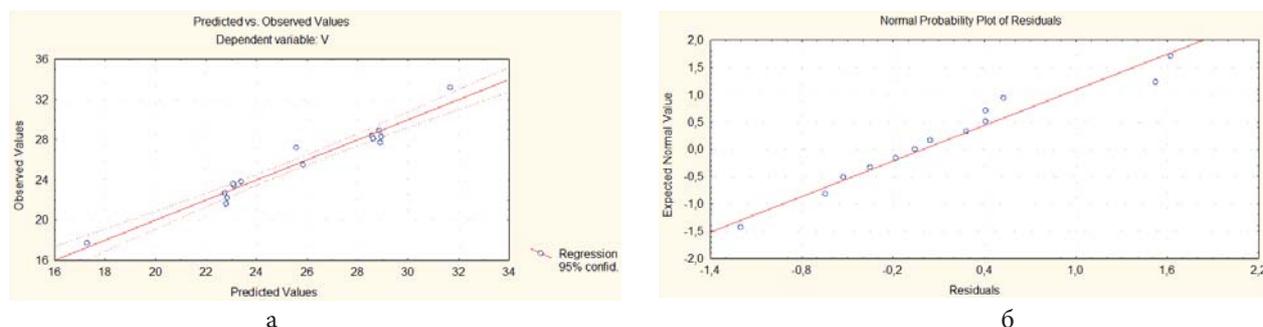


Рис. 2 – Результаты проверки сходимости расчётных и экспериментальных значений на нормальной бумаге: а – распределение значений неравномерности; б – распределение неучтённых отклонений

(рис. 2а) и неучтённых отклонений неравномерности смеси (рис. 2б) показывает хорошую сходимость модели и данных эксперимента. Таким образом, указанная линейная модель на исследуемом интервале изменения факторов адекватно описывает результаты замеров.

Наибольшее значение модуля коэффициентов формулы 1 имеет фактор X_1 – степень заполнения ёмкости, равный 3,05, а поэтому он наиболее значим. Несколько меньшие значения у других факторов X_2 и X_3 – 2,73182 и 2,77636 соответственно. Влияние количества лопастей несколько выше, но не существенно. Знак «+» перед коэффициентом X_1 указывает, что рост степени заполнения повышает неравномерность смеси (по сути ухудшая качество смеси). Знак «-» перед X_2 и X_3 показывает обратную тенденцию – улучшение качества смеси.

Влияние натуральных значений факторов на неравномерность смеси показано на рисунке 3:

$$v = 33,57667 + 0,122 \cdot X_1 - 0,25 \cdot X_2 - 1,115 \cdot X_3. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,99510729$, F-тест = 0,929459 и графический анализ соответствия значений (рис. 4) свидетельствуют об адекватности модели с доверительной вероятностью 92%.

Однако известно, что при значениях равномерности смеси $V_p = 90\%$, соответствующих зоотехни-

ческим требованиям (т.е. $v = 100 - V_p = 100 - 90 = 10\%$), указанные тенденции затухают, уменьшая свою интенсивность [4, 11].

Квадратичная модель (рис. 5) неравномерности смеси v (%) в натуральном виде запишется:

$$v = 37,8 + 0,247889 \cdot \varepsilon - 0,50917 \cdot n - 2,28583 \cdot Z - 0,00129 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon + 0,004444 \cdot n \cdot n + 0,098611 \cdot Z \cdot Z - (7,8E^{-15}) \cdot \varepsilon \cdot n + 0,0005 \cdot \varepsilon \cdot Z - 0,00125 \cdot n \cdot Z. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,999981$ и F-тест = 0,999945 и графический анализ соответствия значений (рис. 6) свидетельствуют об адекватности модели. Доверительная вероятность более 0,99 говорит о лучшей адекватности модели по сравнению с линейной версией. Низкие числовые значения коэффициентов перед $(\varepsilon \cdot n)$ и $(\varepsilon \cdot Z)$ позволяют упростить выражение.

В квадратичной модели (3) подтверждаются сокращения прироста неравномерности по мере уменьшения числовых значений. В силу особенности уравнения полинома второй степени (неизбежность возникновения второй ветки параболы, нарушающей физическую логику процесса смешивания), это накладывает ограничение на интерполяцию выявленных зависимостей на со-

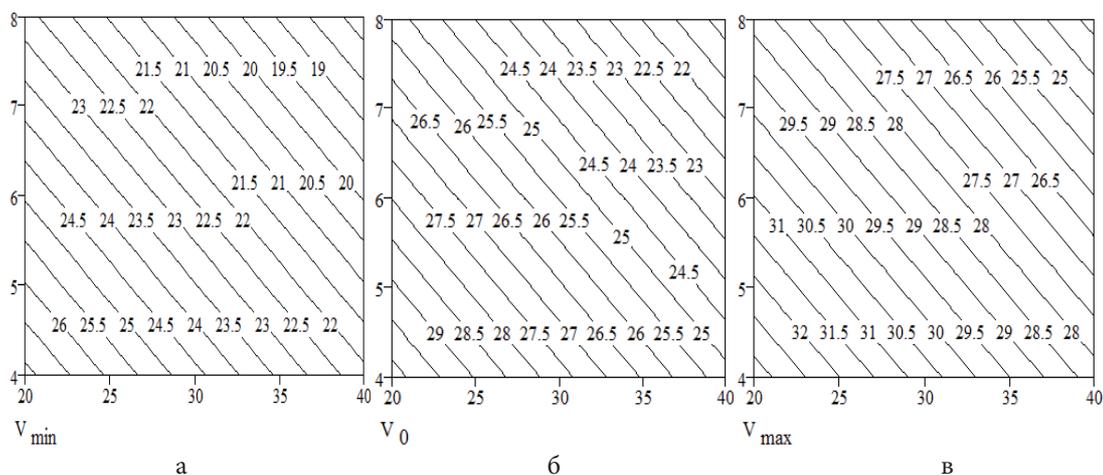


Рис. 3 – Результаты моделирования влияния натуральных значений факторов частоты вращения n , мин^{-1} , и количества лопастей Z , шт., на неравномерность смеси v , %: а – при степени заполнения ёмкости $\varepsilon = 25\%$; б – при $\varepsilon = 50\%$; в – при $\varepsilon = 75\%$.

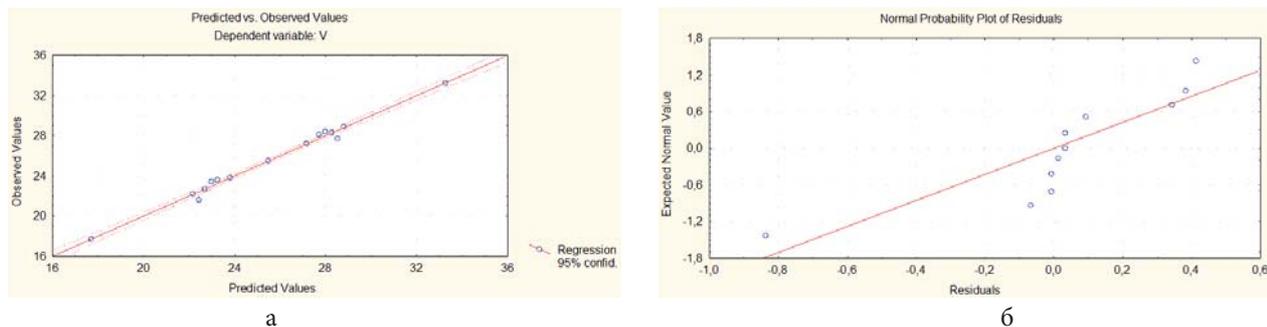


Рис. 4 – Результаты проверки сходимости расчётных и экспериментальных значений на нормальной бумаге: а – распределение значений неравномерности; б – распределение неучтённых отклонений

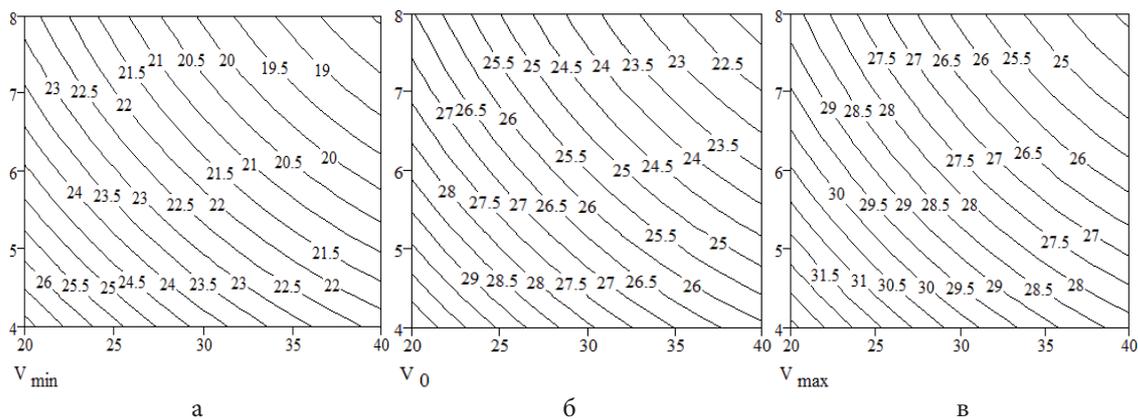


Рис. 5 – Результаты моделирования влияния натуральных значений факторов частоты вращения n , мин^{-1} , и количества лопастей Z , шт., на неравномерность смеси v , %: а – при степени заполнения ёмкости $\epsilon=25\%$; б – при $\epsilon=50\%$; в – при $\epsilon=75\%$

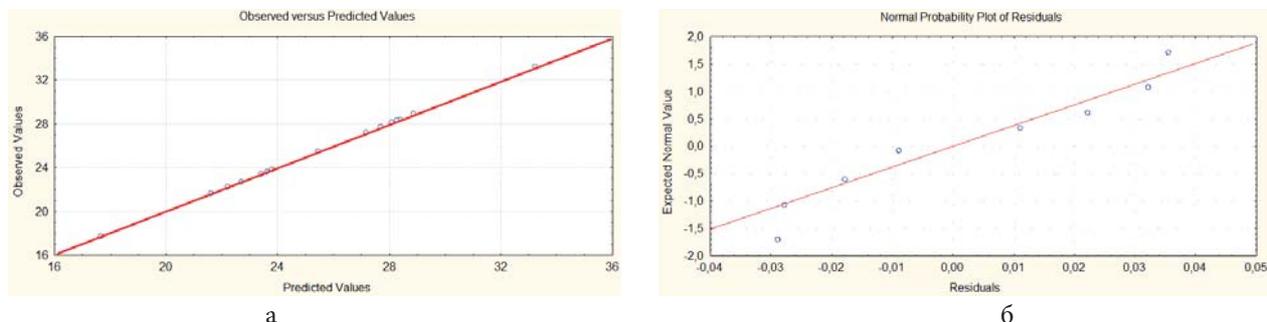


Рис. 6 – Результаты проверки сходимости расчётных и экспериментальных значений на нормальной бумаге: а – распределение значений неравномерности; б – распределение неучтённых отклонений

седние участки значений независимых факторов. Указанный недостаток устраняется при применении гиперболических (как разновидность степенных) или показательных функций [11–13].

Степенная модель неравномерности смеси v (%) на основе полученных данных (рис. 7) выразится в виде:

$$v = 1922,13 + 105,3085 \cdot \epsilon^{0,0446} + 418,1623 \cdot n^{-0,01834} + 1440,902 \cdot Z^{-0,0045}$$

Коэффициент корреляции $R=0,999946$ и F -тест=0,999766 и графический анализ соответствия значений (рис. 8) свидетельствуют об адекватности модели. Доверительная вероятность более 0,99 говорит о хорошей адекватности модели. Числовые значения коэффициентов степени под-

тверждают ранее отмеченные тенденции влияния факторов.

Выводы. Проведённое экспериментальное исследование позволило установить выражения, описывающие неравномерность смешивания в зависимости от степени заполнения ёмкости, частоты вращения мешалки и количества её лопастей.

Наиболее простой является линейная модель, адекватно описывающая экспериментальные результаты с доверительной вероятностью 92%. Наибольшее влияние имеет степень заполнения ёмкости (+3,05), несколько меньшие значения у частоты вращения мешалки (-2,73182) и количества её лопастей (-2,77636). Рост степени заполнения ёмкости повышает неравномерность смеси (ухудшая качество смеси), а увеличение других факторов

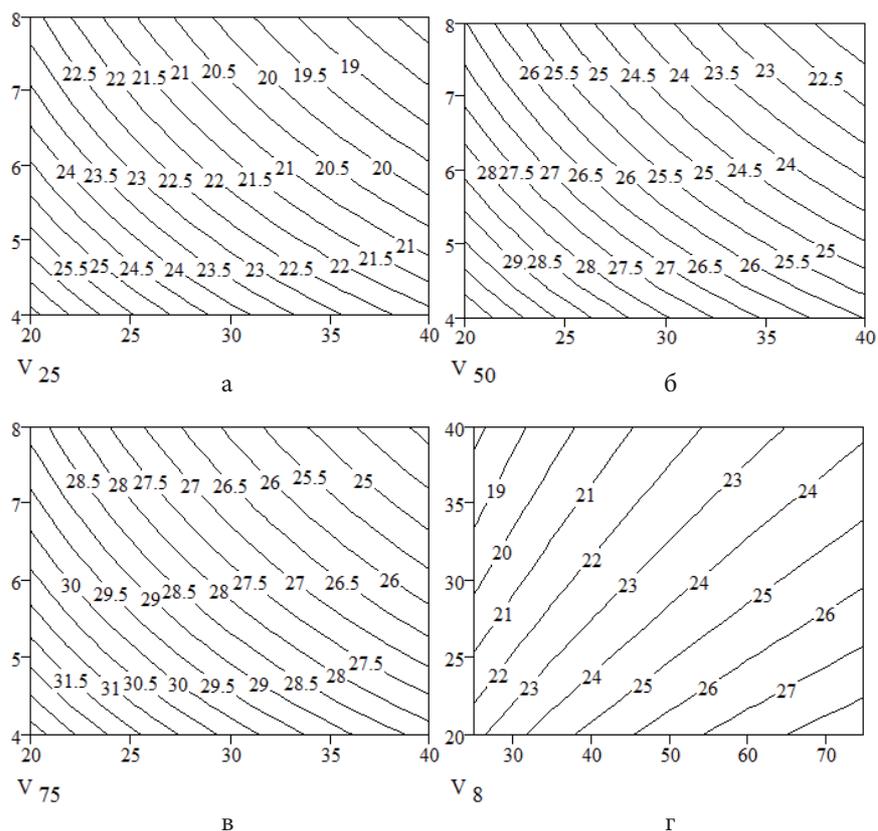


Рис. 7 – Результаты моделирования влияния натуральных значений факторов частоты вращения n , мин^{-1} , и количества лопастей Z , шт., на неравномерность смеси v , %:
 а – при степени заполнения ёмкости $\epsilon = 25\%$; б – при $\epsilon = 50\%$; в – при $\epsilon = 75\%$; г – степени заполнения емкости ϵ , % и частоты вращения n , мин^{-1} , при $Z = 8$ шт.

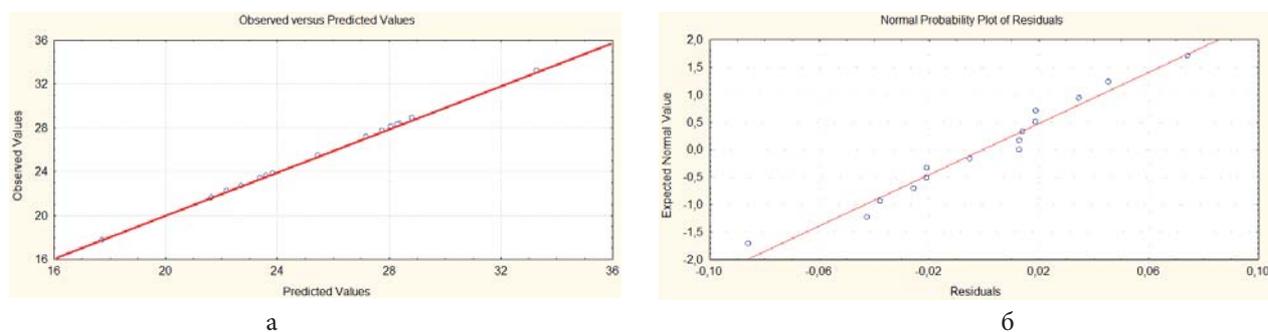


Рис. 8 – Результаты проверки сходимости расчётных и экспериментальных значений на нормальной бумаге:
 а – распределение значений неравномерности; б – распределение неучтённых отклонений

показывает обратную тенденцию – улучшение качества смеси.

Квадратичная модель неравномерности смеси адекватно описывает экспериментальные результаты с доверительной вероятностью 99%. Степенная функция адекватно описывает экспериментальные результаты с доверительной вероятностью 99%, при этом данная модель точнее отражает существующие тенденции реального процесса. На исследованных участках изменения независимых факторов рациональны: значения степени заполнения емкости – 25%, частота вращения мешалки – 40 мин^{-1} , количество лопастей – 8 шт.

При доле контрольного (меньшего) компонента 1% зоотехнические требования на качество смеси

не выполняются. Вследствие этого приготовление смеси на основе премикса с долей 1–2% не допускается. Учитывая долю БВД в 10–20% от состава комбикормовой смеси, требуются дополнительные исследования для установления зоны работоспособности смесителя в зависимости от доли контрольного компонента.

Литература

1. Сыроватка В.И. Ресурсосбережение при производстве комбикормов в хозяйствах // Техника и оборудование для села. 2011. № 6. С. 22–26.
2. Сыроватка В.И., Обухова Н.В., Комарчук А.С. Новые технические решения приготовления комбикормов в хозяйствах // Кормопроизводство. 2010. № 7. С. 42–45.
3. 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.

4. Коновалов В.В. Аналитические аспекты гравитационного смешивания барабанных устройств / В.В. Коновалов, Н.В. Дмитриев, В.П. Терюшков [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 2. С. 40–46.
5. Хольшев Н.В. Совершенствование технологического процесса приготовления сухих рассыпных кормосмесей шнеколопастным смесителем: дис. ... канд. техн. наук. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2015. 209 с.
6. Chupshev, A. Optimization in work modeling of a mixer / A. Chupshev, V. Konovalov, M. Fomina // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. № 1084–012010.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Коновалов В.В. Моделирование качества смешивания сыпучих материалов барабанным смесителем / В.В. Коновалов, Н.В. Дмитриев, А.А. Курочкин [и др.] // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2013. Т. 1. № 9 (13). С. 77–84.
12. Коновалов В.В. Аналитическое обоснование длительности цикла работы смесителя периодического действия / В.В. Коновалов, М.В. Фомина, В.П. Терюшков [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 10–15.
13. Коновалов В.В., Чупшев А.В., Фомина М.В. Моделирование изменения качества смеси лопастного смесителя на основе технологических параметров // Инновационная техника и технология. 2016. № 3 (8). С. 57–66.