

Василий Викторович Матюшев^{1✉}, Артур Самвелович Аветисян²,
Ирина Александровна Чаплыгина³, Алексей Андреевич Беляков⁴

^{1,2,3} Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

⁴ Ачинский филиал Красноярского государственного аграрного университета, Ачинск, Красноярский край, Россия

¹ matyushe@yandex.ru

² matyushe@yandex.ru

³ ledum_palustre@mail.ru

⁴ bellimfor@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЛОПАСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ СЫПУЧИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ

Цель исследования – сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований разработанной и запатентованной конструкции лопастного смесителя в области применимости предложенной авторами теории смешивания сыпучих растительных компонентов. Задачи: выполнение экспериментальных исследований параметрической области применимости теории смешивания с оценкой расхождения теоретически предсказанных и фактических значений варибельности и энергоёмкости в окрестностях их оптимумов для адаптации модели к производственным условиям. Теоретические оценки результатных показателей и их сравнение с аналогичными экспериментально полученными значениями выполнены с использованием авторской компьютерной программы процесса смешивания сыпучих растительных компонентов. Для теоретического описания границ области использовалась система компьютерной математики Maple в диапазоне результатных показателей от минимума до максимума. Исследовательские проверки выполнены для определения результатных показателей функционирования лопастного смесителя: варибельности и энергоёмкости процесса смешивания сыпучих растительных компонентов при выборе оптимальных режимов в допустимой параметрической области, задаваемой угловой скоростью вращения вала, углом наклона лопаток и содержанием пшена в смеси. Качество процесса смешивания в условиях выбора наилучших режимов функционирования смесителя оценено величиной относительного отклонения фактического значения результатного показателя от аналогичного оптимального значения. Установлено, что при использованном формате вычислений указанное расхождение минимумов и максимумов не превышает 5 %: для варибельности составляет соответственно 2,64832 и 0,36521 %, а для энергоёмкости – 0,35019 и 1,34564 %.

Ключевые слова: смеситель, смесь, компонент, фактор, угловая скорость вала, угол наклона лопаток, содержание пшена в смеси, результатный показатель, варибельность, энергоёмкость, параметрическая область, окрестность оптимума, аргминимум, аргмаксимум.

Для цитирования: Исследование работы лопастного смесителя сыпучих растительных компонентов в экстремальных режимах / В.В. Матюшев [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2023. № 8. С. 227–232. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-8-227-232.

Vasily Viktorovich Matyushev^{1✉}, Arthur Samvelovich Avetisyan²,
Irina Aleksandrovna Chaplygina³, Alexey Andreyevich Belyakov⁴

^{1,2,3} Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

⁴ Achinsk Branch of Krasnoyarsk State Agrarian University, Achinsk, Krasnoyarsk Region, Russia

¹ matyushe@yandex.ru

² matyushe@yandex.ru

³ ledum_palustre@mail.ru

⁴ bellimfor@yandex.ru

INVESTIGATION OF THE OPERATION OF A PADDLE MIXER OF BULK PLANT COMPONENTS IN EXTREME MODES

The purpose of the study is to compare the results of theoretical and experimental studies of the developed and patented design of a paddle mixer in the field of applicability of the theory of mixing loose plant components proposed by the authors. Objectives: to carry out experimental studies of the parametric area of applicability of the theory of mixing with an assessment of the discrepancy between theoretically predicted and actual values of variability and energy intensity in the vicinity of their optimum in order to adapt the model to production conditions. Theoretical estimates of the result indicators and their comparison with similar experimentally obtained values were made using the author's computer program for the process of mixing bulk plant components. For the theoretical description of the boundaries of the region, the Maple computer mathematics system was used in the range of result indicators from minimum to maximum. Research checks were carried out to determine the performance indicators of the paddle mixer operation: the variability and energy intensity of the process of mixing bulk plant components when choosing the optimal modes in the allowable parametric region specified by the angular speed of the shaft rotation, the angle of the blades and the content of millet in the mixture. The quality of the mixing process under the conditions of choosing the best modes of operation of the mixer is estimated by the relative deviation of the actual value of the result indicator from the similar optimal value. It has been established that with the calculation format used, the indicated discrepancy between the minima and maxima does not exceed 5%: for variability it is 2.64832 and 0.36521%, respectively, and for energy intensity it is 0.35019 and 1.34564%.

Keywords: mixer, mixture, component, factor, angular velocity of the shaft, angle of inclination of the blades, millet content in the mixture, result indicator, variability, energy intensity, parametric region, neighborhood of the optimum, argminimum, argmaximum.

For citation: Investigation of the operation of a paddle mixer of bulk plant components in extreme modes / V.V.Matyushev [et al.] // Bulliten KrasSAU. 2023;(8):227–232. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-8-227-232.

Введение. Смесители сыпучих материалов используются при производстве продуктов питания, комбикормов, в фармацевтической, химической и других отраслях промышленности [1–3]. Основной задачей процесса смешивания сыпучих растительных компонентов является получение однородных смесей, в которых частицы каждого материала равномерно распределяются по всему объему вследствие их перемещения под воздействием рабочих органов смесителя. Решение задачи получения однородных смесей связано с требованиями к количественно-качественному составу готового про-

дукта, энергоемкости процесса смешивания сыпучих растительных компонентов.

Анализ литературных источников свидетельствует, что в настоящее время выпускается широкий спектр новых конструкций смесителей [4].

В качестве недостатков используемых смесителей следует отметить сложность конструкции, высокие энергозатраты и нестабильное качество получаемой смеси.

Исследования предлагаемых конструкций смесителей сыпучих растительных компонентов подразумевают проведение теоретических и экспериментальных испытаний с оценкой адекватности полученных результатов [5–7].

Цель исследования – дать сравнительную оценку теоретических и экспериментальных исследований разработанной конструкции лопастного смесителя в области применимости теории смешивания сыпучих растительных компонентов.

Задачи: выполнить экспериментальные исследования параметрической области применимости теории смешивания в окрестностях предсказанных оптимумов; определить расхождение теоретически предсказанных и фактических значений варибельности и энергоёмкости в окрестностях оптимумов для адаптации модели к производственным условиям.

Материалы и методы. Испытания и контроль качества продукции выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции». Экспериментальные исследования проводились для запатентованной конструкции лопастного смесителя [8].

Теоретические оценки результатных показателей и их сравнение с аналогичными экспериментально полученными значениями выполнены с использованием авторской компьютерной программы процесса смешивания сыпучих растительных компонентов. Для теоретического описания границ области использованы диапазоны результатных показателей от минимума до максимума, рассчитанных на компьютере. Варибельность процесса смешивания F теоретически ограничена значениями $\min F=1,16904$ %вар. и $\max F=8,88244$ %вар., а его энергоёмкость G ограничена теоретическими оценками $\min G=0,25341$ кВт ч/т и $\max G=0,35123$ кВт ч/т. Вблизи аргминимума и аргмаксимума результатных показателей выбраны следующие конструктивно допустимые значения параметров: угловая скорость вала: 40; 44; 51; 60 об/мин; угол наклона лопаток: 30; 41; 42; 44; 44 град;

содержание пшена в смеси: 10; 14,5; 16; 18; 20 %. Для вычислительного эксперимента использовалась система компьютерной математики Maple [9, 10].

Результаты и их обсуждение. В ходе лабораторных испытаний модифицированного смесителя сыпучих растительных компонентов выполнено экспериментальное определение качественных и количественных характеристик и свойств смесителя при его функционировании в различных режимах.

Исследовательские проверки выполнены для определения результатных показателей функционирования смесителя – варибельности (F , %вар) и энергоёмкости (G , кВт ч/т) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов при выборе оптимальных режимов в допустимой параметрической области Ω , задаваемой угловой скоростью вращения вала (x_1 , об/мин), углом наклона лопаток (x_2 , град.), содержанием пшена в смеси (x_3 , %). Качество процесса смешивания в условиях выбора наилучших режимов функционирования смесителя оцениваем величиной относительного отклонения фактического значения результатного показателя от аналогичного оптимального значения. Опытным путем установлено, что снижение варибельности процесса смешивания сыпучих растительных компонентов означает повышение устойчивости и, как следствие, качества технологического процесса, а повышение энергоёмкости напрямую связано с ростом производительности звена модифицированного смесителя.

Поэтому в первом случае используем величины отклонения и относительного отклонения фактической варибельности F_1 процесса от его минимального значения F_{\min}

$$\left| F_1 - F_{\min} \right|, \quad \left| \frac{F_1 - F_{\min}}{F_{\min}} \right|.$$

Отклонение варибельности $\left| F_1 - F_{\min} \right|$ изменяется в диапазоне 0,03096 – 7,68096 %вар. Чем ближе рассчитанные значения к нулю, тем ближе процесс к минимуму варибельности $\min F = 1,16904$ % вар.

Во втором случае – величины отклонения и относительного отклонения фактической энергоёмкости G_1 процесса от его максимального значения G_{\max}

$$\left| G_1 - G_{\max} \right|, \left| \frac{G_1 - G_{\max}}{G_{\max}} \right|.$$

Отклонение энергоемкости $\left| G_1 - G_{\max} \right|$ изменяется в диапазоне 0,00084–0,02914 кВт ч/т. Чем ближе рассчитанные значения к нулю, тем ближе процесс к максимуму энергоемкости $\max G = 0,35123$ кВтч/т.

Определительные проверки дают практический выбор различных комбинаций параметров x_1, x_2, x_3 , близких к теоретически обоснованным значениям угловой скорости вращения вала $x_1 = 60$ об/мин, угла наклона лопаток $x_2 = 45$ град., содержания пшена в смеси $x_3 = 20$ %, на уровне вариации F , не превышающем $U = 1,85$ %, позволяет сопоставить фактические значения энерго-

емкости процесса смешивания 0,35 кВт ч/т с оптимумом $\max G = 0,35123$ кВт ч/т.

Контрольные проверки выполнены для выявления проблем качества функционирования исследуемого смесителя сыпучих растительных компонентов. Каждый контролируемый результатный показатель при заданных комбинациях параметров x_1, x_2, x_3 имеет два уровня: фактический – установленный измерениями в опыте, и теоретический, предсказанный по модели расчетным путем.

Поэтому в первом случае используем величины отклонения и относительного отклонения фактической вариабельности F_1 процесса от его теоретического значения F_0

$$\left| F_1 - F_0 \right|, \left| \frac{F_1 - F_0}{F_0} \right|.$$

$$\text{Относительное отклонение} \left| \frac{F_1 - F_0}{F_0} \right| \cdot 100\%$$

по всем вариантам опытов не превосходит 2,626 % < 5 %. Чем ближе рассчитанные значения к нулю, тем лучше поверхность отклика ва-

риабельности сглаживает ее фактические значения.

Во втором случае – величины отклонения и относительного отклонения фактической энергоемкости G_1 процесса от его теоретического значения G_0 :

$$\left| G_1 - G_0 \right|, \left| \frac{G_1 - G_0}{G_0} \right|.$$

$$\text{Относительное отклонение} \left| \frac{G_1 - G_0}{G_0} \right| \cdot 100\%$$

в среднем по всем вариантам опытов не превосходит 5 % (имеется аномальный выброс 10,758 % > 5 %). Чем ближе рассчитанные значения к нулю, тем лучше поверхность отклика энергоемкости процесса смешивания сглаживает ее фактические значения.

Сравнительные проверки выполнены для выявления и сопоставления фактических экстремумов результатных показателей процесса смешивания, полученных в лабораторных условиях, с аналогичными значениями, полученными расчетным путем. Каждый результатный показатель изменяется в диапазоне от минимума до максимума.

Оказалось, что фактически измеренная вариабельность изменяется в диапазоне 1,20–8,85 % вар., а вычисленная вариабельность имеет более широкий диапазон 1,16904–8,88244 % вар.

Расхождение минимумов вариабельности составляет 2,64832 %, а расхождение максимумов – 0,36521 %, что меньше 5 %.

Фактически измеренная энергоемкость изменяется в диапазоне 0,25–0,35 кВт ч/т, а вычисленная энергоемкость имеет широкий диапазон 0,25341 – 0,35123 кВт ч/т.

Расхождение минимумов энергоемкости составляет 1,34564 %, а расхождение максимумов – 0,35019 %, что меньше 5 %.

Заключение

1. Методом лабораторных испытаний выполнен практический выбор параметров x_1, x_2, x_3 ,

близких к теоретически обоснованным значениям угловой скорости вращения вала $x_1=60$ об/мин, угла наклона лопаток $x_2=45$ град., содержания пшеницы в смеси $x_3=20\%$, на уровне вариации F , не превышающем $U=1,85\%$, и позволяет сопоставить фактические значения энергоемкости процесса смешивания $0,35$ кВт ч/т с оптимумом $\max G=0,351$ кВт ч/т.

2. Установлено, что в пределах параметрической области фактические значения вари-

бельности и энергоемкости отклоняются от аналогичных теоретически предсказанных значений меньше чем на 5% . При этом расхождение фактического и вычисленного минимумов варибельности составляет $2,64832\%$, а расхождение максимумов этого показателя – $0,36521\%$; расхождение фактического и вычисленного минимумов энергоемкости составляет $1,34564\%$, а расхождение максимумов – $0,35019\%$, что также меньше 5% .

Список источников

1. Гучева Н.В. Экспериментальные исследования процесса смешивания сыпучих зерновых материалов // Вестник Донского государственного технического университета. 2014. № 14. С. 172–177.
2. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф. и др. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств. М.: Машиностроение-1, 2004. 120 с.
3. Матюшев В.В., Аветисян А.С., Чаплыгина И.А. и др. Аналитическая модель смешивания сыпучих растительных компонентов // Вестник КрасГАУ. 2023. № 4. С. 202–209.
4. Волков М.В. Метод расчета процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с открытой рабочей камерой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Ярославль, 2014. 16 с.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 448 с.
6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2012. 816 с.
7. Численные методы при моделировании технологических машин и оборудования: учеб. пособие / Г.В. Алексеев [и др.]. СПб.: ГИОРД, 2014. 200 с.
8. Пат. 192831 RU, МПКВ01F7/02 (2006.01), В28С 5/14 (2006.01). Лопастной смеситель / Матюшев В.В., Семенов А.В., Чаплыгина И.А., Аветисян А.С.; патентообладатель Красноярский государственный аграрный университет. № 2019122007; заявл. 09.07.2019; опубл. 02.10.2019.
9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Экспертно-аналитическая модель получения хлебобулочных изделий с использованием текстурированной муки из растительных смесей на основе зерна / Чаплыгина И.А., Матюшев В.В., Беляков А.А. 2022660431, 03.06.2022. Заявка № 2022619750 от 25.05.2022.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Экспертно-аналитическая модель получения энергонасыщенных экструдатов из питательных смесей на основе зерна / Чаплыгина И.А., Матюшев В.В., Семенов А.В., Беляков А.А. 2022613485. 14.03.2022. Заявка № 2022612862 от 02.03.2022.

References

1. Gucheva N.V. Eksperimental'nye issledovaniya processa smeshivaniya sypuchih zernovykh materialov // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. №14. S. 172–177.
2. Selivanov Yu.T., Pershin V.F. Raschet i proektirovanie cirkulyacionnykh smesitelej sypuchih materialov bez vnutrennih peremeshivayushchih ustrojstv. M.: Mashinostroenie-1, 2004. 120 s.
3. Matyushev V.V., Avetisyan A.S., Chaplygina I.A. i dr. Analiticheskaya model' smeshivaniya sypuchih rastitel'nykh komponentov // Vestnik KrasGAU. 2023. № 4. S. 202–209.

4. Volkov M.V. Metod rascheta processa smeshvaniya sypuchih materialov v novom apparate s ot-krytoj rabochej kameroy; avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.17.08. Yaroslavl', 2014. 16 s.
5. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. M.: Nauka, 1981. 448 s.
6. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika dlya inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. M.: Fizmatlit, 2012. 816 s.
7. Chislennye metody pri modelirovanii tekhnologicheskikh mashin i oborudovaniya: ucheb. posobie / G.V. Alekseev [i dr.]. SPb.: GIOR, 2014. 200 s.
8. Pat. 192831 RU, MPKV01F7/02 (2006.01), V28S 5/14 (2006.01). Lopastnoj smesitel' /Matyushev V.V., Semenov A.V., Chaplygina I.A., Avetisyan A.S.; patentoobladatel' Krasnoyarskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. № 2019122007; zayavl. 09.07.2019; opubl. 02.10.2019.
9. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM. Ekspertno-analiticheskaya model' polucheniya hlebobulochnykh izdelij s ispol'zovaniem teksturirovannoj muki iz rastitel'nyh smesej na osnove zerna /Chaplygina I.A., Matyushev V.V., Belyakov A.A. 2022660431, 03.06.2022. Zayavka № 2022619750 ot 25.05.2022.
10. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM. Ekspertno-analiticheskaya model' polucheniya en-ergonasyshchennykh ekstrudatov iz pita-tel'nyh smesej na osnove zerna /Chaplygina I.A., Matyushev V.V., Semenov A.V., Belyakov A.A. 2022613485. 14.03.2022. Zayavka № 2022612862 ot 02.03.2022.

Статья принята к публикации 15.03.2023 / The article accepted for publication 15.03.2023.

Информация об авторах:

Василий Викторович Матюшев, заведующий кафедрой товароведения и управления качеством продукции АПК, доктор технических наук, профессор

Артур Самвелович Аветисян, аспирант кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК

Ирина Александровна Чаплыгина, доцент кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК, кандидат биологических наук, доцент

Алексей Андреевич Беляков, доцент кафедры агроинженерии, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

Vasily Viktorovich Matyushev, Head of the Department of Commodity Science and Quality Management of the Agroindustrial Complex, Doctor of Technical Sciences, Professor

Arthur Samvelovich Avetisyan, Postgraduate Student at the Department of Commodity Science and Quality Management of the Agroindustrial Complex

Irina Aleksandrovna Chaplygina, Associate Professor at the Department of Commodity Science and Product Quality Management of the Agroindustrial Complex, Candidate of Biological Sciences, Docent

Alexey Andreyevich Belyakov, Associate Professor at the Department of Agroengineering, Candidate of Technical Sciences, Docent

