



Определение оптимальных технологических параметров горизонтального смесителя рассыпных комбикормов

© 2024. П. А. Савиных, Н. В. Турубанов✉, А. Ю. Исупов

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская федерация

Качество комбикормов для животных и птицы напрямую зависит не только от входящих в него компонентов, но и от применяемого типа смесителя. Горизонтальные смесители в сравнении с вертикальными позволяют за более короткий период времени получать качественные смеси за счет интенсификации процесса движения материала ленточными рабочими органами. Цель исследований – определение оптимальных технологических параметров горизонтального смесителя с камерой смешивания 0,3 м³ с ленточным рабочим органом. Смеситель предназначен для получения комбикормов высокой однородности в технологических линиях, цехах или может использоваться как самостоятельная машина для смешивания рассыпных компонентов. Исследования выполнены путем проведения многофакторного эксперимента. В результате получены математические модели рабочего процесса смесителя, построены двумерные сечения поверхностей отклика. Полученные математические модели позволяют на стадии проектирования смесителей выявить зависимость качественных и энергетических показателей от факторов на рассматриваемых уровнях варьирования. По результатам проведенного многофакторного эксперимента установлено, что наилучшее качество смешивания 94,8 % достигается при загрузке камеры смешивания на 58 %, при частоте вращения вала смесителя 30 мин⁻¹, времени смешивания 6 минут при одновременной подаче контрольного и основного компонентов. При этом пропускная способность составляет 0,78 т/ч, а удельные энергозатраты – 2,04 кВт·ч/т.

Ключевые слова: смешивание, многофакторный эксперимент, ленточный шнек, опыты, производительность смесителя, кормление животных, линия приготовления кормов, качество смешивания

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № FNWE-2022-0002).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: 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>

Поступила: 11.12.2023

Принята к публикации: 21.03.2023

Опубликована онлайн: 24.04.2024

Determination of optimal technological parameters of a horizontal mixer of loose compound feeds

© 2024. Petr A. Savinyh, Nikolaj V. Turubanov✉, Aleksey Ju. Isupov

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

The quality of the compound feeds for animals and poultry directly depends not only on the components included in it but also on the type of mixer used. Horizontal mixers as compared to the vertical ones allow for a shorter period of time to obtain high-quality mixtures due to the intensification of the process of material movement by belt working bodies. The aim of the research is to determine optimal technological parameters of a horizontal mixer with a 0.3 m³ mixing chamber with a belt working body. The mixer is designed to produce mixed compound feeds of high uniformity in production lines, workshops or can be used as an independent machine for mixing loose components. The research was carried through multifactorial experiment. As the result, mathematical models of the mixer working process were obtained, two-dimensional cross sections of the response surfaces were built. The obtained mathematical models make it possible at the design stage to identify the dependence of qualitative and energy indicators on factors at the considered levels of variation. According to the results of the multifactorial experiment, it has been established that the best mixing quality of 94.8 % is achieved when the mixing chamber is loaded by 58 % at a speed of rotation of the mixer shaft of 30 min⁻¹, mixing time of 6 minutes with simultaneous supply of the control and the main components. At the same time, the throughput is 0.78 t/h, and the specific energy consumption is 2.04 kWh/t.

Keywords: mixing, multifactorial experiment, belt auger, experiments, mixer performance, animal feeding, feed preparation line, mixing quality

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. FNWE-2022-0002).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

Conflict of interests: the authors stated that there was no conflict of interests.

For citations: Savinyh P. A., Turubanov N. V., Isupov A. Yu. 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>

Received: 11.12.2023

Accepted for publication: 21.03.2024

Published online: 24.04.2024

На сегодняшний день ни одно сельскохозяйственное предприятие, которое ориентировано на высокоэффективное производство молока, мяса, яиц, не может обойтись без применения комбикормов в кормлении животных и птицы [1, 2]. На основе собственного сырья сельскохозяйственных предприятий можно получать качественные и недорогие по себестоимости комбикорма. Корма, приготовленные непосредственно в хозяйствах, позволяют повысить рентабельность и конкурентоспособность получаемой животноводческой продукции. Использование собственного фуражного зерна позволяет сокращать расходы на сырье, транспортировку и хранение [3]. Наиболее качественные смеси можно получить за счет использования в технологических линиях приготовления кормов горизонтальных смесителей [4]. Такого типа смесители имеют ряд преимуществ перед вертикальными – полная выгрузка готовой смеси, отсутствие зависания и слеживания материала в камере смешивания, при рабочем процессе движутся все частицы, а не только та часть, на которую воздействует шнек [5, 6]. Таким образом, исследование горизонтальных смесителей является актуальной задачей.

Цель исследования – определение оптимальных технологических параметров горизонтального смесителя рассыпных комбикормов.

Научная новизна – получение математических моделей рабочего процесса горизонтального смесителя, позволяющих определить зависимость основных показателей работы от технологических параметров смесителя.

Материал и методы. На производственной базе ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока изготовлен горизонтальный смеситель с рабочим объемом камеры смешивания 0,3 м³ (патент РФ № 2638978 [7]), разработанный в лаборатории механизации животноводства (рис. 1). Смеситель предназначен для получения комбикормов высокой однородности в технологических линиях, цехах, может использоваться как самостоятельная машина для смешивания рассыпных компонентов с удельной плотностью готового

продукта до 0,8 т/м³, применяться в сельскохозяйственных предприятиях, занимающихся разведением крупного рогатого скота молочного и мясного направления продуктивности, с численностью стада до 100 голов.



*Рис. 1. Общий вид смесителя /
Fig. 1. General view of the mixer*

Смеситель работает следующим образом. Компоненты подаются в камеру смешивания, где, подвергаясь воздействию ленточного шнека, перемешиваются. Благодаря конструкции ленточного шнека и расположения выгрузного окна по центру готовая смесь выгружается полностью, и смеситель готов для приготовления смеси по новому рецепту без использования дополнительного ручного труда на очистку [8].

На производственной базе ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока летом 2023 г. проведены экспериментальные исследования по определению зависимости основных показателей работы от технологических факторов. Смешивали два компонента: первый (основной) – измельченная смесь зерна (87,5 %) ячменя и ржи; второй (контрольный) – горох (12,5 %) [8]. Количество контрольного компонента выбрано согласно НТП-АПК 1.10.16.002-03¹. Загрузка основного компонента в смеситель осуществлялась шнековым транспортером. Количество поступившего материала в камеру смешивания взвешивали на весах, на которых находился

¹НТП-АПК 1.10.16.002-03. Нормы технологического проектирования сельскохозяйственных предприятий по производству комбикормов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034655>

смеситель. Контрольный компонент подавался самотеком в смеситель из бункера, расположенного над смесителем. Количество второго компонента взвешивали на весах заранее, которое соответствовало требуемой величине для каждого эксперимента. Частота вращения вала комбинированного шнека смесителя при проведении экспериментальных исследований составляла 30 мин⁻¹.

Основные показатели рабочего процесса смешивания определяли по следующим формулам [8]. Мощность, затрачиваемую на привод шнека смесителя:

$$N_{ш} = N_{эл} \cdot \eta_{ред} \cdot \eta_{ц}, \quad (1)$$

где $N_{эл}$ – мощность, потребляемая электродвигателем, кВт; $\eta_{ред}$ – КПД редуктора; $\eta_{ц}$ – КПД цепной передачи.

Производительность смесителя Q (кг) за 1 час рассчитывали по формуле:

$$Q = \frac{60 \cdot G}{t}, \quad (2)$$

где G – количество смешиваемого материала, кг; t – время рабочего цикла смесителя, мин.

Время рабочего цикла смесителя определяли по выражению:

$$t = t_{заг} + t_{см} + t_{выг}, \quad (3)$$

где $t_{заг}$ – время загрузки компонентов, мин;

$t_{см}$ – время смешивания материала, мин;

$t_{выг}$ – время выгрузки готового материала, мин.

Качество смеси оценивают коэффициентом однородности:

$$v = 100 - \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}}{\bar{x}} \cdot 100, \quad (4)$$

где x_i – количество контрольного компонента в пробе; $\bar{x}$ – среднее значение величины контрольного компонента $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$; n – число проб.

После завершения процесса смешивания при выгрузке готового продукта из смесителя производили отбор проб согласно ГОСТ Р ИСО 6497-2011², который осуществлялся из потока материала пробоотборником, представленным на рисунке 2, а. Каждая проба помещалась в отдельный контейнер. Для отделения контрольного компонента от основного использовали решето (рис. 2, б). После разделения смеси каждую фракцию взвешивали на весах, и по формуле (4) определяли коэффициент однородности v [9, 10].



а / а



б / б

Рис. 2. Общий вид: а – пробоотборник; б – оборудование для определения количества контрольного компонента в пробе /

Fig. 2. General view: а – the sampler; б – the equipment for determining the amount of the control component in the sample

Результаты и их обсуждение. Для определения оптимальных технологических параметров горизонтального смесителя рассыпных комбикормов после проведения однофакторных экспериментов выбраны значимые факторы, уровни их варьирования и состав-

лена матрица плана Бокса-Бенкена [11, 12]. В таблице представлены факторы и уровни их варьирования. В качестве критериев оптимизации приняты: y_1 – коэффициент однородности, %; y_2 – удельные энергозатраты, кВт·ч/т; y_3 – пропускная способность, т/ч.

²ГОСТ Р ИСО 6497-2011. Корма для животных. Отбор проб. М.: Стандартинформ, 2012. 19 с.
URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293790/4293790467.pdf>

Таблица – Уровни варьирования, наименование факторов и их условное обозначение /
Table – Levels of variation, names of factors and their symbols

Уровни варьирования факторов / Levels of variation of factors	Подача контрольного компонента / Supply of the control component	Заполнение смесителя по объему, % / Filling the mixer by volume, %	Время смешивания компонентов, мин / Mixing time of the components, min
	x_1	x_2	x_3
Верхний (+1) / Upper	После загрузки основного компонента / After loading the main component	75,0	10
Средний (0) / Middle	Одновременно с загрузкой основного компонента / Simultaneously with loading the main component	62,5	8
Нижний (-1) / Lower	В начале загрузки основного компонента / At the beginning of loading the main component	50,0	6

По результатам экспериментальных исследований получены математические модели качества смешивания (коэффициента однородности смеси) y_1 (5), удельных энерго-

затрат смесителя y_2 (6) и пропускной способности смесителя y_3 (7). Из уравнений (5), (6) и (7) незначимые факторы и их взаимодействия исключены [13].

$$y_1 = 94,73 - 0,76x_1 - 1,51x_2 - 1,14x_1^2 - 0,70x_1x_2 - 0,89x_1x_3 - 2,20x_2^2; \quad (5)$$

$$y_2 = 2,34 - 0,39x_2 + 0,39x_3 + 0,03x_1^2 + 0,07x_2^2 - 0,08x_2x_3 - 0,03x_3^2; \quad (6)$$

$$y_3 = 0,70 + 0,15x_2 - 0,12x_3 + 0,02x_2^2 - 0,03x_2x_3 + 0,02x_3^2. \quad (7)$$

Статистика R^2 -Squared показывает, что полученная математическая модель (5) на 93,92 % описывает изменение y_1 в зависимости от величины входящих в уравнение факторов. Математическая модель (6) на 99,79 % описывает изменение y_2 , модель (7) на 99,98% описывает изменение y_3 . Таким образом, можно сделать вывод, что все полученные уравнения регрессии достоверно описывают изменение коэффициента однородности смеси, удельных энергозатрат и пропускной способности в зависимости от изменения факторов [14, 15].

Анализ уравнений регрессии (5), (6) и (7) (на основании значимости коэффициентов) позволяет сделать вывод о том, что:

- в выбранном диапазоне варьирования факторов (табл.) наименьшее влияние на качество смешивания y_1 оказывает время смешивания компонентов x_3 , а на удельные энергозатраты y_2 и пропускную способность смесителя y_3 – подача контрольного компонента x_1 . В результате чего они были исключены и получены математические модели (5), (6) и (7);

- влияние факторов x_1 и x_2 не линейно и описывается параболической траекторией и наличием точки максимума. Так наилучшее качество смешивания, согласно рисунку 3, а, – 94,9 % получено при заполнении смесителя

по объему $x_2 = -0,36$ (58 %) и подаче контрольного компонента $x_1 = -0,37$. Однако принять фактор x_1 на этом уровне невозможно в виду ранжирования уровней варьирования фактора x_1 (табл.). Вследствие чего в дальнейшем его следует принять на ближайшем уровне, обеспечивающем наилучшее качество (рис. 3), т. е. $x_1 = 0$ (подача контрольного компонента одновременно с загрузкой основного);

- при изменении фактора x_2 от -1,0 до 1,0 (от 50 до 75 %) возрастает пропускная способность смесителя y_3 с 0,57 до 0,87 т/ч, уменьшаются удельные энергозатраты на смешивание y_2 с 2,8 до 2,0 кВт·ч/т по зависимостям, близким к линейным (рис. 3, б, в) при $x_1 = 0$ и $x_3 = 0$. Это объясняется тем, что увеличение объема смешивания также, как и увеличение времени смешивания требует роста затрачиваемой энергии на процесс. К тому же в рамках выбранного диапазона варьирования факторов x_2 и x_3 эффекты от их воздействия близки друг другу. Например, удельные энергозатраты на смешивание y_2 при изменении x_2 от -1,0 (50 %) до 1,0 (75 %) снижаются с 2,8 до 2,0 кВт·ч/т, а при изменении времени смешивания x_3 от -1,0 (6 мин) до 1,0 (10 мин) увеличиваются с 1,95 до 2,7 кВт·ч/т при $x_1 = 0$ (рис. 3, б).

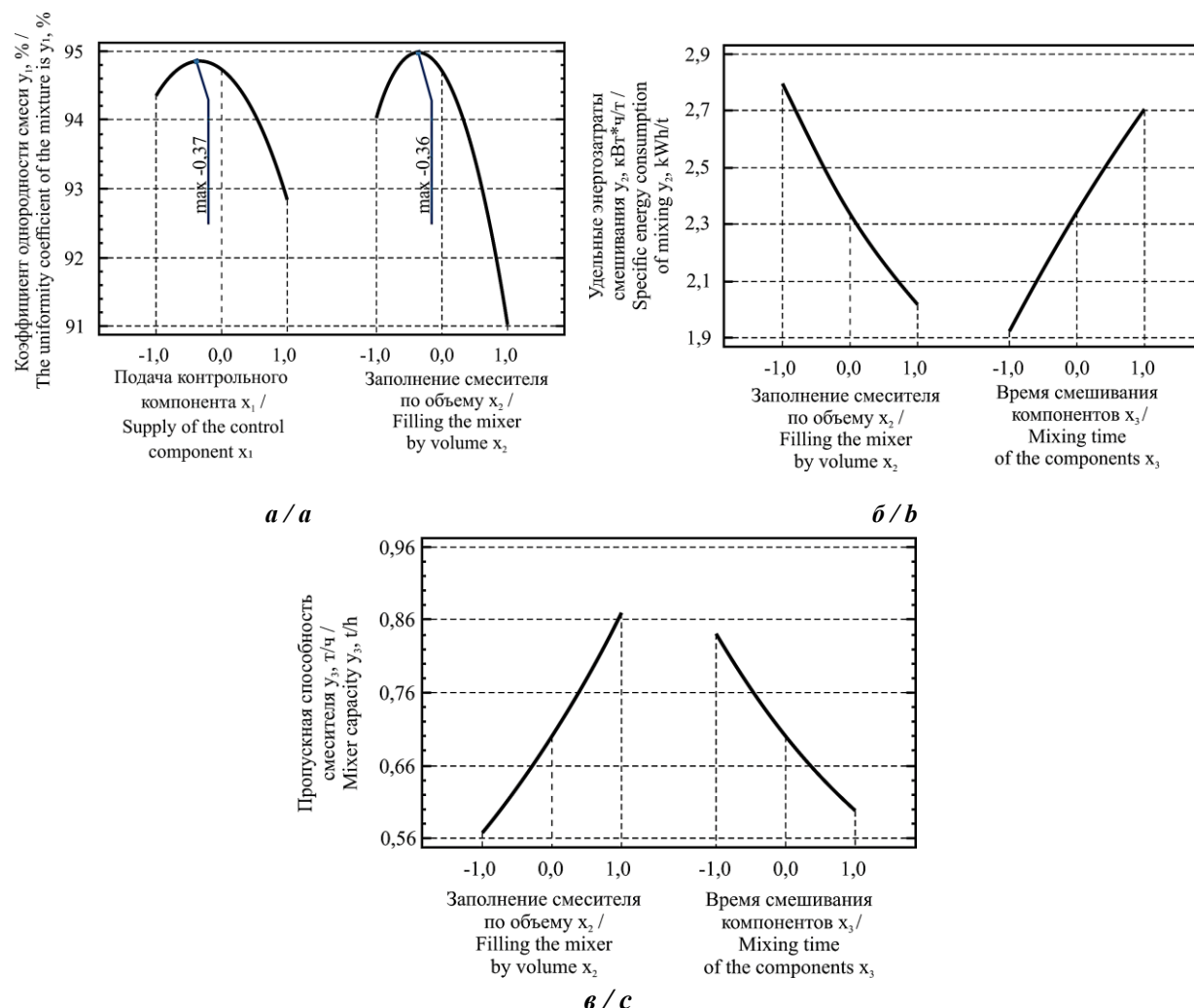


Рис. 3. График влияния изменения факторов на коэффициент однородности смеси (а), удельные энергозатраты (б) и пропускную способность смесителя (в) /

Fig. 3. Graph of the influence of changes in factors on the homogeneity coefficient of the mixture (a), specific energy consumption (b) and the throughput of the mixer (c)

По полученным уравнениям математических моделей (5), (6) и (7) построены двумерные сечения поверхностей отклика (рис. 4) [15, 16, 17], анализ которых показывает, что:

- наилучшее качество смешивания 95,04 % (рис. 4, а), наблюдается в точке $x_1 = -0,24$ и $x_2 = -0,31$ (58,6 %). Но ввиду затруднительности технической реализации фактора x_1 (строгое ранжирование фактора на трех уровнях) наилучшее качество смешивания следует принять равное $y_1 = 94,98$ % в точке $x_1 = 0,0$ (подача контрольного компонента одновременно с загрузкой основного) и $x_2 = -0,34$ (58,25 %);
- наилучшее качество смешивания y_1 (рис. 4, б) наблюдается в точке $x_1 = -0,61$ и $x_3 = 1,0$ (12 мин) и составляет 95,42 %. Однако по причине ранжирования фактора x_1 наибольший интерес представляет однородность смеси, получаемой при $x_1 = 0,0$, где качество

смешивания y_1 изменяется в пределах $94,72 \pm 0,25$ %. В то же время при $x_1 = 1,0$ (подача контрольного компонента после загрузки основного) качество смешивания y_1 уменьшается с 94,22 до 92,45 % одновременно с увеличением времени смешивания x_3 с 7 до 10 минут, а при $x_1 = -1,0$ наблюдается обратный процесс – качество смешивания y_1 возрастает с 93,47 до 95,24 % с увеличением времени смешивания x_3 с 6 до 7 минут;

- удельные энергозатраты y_2 (рис. 4, в) снижаются с 3,24 до 1,68 кВт·ч/т и повышается пропускная способность смесителя y_3 с 0,5 до 1,04 т/ч с увеличением заполнения смесителя по объему x_2 от -1,0 до 1,0 (с 50 до 75 %) и уменьшением времени смешивания x_3 с 1,0 до -1,0 (с 12 до 6 мин) при одновременной подаче контрольного и основного компонентов ($x_1 = 0$).

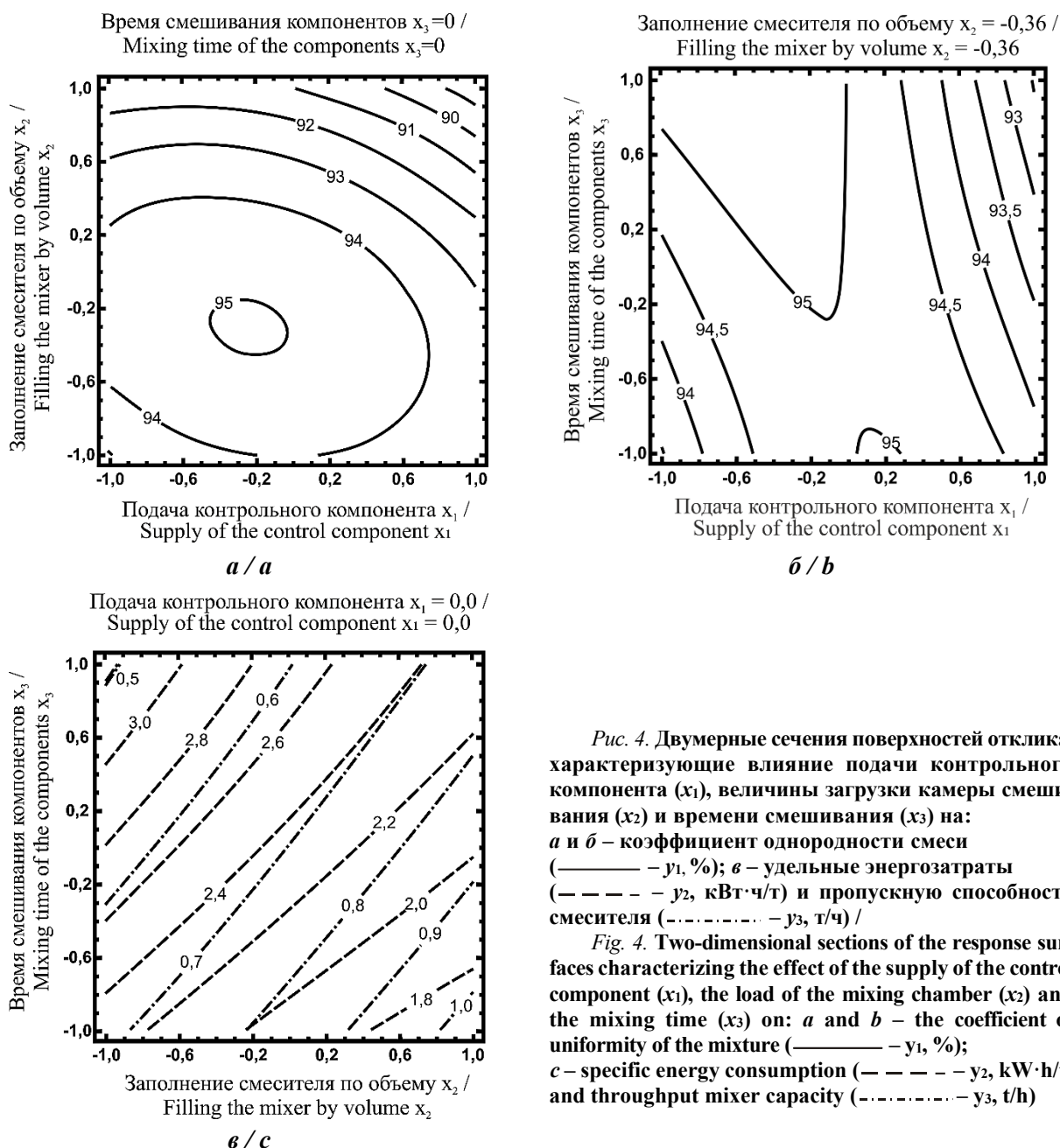


Рис. 4. Двумерные сечения поверхностей отклика, характеризующие влияние подачи контрольного компонента (x_1), величины загрузки камеры смешивания (x_2) и времени смешивания (x_3) на:
a и **б** – коэффициент однородности смеси (— y_1 , %); **в** – удельные энергозатраты (--- y_2 , кВт·ч/т) и пропускную способность смесителя (· · · · · y_3 , т/ч) /

Fig. 4. Two-dimensional sections of the response surfaces characterizing the effect of the supply of the control component (x_1), the load of the mixing chamber (x_2) and the mixing time (x_3) on: **a** and **b** – the coefficient of uniformity of the mixture (— y_1 , %); **c** – specific energy consumption (--- y_2 , kW·h/t) and throughput mixer capacity (· · · · · y_3 , t/h)

Закключение. Результаты экспериментальных исследований горизонтального смесителя с ленточным рабочим органом с камерой смешивания объемом $0,3 \text{ м}^3$ позволили получить математические модели процесса смешивания компонентов в смесителе, по которым определены оптимальные показатели его работы. Наилучшее качество смешивания $94,8 \%$ дости-

гается при загрузке камеры смешивания на $58,0 \%$, частоте вращения вала смесителя 30 мин^{-1} , длительности смешивания 6 минут при одновременной подаче контрольного и основного компонентов. Пропускная способность при этом составила $0,78 \text{ т/ч}$, удельные энергозатраты – $2,04 \text{ кВт·ч/т}$.

Список литературы

1. Овечкина Л. Ю., Бузоверов С. Ю., Лобанов В. И. Повышение эффективности процесса смешивания комбикормов путем модернизации рабочего органа смесителя. Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021;(4-1(55)):75–78. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78> EDN: XLVJST
2. Садов В. В., Сорокин С. А. Интенсификация процесса смешивания комбикормов в вертикальном шнековом смесителе. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023;(4(222)):86–92. DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92> EDN: FNOQLR

3. Проценко А. М., Денисенко Е. А. Совершенствование рабочих органов в горизонтальных смесителях. Образование. Наука. Производство: сб. докл. XV Международного молодежного форума. Белгород: Белгородский ГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. С. 104–109. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54965810> EDN: ROIJMQ
4. Кикин Н. О. Возможности повышения интенсификации процесса смешивания в смесителях с горизонтальным расположением валов. Машиностроение: инновационные аспекты развития: мат-лы междунаро. научн.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2022. Т. 5. С. 13–17. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48655249> EDN: ZAPSKX
5. Матюшев В. В., Бочкарев А. Н., Семенов А. В., Чаплыгина И. А. Исследование режимов работы центробежного смесителя сыпучих компонентов. Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021;(4(44)):206–214. DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_206 EDN: VVNZXB
6. Джингилбаев С. С., Силин В. А. Экспериментальное обоснование оптимальных значений угла наклона и частоты вращения шнеков горизонтально шнекового смесителя. Механика и технологии. 2022;(2(76)):66–72. DOI: <https://doi.org/10.55956/YKET2568> EDN: DVIYIU
7. Савиных П. А., Алешкин А. В., Казаков В. А., Турубанов Н. В., Чернятьев Н. А., Зырянов Д. А., Саитов В. Е. Смеситель: пат. № 2638978 Российская Федерация. № 2016105025: заявл. 15.02.2016; опубл. 19.12.2017; Бюл. №35. 8 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38291111>
8. Савиных П. А., Турубанов Н. В. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров горизонтального смесителя на показатели его рабочего процесса. Техника и технологии в животноводстве. 2022;(3(47)):42–47. DOI: <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-3-42> EDN: PXIORB
9. Рыбалкин Н. А., Лебедев А. Т., Павлюк Р. В. Совершенствование процесса смешивания кормов в лопастном смесителе. Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020;(3(27)):78–84. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44085224> EDN: TMTCTM
10. Шахов В. А., Белов А. Г., Соловьёв С. А., Миркитанов В. И., Золотарёв С. В. Построение математической модели процесса смешивания компонентов комбикормов. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019;(4(78)):140–143. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41218422> EDN: RBEKYP
11. Савиных П. А., Турубанов Н. В. Влияние изменения технологических параметров смесителя комбикормов на показатели его работы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(5):732–739. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.732-739> EDN: POGVXS
12. Лозовой Н. М., Радинская Л. И., Лозовая С. Ю. Экспериментальные исследования зависимости коэффициента неоднородности смеси от технологических параметров в смесителе с изменяющейся рабочей камерой. Техника и технология транспорта. 2019;(S(13)):33. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40999989> EDN: WNDLRW
13. Игнатенков В. Г., Лаппо Е. Л., Быченков Д. М. Результаты экспериментальных исследований универсального смесителя-измельчителя для производства витаминно-кормовых добавок на основе сапропеля. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018;(6(164)):166–171. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35467503> EDN: XWXPTV
14. Солонщиков П. Н. Исследование непрерывного режима смешивания кормовых компонентов в смесительной установке. Тракторы и сельхозмашины. 2021;88(4):71–76. DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-71-76> EDN: BAXHCO
15. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Мошонкин А. М. Определение оптимальных конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки с решетками в торцевых поверхностях. Агроинженерия. 2023;25(5):17–22. DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-17-22> EDN: CZVEEL
16. Ханин С. И., Воронов В. П., Кикин Н. О., Мордовская О. С. Определение времени подготовки смеси в горизонтальном лопастном смесителе с установленными цилиндрическими стержневыми элементами. Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022;(17-2):265–272. DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-17-265-272> EDN: GQWKSD
17. Мамедов Г. Б., Камран Т. Ф. Исследование производительности экспериментального кормосмесителя. Аграрная наука. 2021;(2):90–93. DOI: <https://doi.org/10.32634/10.32634/0869-8155-2021-345-2-90-93> EDN: BDIMRX

References

1. Ovechkina L. Yu., Buzoverov S. Yu., Lobanov V. I. Improving the efficiency of the feed mixing process by upgrading the mixer working body. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* = International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2021;(4-1(55)):75–78. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78>
2. Sadv V. V., Sorokin S. A. Intensification of compound feed mixing process in a vertical screw mixer. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2023;(4(222)):86–92. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92>
3. Protsenko A. M., Denisenko E. A. Improvement of working bodies in horizontal mixers. Education. Science. Production: sat. dokl. XV International Youth Forum. Belgorod: *Belgorodskiy GTU im. V. G. Shukhova*, 2023. pp. 104–109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54965810>
4. Kikin N. O. Possibilities to increase the intensification of the mixing process in mixers with horizontal shafts. Mechanical engineering: innovative aspects of development: international issues. scientific-practical conf. Saint-Petersburg, 2022. Vol. 5. pp. 13–17. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48655249>
5. Matyushev V. V., Bochkarev A. N., Semenov A. V., Chaplygina I. A. Investigation of the operating modes of a centrifugal mixer of bulk components. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Omsk SAU. 2021;(4(44)):206–214. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_206

6. Dzhangilbayev S. S., Silin V. A. Experimental substantiation of the optimal values of the angle of inclination and rotation frequency of the screws of a horizontal screw mixer. *Mekhanika i tekhnologii* = Mechanics & Technologies. 2022;(2(76)):66–72. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.55956/YKET2568>
7. Savinykh P. A., Aleshkin A. V., Kazakov V. A., Turubanov N. V., Chernyat'ev N. A., Zyryanov D. A., Saitov V. E. Mixer. Patent RF No. 2638978 2017. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38291111>
8. Savinykh P. A., Turubanov N. V. Research of horizontal mixer's design-and-technological parameters influence on its workflow indicators. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve* = Machinery and technologies in livestock. 2022;(3(47)):42–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-3-42>
9. Rybalkin N. A., Lebedev A. T., Pavlyuk R. V. Improvement of the process of mixing fodder in a valve mixer. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy* = Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives. 2020;(3(27)):78–84. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44085224>
10. Shakhov V. A., Belov A. G., Soloviev S. A., Mirkitanov V. I., Zolotarev S. V. Construction of mathematical model of the process of mixing compound feed components. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2019;(4(78)):140–143. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41218422>
11. Savinykh P. A., Turubanov N. V. The influence of changes in the technological parameters of the feed mixer on its performance. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(5):732–739. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.5.732-739>
12. Lozovoy N. M., Radinskaya L. I., Lozovaya S. Yu. Experimental studies of the dependence of the inhomogeneity coefficient of the mixture on the technological parameters in a mixer with a changing working chamber. *Tekhnika i tekhnologiya transporta* = Technique and Technology of Transport. 2019;(S(13)):33. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40999989>
13. Ignatenkov V. G., Lappo E. L., Bychenkov D. M. The results of experimental tests of multifunctional crushing mixer for production of spropel-based vitamin feed supplement. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018;(6(164)):166–171. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35467503>
14. Solonshchikov P. N. Study of the continuous mode of mixing feed components in a mixing plant. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021;88(4):71–76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-71-76>
15. Savinykh P. A., Turubanov N. V., Moshonkin A. M. Determination of optimal design and technological parameters of a hammer crusher with sieves in end surfaces. *Agroinzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2023;25(5):17–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-17-22>
16. Khanin S. I., Voronov V. P., Kikin N. O., Mordovskaya O. S. Determining the mixture preparation time in a horizontal paddle mixer with installed cylindrical rod elements. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo* = Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022;(17-2):265–272. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-17-265-272>
17. Mammadov G. B., Kamran T. F. Experimental feed mixer performance study. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2021;(2):90–93. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32634/10.32634/0869-8155-2021-345-2-90-93>

Сведения об авторах

Савиных Петр Алексеевич, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией механизации животноводства, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>

✉ **Турубанов Николай Валентинович**, кандидат техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1446-6851>, e-mail: nikolaytu@mail.ru

Исупов Алексей Юрьевич, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3399-5089>

Information about the authors

Petr A. Savinykh, DSc in Engineering, professor, chief researcher, Head of the Laboratory of Animal Husbandry Mechanization, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166a, Lenin str., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>

✉ **Nikolaj V. Turubanov**, PhD in Engineering, associate professor, senior researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166a, Lenin str., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1446-6851>, e-mail: nikolaytu@mail.ru

Aleksej Ju. Isupov, PhD in Engineering, senior researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166a, Lenin str., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3399-5089>

✉ – Для контактов / Corresponding author