

Результаты экспериментальных исследований процесса смешивания в горизонтальном ленточном смесителе

Results of experimental studies of mixing process in a horizontal ribbon mixer

П. А. САВИНЫХ, д-р техн. наук
Н. В. ТУРУБАНОВ, канд. техн. наук
Д. А. ЗЫРЯНОВ, инж.

Зональный научно-исследовательский институт
сельского хозяйства Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого, Киров, Россия,
peter.savinyh@mail.ru

P. A. SAVINYKH, DSc in Engineering
N. V. TURUBANOV, PhD in Engineering
D. A. ZYRYANOV, Engineer

N. V. Rudnitskiy Zonal Research Institute
of Agriculture of the North-East,
Kirov, Russia,
peter.savinyh@mail.ru

От качества подготовки кормов к скармливанию во многом зависят показатели работы животноводческих ферм и комплексов. Доказано, что эффективность кормления повышается при использовании в рационе кормосмесей, позволяющих повысить продуктивность животных, сократить расходы корма на единицу продукции и сроки откорма. Несмотря на широкое применение различных типов смесителей, их рабочий процесс изучен недостаточно, поэтому исследование влияния конструктивно-технологических параметров смесителей на качественные характеристики смеси представляет собой актуальную задачу. Цель исследования — совершенствование технологического процесса приготовления кормовых смесей в горизонтальном ленточном смесителе за счет повышения качества смешивания и снижения энергоемкости рабочего процесса. В лаборатории механизации животноводства Зонального научно-исследовательского института сельского хозяйства Северо-Востока проведены экспериментальные исследования ленточного горизонтального смесителя. При этом использована смесь, состоящая из основы (80 % ячменя и 20 % ржи) и контрольного компонента (гороха). Реализация многофакторного эксперимента позволяет получить приближенные математические модели процесса, которые увязывают воедино все учтенные факторы. Экспериментальные исследования позволяют определить численные значения коэффициентов уравнений регрессии, по величине которых можно оценить степень влияния соответствующих факторов. При испытаниях реализована матрица плана Бокса—Бенкина. По результатам исследований, максимальное значение коэффициента однородности готового продукта составляет 86,1 %, что соответствует зоотехническим требованиям для кормления крупного рогатого скота и птицы, и достигается при наличии в смеси 620 кг основы и 146 кг контрольного компонента. При этом время смешивания составляет 4 мин, а пропускная способность смесителя 5,75 т/ч при удельных энергозатратах 1,55 киловатт-часов на тонну.

Ключевые слова: смеситель; исследование процесса смешивания; комбикорма; однородность готового продукта.

The performance of livestock farms and complexes largely depends on the quality of feed preparation for feeding. It is proved that feeding efficiency is increased with the use of feed mixtures in the diet, which allows to increase animal performance, to reduce feeding period and feed consumption per production unit. Despite of the wide use of different types of mixers, their working process is understudied, and therefore the study of influence of design and technological parameters of mixers on the quality characteristics of mixture is the crucial task. The aim of the study is the improvement of technological process of feed mixtures preparation in a horizontal ribbon mixer by improving quality of mixing and reducing energy intensity of working process. Experimental studies of a horizontal ribbon mixer were carried out in the laboratory of mechanization of animal husbandry at the Zonal Research Institute of Agriculture of the North-East. For the studies, the mixture consisting of a basis (80 % of barley and 20 % of rye) and a control component (pea) was used. The implementation of multifactorial experiment allows to obtain approximate mathematical models of the process, that link together all the factors taken into account. Experimental studies allow to determine the numerical values of coefficients of regression equations, by which it is possible to assess the degree of influence of relevant factors. During the tests, Box-Behnken design matrix was implemented. According to the results, the maximum value of the uniformity coefficient of finished product is 86,1 %, which meets the zootechnical requirements for feeding of cattle and poultry, and is achieved in the presence of 620 kg of basis and 146 kg of control component in the mixture. The mixing time is 4 minutes, and the throughput capacity of mixer is 5,75 t/h, when the specific energy consumption is 1,55 kilowatt-hours per ton.

Keywords: mixer; study of mixing process; mixed feed; uniformity of finished product.

Введение

В настоящее время комбикормовая промышленность развивается по двум направлениям: 1) наращивание мощностей крупных комбикормовых предприятий; 2) разработка и совершенствование малогабаритных установок для приготовления комбикормов в условиях хозяйств из местного сырья с использованием покупных добавок [1]. Второе направление наиболее актуально и перспективно. При этом лучше сохраняются питательные свойства местного фуражного сырья и повышается качество производимых комбикормов, сокращаются объемы перевалочных внутрискладских операций, а также продолжительность хранения готовой продукции.

Для реализации преимуществ приготовления комбикормов в условиях хозяйств необходимы надежные, простые в эксплуатации и сравнительно недорогие

размольно-дозировочно-смесительные агрегаты и установки, которые позволяют не только производить концентрированные смеси из местного сырья и покупных добавок, но и обогащать комбикорма витаминами и добавками непосредственно перед скармливанием.

Анализ смешивающих устройств, наиболее распространенных в России, показал, что наличие на рынке огромного количества этих агрегатов не позволяет отдать предпочтение одному из них. Все они имеют свои достоинства и недостатки. В связи с этим разработка смесителя компонентов для производства комбикормов с низкой энергоемкостью процесса и высоким качеством получаемой продукции — важная научно-техническая задача.

Цель исследования

Цель исследования — совершенствование технологического процесса приготовления кормовых смесей в

горизонтальном ленточном смесителе за счет повышения качества смешивания и снижения энергоемкости рабочего процесса.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проведены с использованием компьютера, контрольно-измерительных устройств и приборов по ГОСТ 15.101—98 [2].

В НИИСХе Северо-Востока разработан горизонтальный ленточный смеситель (рис. 1, а). Он состоит из бункера с комбинированным шнеком внутри. Шнек представляет собой вал, на котором установлены ленточные шнеки: внешний диаметром D , средний диаметром $3/4D$ и внутренний диаметром $2/5D$. Шаг ленточных шнеков также различается и выбран с учетом одинакового перемещения объема материала каждым шнеком в своем направлении (рис. 1, б) [3].

Способ приготовления сбалансированных комбикормов защищен патентом РФ № 2563689, а конструктивно-технологическая схема горизонтального ленточного смесителя — патентом РФ № 2488434 [4, 5].

Для исследования качества смешивания компонентов комбикорма и оценки энергоемкости рабочего процесса разработана лабораторная установка (рис. 2), состоящая из смесителя, решетного сепаратора, норий, накопительных бункеров и шнеков.

Установка работает следующим образом. Основной компонент (зерно) из бункера 5 и контрольный компонент (горох) из бункера 6 поступают по шнекам 7 и 8 соответственно в горизонтальный ленточный смеситель 1, где происходит смешивание материала. Затем проводится отбор проб в 27 точках по всему объему смесителя (рис. 3). После отбора проб материал по шнеку 9 поступает на решетный сепаратор 2 и разделяется на две фракции — основной и контрольный компоненты, которые по нориям 4 и 3 поступают в накопительные бункеры 5 и 6 соответственно. Лабораторная установка позволяет изменять количество основного материала и контрольного компонента при каждом опыте, а также разделять смесь на фракции для проведения дальнейших исследований.

На рис. 3 представлена схема отбора проб в горизонтальном ленточном смесителе. Отбор проб проводился по ГОСТ Р ИСО 6497—2011 [6], согласно которому для нештучной продукции количество отбираемых наугад точечных проб при массе партии до 2,5 т должно состав-

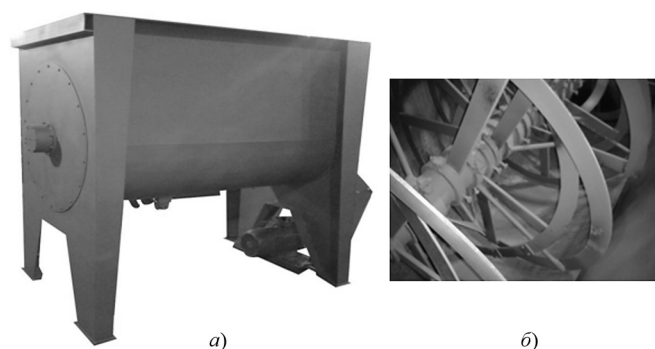


Рис. 1. Общий вид горизонтального ленточного смесителя (а) и камера смешивания (б)

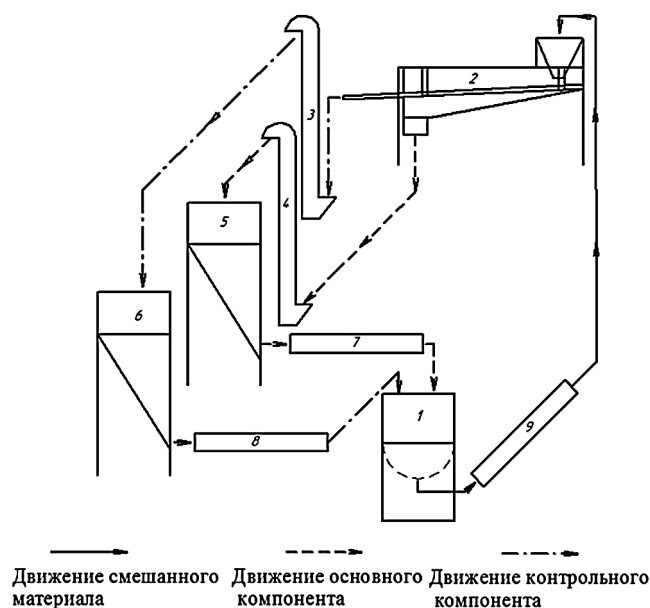


Рис. 2. Схема лабораторной установки

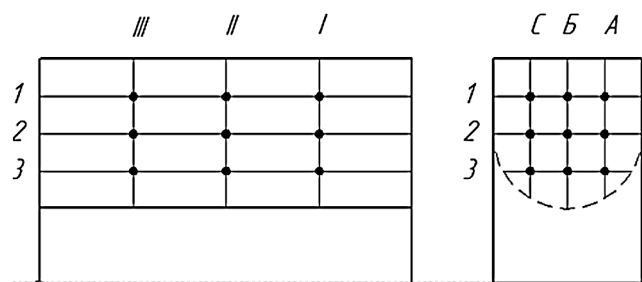


Рис. 3. Схема отбора проб в смесителе

лять не менее 7. В рассматриваемом случае для изучения процесса смешивания количество точек отбора проб равно 27. Отбор проб в различных точках смесителя позволяет оценить равномерность распределения ключевого компонента по всему объему смеси и эффективность работы каждого ленточного шнека. Также появляется возможность выявить застойные зоны в готовом продукте и принять меры для их устранения.

При проведении исследований в качестве основы использована смесь, состоящая из 80 % ячменя и 20 % ржи, с удельной плотностью $0,742 \text{ т/м}^3$, в качестве контрольного компонента — горох с удельной плотностью $0,812 \text{ т/м}^3$.

Экспериментально установлено, что если какой-то компонент распределен в смеси равномерно, то и другие компоненты распределены равномерно. О гомогенности многокомпонентной смеси можно судить по равномерности распределения в ней одного-двух ключевых компонентов [7].

Эффективность смешивания определяют на основе статистических характеристик смеси. Такой характеристикой служит коэффициент v однородности вариации распределения ключевого компонента в смеси, физический смысл которого заключается в том, что он измеряет среднее квадратическое отклонение доли кон-

трольного компонента в единице среднего значения случайной величины [7]:

$$v = \left(1 - \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} / \bar{x} \right) \cdot 100 \%,$$

где x_i — текущее значение наблюдаемой величины; $\bar{x}$ — среднее арифметическое значение наблюдаемой величины; n — число проб.

Результаты и их обсуждение

Для установления оптимальных конструкционных параметров смесителя после реализации однофакторных экспериментов проведены исследования с использованием методики планирования многофакторного эксперимента. В качестве исследуемых факторов по результатам однофакторных экспериментов выбраны: x_1 — количество основного компонента, кг; x_2 — количество контрольного компонента, кг; x_3 — время смешивания, мин. В качестве критериев оптимизации выбраны показатели: y_1 — коэффициент однородности смеси v , %; y_2 — затраченная на опыт мощность W , Вт; y_3 — пропускная способность Q , т/ч; y_4 — удельные энергозатраты, кВт · ч/т.

При испытаниях реализована матрица плана Бокса—Бенкина (см. таблицу).

В качестве контрольного компонента выбран горох. Его содержание в комбикормах и кормовых смесях рационов составляет для крупного рогатого скота: коровы и откорм — до 15 %, телята до 6 месяцев — до 6 %, молодой — до 10–15 %, быки-производители — до 5 %; для свиней: взрослые — до 15–20 %, поросята до 2 месяцев — до 5 %, поросята от 2 до 4 месяцев — до 10 %, при откорме — до 20 %; для овец: взрослые — до 10 %, ягнята — до 5 %; для лошадей — до 10 %; для птицы: взрослые куры, утки, гуси, индейки — до 12 %, молодой — до 10 % (по массе) [8].

На основании этих данных выбраны уровни варьирования контрольного компонента в общем объеме смешиваемого материала от 50 до 150 кг, что для разных видов и групп животных и птицы составляет от 5 до 15 % от общего количества материала, находящегося в бункере смесителя при проведении исследований.

Реализация многофакторного эксперимента позволяет получить приближенные математические модели процесса, которые увязывают воедино все учтенные факторы. Экспериментальные исследования позволяют определить численные значения коэффициентов уравнений регрессии, по величине которых можно оценить степень влияния соответствующих факторов. Результа-

ты экспериментальных исследований обработаны на компьютере, и получены следующие уравнения регрессии (незначимые факторы исключены):

$$y_1 = 79,76 - 11,87x_1 - 2,42x_3 - 8,08x_1^2 + 2,12x_1x_3 - 2,14x_3^2; \quad (1)$$

$$y_2 = 885,22 + 53,71x_1 + 30,79x_2 + 300,88x_3 + 18,91x_1^2 - 6,12x_1x_2 + 21,17x_1x_3 + 13,7x_2x_3; \quad (2)$$

$$y_3 = 5,1 + 0,91x_1 + 0,3x_2 - 1,06x_3 - 0,18x_1x_3 - 0,06x_2x_3 + 0,2125x_3^2; \quad (3)$$

$$y_4 = 1,732 - 0,213x_1 - 0,045x_2 + 0,358x_3 + 0,078x_1^2 - 0,037x_1x_3 + 0,005x_2^2. \quad (4)$$

Проверку значимости уравнений регрессии (1)–(4) проводили по критерию Фишера, который отражает то, насколько хорошо эта модель объясняет общую дисперсию зависимой переменной. Для проверки значимости уравнений (1)–(4) вычисленное значение критерия Фишера сравнивали с табличным на выбранном уровне значимости 0,05. Если рассчитанный критерий Фишера выше табличного, то объясненная дисперсия существенно больше, чем необъясненная, и модель можно считать значимой [9].

Проверку статистической значимости параметров регрессионных уравнений (1)–(4) (коэффициентов регрессии) выполняли по t -критерию Стьюдента. Рассчитанное значение критерия Стьюдента сравнивали с его табличным значением при выбранной доверительной вероятности 0,95. Если вычисленное значение критерия Стьюдента выше табличного, то коэффициент регрессии можно считать значимым с данной доверительной вероятностью. В противном случае есть основания для исключения соответствующей переменной из регрессионной модели [10].

Анализ уравнений регрессии на основании значимости коэффициентов регрессии позволяет сделать вывод о том, что количество контрольного компонента в смеси x_2 незначительно влияет на рассматриваемые критерии оптимизации. На коэффициент однородности смеси v наибольшее влияние оказывает количество основы в смесителе x_1 . На затраченную на опыт мощность W , пропускную способность Q и удельные энергозатраты q наибольшее влияние оказывает время смешивания материала x_3 .

Анализ уравнений регрессии (1)–(4) и двумерных сечений поверхностей отклика (рис. 4) позволяет сделать следующие выводы.

Из рис. 4, а видно, что при уменьшении количества основы смеси x_1 с 900 до 650 кг и времени смешивания x_3 с 8 до 4 мин при содержании контрольного компонента $x_2 = 150$ кг происходит увеличение однородности смеси v с 62 до 86,1 % и снижение пропускной способности смесителя Q с 7,2 до 5,6 т/ч. Максимальное значение коэффициента однородности готового продукта $v = 86,1$ % достигается при количестве основы $x_1 = 620$ кг, контрольного компонента в смеси $x_2 = 146$ кг, времени смешивания $x_3 = 4$ мин, при этом пропускная способность составит $Q = 5,6$ т/ч.

Анализ рис. 4, б показывает, что при уменьшении количества основы в смеси x_1 с 900 до 650 кг и времени смешивания x_3 с 8 до 4 мин при содержании контрольного

Матрица плана Бокса—Бенкина, интервалы и уровни варьирования факторов

Параметры	Факторы		
	Количество основы x_1 , кг	Количество контрольного компонента x_2 , кг	Время смешивания x_3 , мин
Верхний уровень (+)	900	150	8
Основной уровень (0)	750	100	6
Нижний уровень (–)	600	50	4

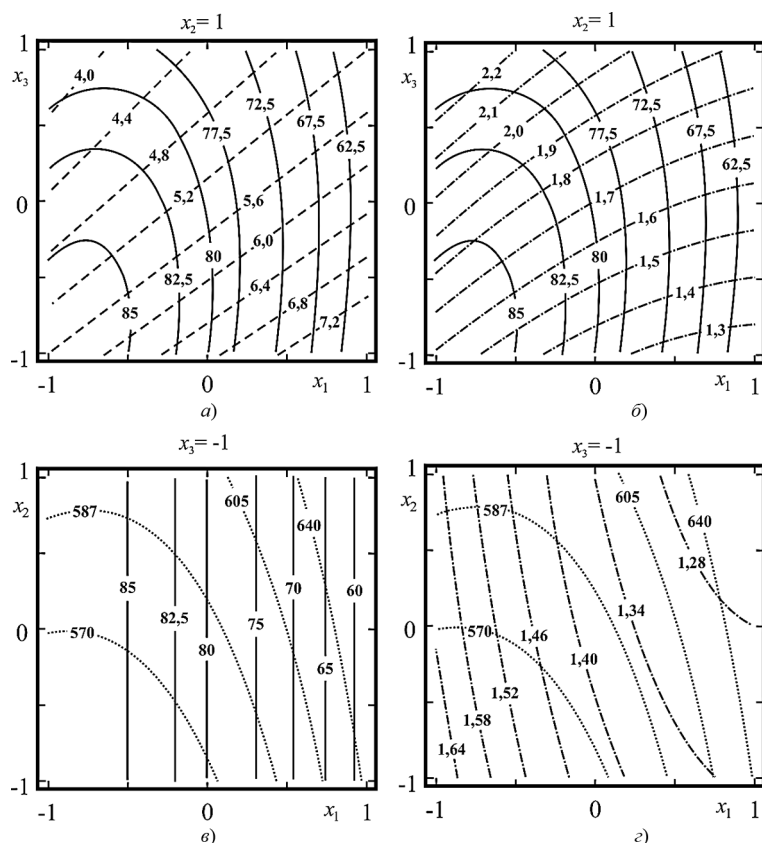


Рис. 4. Двумерные сечения поверхностей отклика, характеризующие влияние массы основы смеси x_1 , массы контрольного компонента x_2 и времени смешивания x_3 на:

a — коэффициент однородности готового продукта v (——— — y_1), пропускную способность смесителя Q (---- — y_3); b — коэффициент однородности готового продукта v_n (——— — y_1), удельные энергозатраты q (-·-·-·- — y_4); c — коэффициент однородности готового продукта v (——— — y_1), затраченную на опыт мощность W (······ — y_3); e — затраченную на опыт мощность W (······ — y_3), удельные энергозатраты q (-·-·-·- — y_4)

ного компонента $x_2 = 150$ кг происходит увеличение однородности смеси v с 62 до 86,1 % и снижение удельных энергозатрат q с 1,9 до 1,6 кВт · ч/т. При максимальном значении коэффициента однородности готового продукта $v = 86,1$ % величина удельных энергозатрат составляет $q = 1,6$ кВт · ч/т.

Анализ рис. 4, *в* показывает, что при уменьшении количества основы в смеси x_1 с 900 до 650 кг и контрольного компонента x_2 со 150 до 50 кг при времени смешивания $x_3 = 4$ мин уменьшается затрачиваемая на опыт мощность W с 640 до 547,5 Вт и повышается однородность смеси v с 60 до 86,1 %.

По рис. 4, з можно сделать вывод о том, что при увеличении массы основы смеси x_1 с 650 до 900 кг при времени смешивания $x_3 = 4$ мин и массе контрольного компонента $x_2 = 50$ кг увеличивается затрачиваемая на опыт мощность W с 547,5 до 640 Вт и снижаются удельные энергозатраты q с 1,64 до 1,24 кВт·ч/т. При увеличении массы контрольного компонента в смеси x_2 с 50 до 150 кг при массе основы 600 кг и времени смешивания $x_3 = 4$ мин снижаются удельные энергозатраты q с 1,64 до 1,58 кВт·ч/т.

Несмотря на то, что при увеличении массы основы смеси происходит увеличение затрачиваемой на опыт мощности, при этом отмечается снижение удельных энергозатрат, поскольку величина изменения пропускной способности смесителя больше величины изменения затрачиваемой на опыт мощности.

По зоотехническим требованиям однородность получаемого корма влажностью 13—15 % должна составлять: для свиней — 85 %; для птицы — 90 %; для крупного рогатого скота — 80 % (с вводом карбамида — 90 %); комбикормов собственного производства — 90—95 % [11]. Таким образом, качество корма, получаемого в горизонтальном ленточном смесителе, соответствует зоотехническим требованиям для кормления крупного рогатого скота и птицы.

Выводы

По результатам исследований, максимальное значение коэффициента однородности готового продукта составляет $\nu = 86,1 \%$, что соответствует зоотехническим требованиям для кормления крупного рогатого скота и птицы, и достигается при наличии в смеси 620 кг основы и 146 кг контрольного компонента. При этом время смешивания составляет 4 мин, а пропускная способность смесителя $Q = 5,75$ т/ч при удельных энергозатратах $q = 1,55$ кВт·ч/т.

Литература и источники

1. **Комбикорма // ООО "ТрейДЮнитэ" [Электронный ресурс]. URL:** <http://www.trade-unite.ru/kombikorm2.php> (дата обращения 08.12.2015).
2. **ГОСТ 15.101—98.** Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ. Минск: Издательство стандартов, 1999. 10 с.
3. **Савиных П. А., Турубанов Н. В., Зырянов Д. А.** Обоснование конструктивно-технологических параметров ленточного смесителя // Вестник ВНИИМЖ. Серия: Механизация, автоматизация и машинные технологии в животноводстве. 2015, № 3 (19). С. 76—80.
4. **Савиных П. А., Турубанов Н. В., Романюк В.** и др. Смеситель. Патент РФ № 2488434, 2013.
5. **Сысуев В. А., Савиных П. А., Турубанов Н. В.** и др. Способ приготовления комбикормов. Патент РФ № 2563689, 2015.
6. **ГОСТ Р ИСО 6497—2011.** Корма для животных. Отбор проб. М.: Стандартинформ, 2012. 18 с.
7. **Методика оценки качества смешения // ООО "Инта-Строй" [Электронный ресурс]. URL:** <http://www.inta.ru/mass-media/news/metodika-otsenki-kachestva-smesheniya/> (дата обращения 01.02.2016).
8. **Общая характеристика бобовых кормов // AgroNationale [Электронный ресурс]. URL:** <http://articles.agronationale.ru/feeding/2223-obschayaharakteristikabobovyhkormov/> (дата обращения 17.03.2016).
9. **Использование** критерия Фишера для проверки значимости регрессионной модели // Факультет пищевых и химических производств АлтГТУ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chem-astu.ru/science/reference/fischer.html> (дата обращения 18.03.2016).
10. **Использование** критерия Стьюдента для проверки значимости параметров регрессионной модели // Факультет пищевых и химических производств АлтГТУ. URL: <http://www.chem-astu.ru/science/reference/student.html> (дата обращения 18.03.2016).
11. **Мельников С. В.** Механизация и автоматизация животноводческих ферм. М.: Колос, 1978. 560 с.

References

1. Mixed feed. *ООО "ТрейдЮните"*. URL: <http://www.trade-unite.ru/kombikorm2.php> (accessed 08.12.2015).
2. *GOST 15.101—98*. System of product development and launching into manufacture. Procedure of scientific researches and development. Minsk, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999, 10 p.
3. Savinykh P. A., Turubanov N. V., Zyryanov D. A. Substantiation of design and technological parameters of ribbon mixer. *Vestnik VNIIMZh. Seriya: Mekhanizatsiya, avtomatizatsiya i mashinnye tekhnologii v zhivotnovodstve*, 2015, no. 3 (19), pp. 76—80 (in Russ.).
4. Savinykh P. A., Turubanov N. V., Romanyuk V., Kiselev A. S., Chernyat'ev N. A. *Smesitel'* [Mixer]. RF patent no. 2488434, 2013.
5. Sysuev V. A., Savinykh P. A., Turubanov N. V., Chernyat'ev N. A., Kazakov V. A., Saitov V. E. *Sposob prigotovleniya kombikormov* [Method of preparation of mixed feed]. RF patent no. 2563689, 2015.
6. *GOST R ISO 6497—2011*. Animal feed. Sample collection. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 18 p.
7. Methodology for quality assessment of mixing. *ООО "Инта-Строй"*. URL: <http://www.inta.ru/mass-media/news/metodika-otsenki-kachestva-smesheniya/> (accessed 01.02.2016).
8. General characteristics of legume feed products. *AgroNationale*. URL: <http://articles.agronationale.ru/feeding/2223-obschayaharakteristikabobovyhkormov/> (accessed 17.03.2016).
9. Using Fisher's test to verify the significance of regression model. *Fakul'tet pishchevykh i khimicheskikh proizvodstv AltGTU*. URL: <http://www.chem-astu.ru/science/reference/fischer.html/> (accessed 18.03.2016).
10. Using Student's test to verify the significance of regression model parameters. *Fakul'tet pishchevykh i khimicheskikh proizvodstv AltGTU*. URL: <http://www.chem-astu.ru/science/reference/student.html/> (accessed 18.03.2016).
11. Mel'nikov S. V. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm* [Mechanization and automation of livestock farms]. Moscow, Kolos Publ., 1978, 560 p.