

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

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

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

^{1,2}matyushe@yandex.ru

³ledum_palustre@mail.ru

⁴bellimfor@yandex.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭЛАСТИЧНОСТИ И ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ КОМПОНЕНТОВ

Цель исследования – аналитическое представление эластичности и обоснование критерия процесса смешивания сыпучих компонентов. Задачи: разработать аналитическую модель процесса смешивания сыпучих компонентов с учетом индикаторов эластичности и аналитически обосновать критерий качества смешивания сыпучих компонентов. Процесс качественного смешивания сыпучих смесей из растительных компонентов зависит от конструкции применяемого оборудования. Аналитическая модель и критерий качества процесса смешивания сыпучих компонентов разработаны для запатентованной конструкции лопастного смесителя. В качестве компонентов смеси использовалось зерно пшеницы и пшено. Факторами в исследованиях являлись: угловая скорость вала лопастного смесителя; угол наклона лопаток; содержание пшена в смеси. Целевыми функциями оптимизации являлись: вариабельность смеси, энергоемкость процесса смешивания сыпучих компонентов, а также обобщенный показатель, представляющий их свертку. Для вычислительного эксперимента использовался компьютерный пакет Maple. Предложенный критерий качества и эффективности смешивания представлен в аналитическом виде как критерий максимизации, а технологическая задача совершенствования процесса соответственно превращается в задачу условной оптимизации. На точках оптимума «смешанный» обобщенный показатель обладает свойством эластичности – «чувствительности» к управлению процессом смешивания. Критерий качества (эффективности) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов предложен для согласования цели роста производительности (высокой энергоемкости) процесса смешивания при гарантированном обеспечении его устойчивости (низкой вариабельности). Определены численные значения максимумов при различных уровнях. При выборе угловой скорости вращения вала, угла наклона лопаток, содержания пшена в смеси на уровне вариации, не превышающем 1,85 %, достигается максимум энергоемкости процесса смешивания.

Ключевые слова: смеситель, смесь, компонент, фактор, эластичность, критерий качества, обобщенный показатель, вариабельность, энергоемкость, оптимум

Для цитирования: Аналитическое представление эластичности и обоснование критерия качества процесса смешивания сыпучих компонентов / В.В. Матюшев [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2023. № 6. С. 173–178. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-6-173-178.

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

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

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

^{1,2}matyushe@yandex.ru

³ledum_palustre@mail.ru

⁴bellimfor@yandex.ru

ANALYTICAL REPRESENTATION OF ELASTICITY AND SUBSTANTIATION OF QUALITY CRITERION OF THE MIXING BULK COMPONENTS PROCESS

The purpose of the study is an analytical representation of elasticity and substantiation of the criterion for the process of mixing bulk components. Tasks: to develop an analytical model of the process of mixing bulk components, taking into account indicators of elasticity and to analytically substantiate the quality criterion for mixing bulk components. The process of high-quality mixing of bulk mixtures of plant components depends on the design of the equipment used. The analytical model and quality criterion of the process of mixing bulk components are developed for the patented design of the paddle mixer. Wheat grain and millet were used as components of the mixture. The factors in the studies were: the angular velocity of the paddle mixer shaft; blade angle; millet content in the mixture. The target optimization functions were: the variability of the mixture, the energy intensity of the process of mixing bulk components, as well as a generalized indicator representing their convolution. The computer package Maple was used for the computational experiment. The proposed criterion for the quality and efficiency of mixing is presented in an analytical form as a maximization criterion, and the technological task of improving the process, accordingly, turns into a problem of conditional optimization. At the optimum points, the "mixed" generalized indicator has the property of elasticity – "sensitivity" to the control of the mixing process. The criterion of quality (efficiency) of the process of mixing bulk plant components was proposed to agree on the goal of increasing the productivity (high energy intensity) of the mixing process while ensuring its stability (low variability). The numerical values of the maxima at different levels are determined. When choosing the angular speed of rotation of the shaft, the angle of inclination of the blades, the content of millet in the mixture at a variation level not exceeding 1.85 %, the maximum energy intensity of the mixing process is achieved.

Keywords: mixer, mixture, component, factor, elasticity, quality criterion, generalized indicator, variability, energy intensity, optimum

For citation: Analytical representation of elasticity and substantiation of quality criterion of the mixing bulk components process / V.V. Matyushev [et al.] // Bulliten KrasSAU. 2023;(6): 173–178. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-6-173-178.

Введение. Исследования по совершенствованию технологической операции смешивания сыпучих компонентов, проводимые отечественными и зарубежными учеными на протяжении многих лет, являются актуальными и в настоящее время [1, 2]. Оборудование для смешивания сыпучего материала используется в пищевой, комбикормовой, фармацевтической, химической и других отраслях промышленности.

Процесс качественного смешивания сыпучих смесей из растительных компонентов зависит от конструкции применяемого оборудования. В качестве недостатков используемого в производстве оборудования для смешивания сыпучих

компонентов следует отметить высокие энергозатраты при смешивании сыпучих материалов и нестабильное качество смеси [3–5].

Проектирование смесителей сыпучих компонентов связано с теоретическими исследованиями процесса смешивания материала. В связи с этим актуальными являются теоретические исследования, направленные на проектирование нового оборудования [6–8].

Цель исследования – дать аналитическое представление эластичности и обосновать критерий качества (эффективности) процесса смешивания сыпучих компонентов.

Задачи: разработать аналитическую модель процесса смешивания сыпучих компонентов с учетом индикаторов эластичности; аналитически обосновать критерий качества (эффективности) процесса смешивания сыпучих компонентов.

Материалы и методы. Аналитические исследования проводились для запатентованной конструкции лопастного смесителя [9].

В качестве компонентов смеси использовалось зерно пшеницы и пшено. Факторами являлись угловая скорость вала лопастного смесителя; угол наклона лопаток; содержание пшена в смеси. Критериями оптимизации являлись вариабельность смеси (%вар) и энергоемкость процесса смешивания (кВт ч/т). Для вычислительного эксперимента использовался компьютерный пакет Maple.

Результаты и их обсуждение. Получено аналитическое представление эластичности процесса смешивания сыпучих компонентов. Эластичность обобщенного показателя H смешивания сыпучих растительных компонентов по изменению угловой скорости вала (x_1 , об/мин) представляется формулой

$$E_1(\alpha, x_1, x_2, x_3) = \frac{\partial \ln H(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial \ln x_1}.$$

Эластичность обобщенного показателя H по изменению угла наклона лопаток (x_2 , г) представляется формулой

$$E_2(\alpha, x_1, x_2, x_3) = \frac{\partial \ln H(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial \ln x_2}.$$

Эластичность обобщенного показателя H по изменению содержания пшена в смеси (x_3 , %) представляется формулой

$$E_3(\alpha, x_1, x_2, x_3) = \frac{\partial \ln H(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial \ln x_3}.$$

С использованием полученных выше формул, с шагом 0,1, на точках оптимума обобщенного показателя рассчитаны значения эластичностей E_1, E_2, E_3 .

Поскольку при $\alpha = 1, \beta = 0$ обобщенный показатель $H(\alpha, \beta, x_1, x_2, x_3)$ превращается в показатель вариабельности $F(x_1, x_2, x_3)$, т. е.

$$H(1, 0, x_1, x_2, x_3) = F(x_1, x_2, x_3),$$

то в этом случае свойства эластичности обобщенного показателя становятся свойствами эластичности показателя вариабельности.

На точках минимума вариабельность $F(x_1, x_2, x_3)$ оказалась эластичной по изменению угловой скорости вала x_1 , но неэластичной по изменениям угла наклона лопаток x_2 и содержания пшена в смеси x_3 , поскольку на данных точках выполняются неравенства

$$|E_1| = 23.55 > 1, |E_2| = 0.00 < 1, |E_3| = 0.00 < 1.$$

Заметим, что эластичность вариабельности $F(x_1, x_2, x_3)$ по угловой скорости вала x_1 означает, что при фиксированных значениях x_2 и x_3 изменение факторной величины x_1 на 1 % приводит к изменению резульатной величины F более чем на 1 %.

На точках максимума ситуация иная – вариабельность $F(x_1, x_2, x_3)$ оказалась неэластичной по изменению угловой скорости вала x_1 , но стала эластичной по изменениям угла наклона лопаток x_2 и содержания пшена в смеси x_3 , поскольку на данных точках выполняются неравенства

$$|E_1| = 0.00 < 1, |E_2| = 1.44 > 1, |E_3| = 1.54 > 1.$$

Заметим, что неэластичность вариабельности $F(x_1, x_2, x_3)$ по угловой скорости вала x_1 практически означает, что изменение факторной величины x_1 на 1 % не влияет на результат F .

Эластичность по переменному x_k дает возможность представить факторный показатель x_k как управляющий показатель x_k для резульатного показателя F . Ее можно проинтерпретировать как «чувствительность» механизма к управлению.

Очевидно, что при $\alpha = 0, \beta = 1$ обобщенный показатель $H(\alpha, \beta, x_1, x_2, x_3)$ превращается в показатель энергоемкости $G(x_1, x_2, x_3)$, т. е.

$$H(0, 1, x_1, x_2, x_3) = G(x_1, x_2, x_3),$$

и в этом случае свойства эластичности обобщенного показателя становятся свойствами эластичности показателя энергоемкости.

Как на точках минимума, так и на точках максимума энергоемкость $G(x_1, x_2, x_3)$ оказалась неэластичной по изменениям угловой скорости вала x_1 , угла наклона лопаток x_2 и содержания пшена в смеси x_3 . Неэластичность энергоемкос-

ти равносильна тому, что возмущение значения любого фактора x_k на 1 %, практически не влияет на результат G .

Одной из мотиваций введения «смешанного» обобщенного показателя $H(\alpha, \beta, x_1, x_2, x_3)$ с условием $\alpha \neq 0, \beta = 1 - \alpha \neq 1$ и $\alpha \neq 1, \beta = 1 - \alpha \neq 0$ является преодоление неэластичности «чистого» показателя энергоёмкости. Здесь строки минимума и максимума H чередуются.

Методом вычислительного эксперимента на точках минимума $H(\alpha, \beta, x_1, x_2, x_3)$ выявлена эластичность по изменению угловой скорости вала x_1 и неэластичность по изменениям угла наклона лопаток x_2 и содержания пшена в смеси x_3 . А на точках максимума $H(\alpha, \beta, x_1, x_2, x_3)$ выявлена неэластичность по изменению угловой скорости вала x_1 и эластичность по изменениям угла наклона лопаток x_2 и содержания пшена в смеси x_3 . В указанном смысле эти эластичности в «обобщенном подходе» уравниваются.

При этом установлен характер этих изменений:

➤ эластичность $E_1(x_1, x_2, x_3)$ на точках минимума $H(\alpha, \beta, x_1, x_2, x_3)$ монотонно убывает от варианта $\alpha = 0,9, \beta = 0,1$ до варианта $\alpha = 0,1,$

$\beta = 0,9$, т. е. от уровня $|E_1| = 22,77$ до уровня $|E_1| = 10,35$;

➤ эластичности $E_2(x_1, x_2, x_3)$ и $E_3(x_1, x_2, x_3)$ на точках максимума $H(\alpha, \beta, x_1, x_2, x_3)$ монотонно убывает от варианта $\alpha = 0,9, \beta = 0,1$ до варианта $\alpha = 0,1, \beta = 0,9$;

➤ соответственно по углу наклона лопаток x_2 и содержанию пшена в смеси x_3 монотонно возрастают: от варианта $\alpha = 0,9, \beta = 0,1$ до варианта $\alpha = 0,1, \beta = 0,9$, то есть от уровня $|E_2| = 1,44, |E_3| = 1,53$ до уровня $|E_2| = 1,00 > 1, |E_3| = 1,21 > 1$.

В любом случае на точках оптимума «смешанный» обобщенный показатель обладает свойством эластичности – «чувствительности» к управлению процессом смешивания.

Критерий качества (эффективности) процесса смешивания сыпучих растительных компонентов предложен для согласования цели роста производительности (высокой энергоёмкости) процесса смешивания при гарантированном обеспечении его устойчивости (низкой вариативности).

Для начала определим множество допустимых изменений факторных показателей с учетом 5 % порогового уровня вариации процесса смешивания:

$$\Omega_U = \{ (x_1, x_2, x_3) \mid 40 \leq x_1 \leq 60, 30 \leq x_2 \leq 60, 10 \leq x_3 \leq 20, F(x_1, x_2, x_3) \leq U \}.$$

План (x_1^*, x_2^*, x_3^*) , доставляющий максимум энергоёмкости $G(x_1, x_2, x_3)$ на множестве всех допустимых планов Ω_U , в случае его реализации обеспечит уровень G^* качества и эффективности процесса смешивания компонентов.

Заключение. Предложенный критерий качества и эффективности смешивания представлен в аналитическом виде как критерий

максимизации, а технологическая задача совершенствования процесса соответственно превратилась в задачу условной оптимизации: $G^* = \max G(x_1, x_2, x_3)$ при $(x_1, x_2, x_3) \in \Omega_U$, т. е. $(x_1^*, x_2^*, x_3^*) = \arg \max G(x_1, x_2, x_3)$. Определены численные значения максимумов при различных уровнях: $F < 1,85 < U = 2,0$:

$U = 1.5, F < 1.44 < U = 1.5$ – строгие требования определяют

$$F(60, 45, 18) = 1.438, G(60, 45, 18) = 0.351;$$

$U = 2.0, F < 2.0$ – обычные требования определяют

$$F(60, 45, 20) = 1.846, G(60, 45, 20) = 0.351.$$

При выборе угловой скорости вращения вала $x_1 = 60$ об/мин, угла наклона лопаток $x_2 = 45$ г, содержания пшена в смеси $x_3 = 20$ % на уровне

вариации, не превышающем 1,85 %, достигается максимум энергоёмкости процесса смешивания $G^* = 0,351$ кВт · ч/т.

Список источников

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
2. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств. М.: Машиностроение-1, 2004. 120 с.
3. Аветисян А.С., Матюшев В.В., Чаплыгина И.А. Эффективность применения лопастного смесителя сыпучих компонентов в технологии производства экструдатов // Научно-практические аспекты развития АПК: мат-лы нац. науч. конф. (Красноярск, 12 ноября 2021 г.) / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2021. С. 61–64.
4. Анализ существующих и перспективных конструкций смесителей сыпучих компонентов / В.В. Матюшев [и др.] // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: мат-лы междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 21–23 апреля 2020 г.) / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2020. Ч. 2. С. 178–181.
5. Аветисян А.С. Совершенствование конструкции лопастного смесителя сыпучих компонентов // Инновационные тенденции развития российской науки: мат-лы XIV междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (Красноярск, 7–9 апреля 2021 г.) / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2021. Ч. 1. С. 398–400.
6. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 448 с.
7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2012. 816 с.
8. Численные методы при моделировании технологических машин и оборудования: учеб. пособие / Г.В. Алексеев [и др.]. СПб.: ГИОРД, 2014. 200 с.
9. 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.

References

1. Makarov Yu.I. Apparaty dlya smesheniya sypuchih materialov. M.: Mashinostroenie, 1973. 216 s.
2. Selivanov Yu.T., Pershin V.F. Raschet i proektirovanie cirkulyacionnyh smesitelej sypuchih materialov bez vnutrennih peremeshivayuschih ustrojstv. M.: Mashinostroenie-1, 2004. 120 s.
3. Avetisyan A.S., Matyushev V.V., Chaplygina I.A. `Effektivnost` primeneniya lopastnogo smesitelya sypuchih komponentov v tehnologii proizvodstva `ekstrudatov` // Nauchno-prakticheskie aspekty razvitiya APK: mat-ly nac. nauch. konf. (Krasnoyarsk, 12 noyabrya 2021 g.) / Krasnoyar. gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2021. S. 61–64.
4. Analiz suschestvuyuschih i perspektivnyh konstrukcij smesitelej sypuchih komponentov / V.V. Matyushev [i dr.] // Nauka i obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy razvitiya: mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Krasnoyarsk, 21–23 aprelya 2020 g.) / Krasnoyar. gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2020. Ch. 2. S. 178–181.
5. Avetisyan A.S. Sovershenstvovanie konstrukcii lopastnogo smesitelya sypuchih komponentov // Innovacionnyye tendencii razvitiya rossijskoj nauki: mat-ly XIV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh (Krasnoyarsk, 7–9 aprelya 2021 g.) / Krasnoyar. gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2021. Ch. 1. S. 398–400.
6. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. M.: Nauka, 1981. 448 s.
7. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika dlya inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. M.: Fizmatlit, 2012. 816 s.
8. Chislennyye metody pri modelirovaniy tehnologicheskikh mashin i oborudovaniya: ucheb. posobie / G.V. Alekseev [i dr.]. SPb.: GIORД, 2014. 200 s.
9. Pat. 192831 RU, МПКV01F7/02 (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.

Статья принята к публикации 19.04.2023 / The article accepted for publication 19.04.2023.

Информация об авторах:

Василий Викторович Матюшев¹, заведующий кафедрой товароведения и управления качеством продукции АПК, доктор технических наук, профессор

Артур Самвелович Аветисян², аспирант кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК

Ирина Александровна Чаплыгина³, доцент кафедры товароведения и управления качеством продукции АПК, кандидат биологических наук, доцент

Алексей Андреевич Беляков⁴, доцент кафедры агроинженерии, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

Vasily Viktorovich Matyushev¹, Head of the Department of Commodity Science and Quality Management of the Agroindustrial Complex, Doctor of Technical Sciences, Professor

Arthur Samvelovich Avetisyan², Postgraduate Student at the Department of Commodity Science and Quality Management of the Agroindustrial Complex

Irina Aleksandrovna Chaplygina³, Associate Professor at the Department of Commodity Science and Product Quality Management of the Agroindustrial Complex, Candidate of Biological Sciences, Docent

Alexey Andreyevich Belyakov⁴, Associate Professor at the Department of Agroengineering, Candidate of Technical Sciences, Docent

