

# Биохимический и пищевой инжиниринг Biochemical and food engineering

Научная статья

УДК 637.1

DOI: 10.14529/food240204

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ БАРАБАННОГО СМЕСИТЕЛЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ

**Д.М. Бородулин**<sup>1</sup>, [borodulin\\_dmitri@list.ru](mailto:borodulin_dmitri@list.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

**Д.В. Сухоруков**<sup>2</sup>, [pioner\\_dias@mail.ru](mailto:pioner_dias@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7995-3813>

**Ю.П. Суворова**<sup>2</sup>, [Yulia-suvorova-1998@mail.ru](mailto:Yulia-suvorova-1998@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-4921-9942>

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Россия

<sup>2</sup> Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

**Аннотация.** Процесс смешивания широко применяется в различных областях производства: для изготовления разных видов продукции и полуфабрикатов, таких как сельскохозяйственные смеси, суспензии, костные цементы и другие. Данный процесс представляет из себя перемещение частиц компонентов сыпучего материала в пространстве смешиваемого объема. Для приведения компонентов в движение применяются различные типы смесительных аппаратов. Одними из самых распространенных смесителей являются аппараты барабанного типа непрерывного действия. Важной проблемой, с которой необходимо справиться при разработке конструкции смесителя, является уменьшение значения коэффициента неоднородности получаемой смеси. Неоднородность сыпучей смеси связана с различными физико-химическими свойствами компонентов, из которых она состоит. К ним относятся плотность, сыпучесть, вязкость и др. Объектом исследования является новая конструкция барабанного смесителя с внутренним барабаном. Предметом исследования являются конструктивные особенности данного смесителя, среди которых длина образующей внутреннего барабана, угол наклона барабана и частота его вращения. Данные конструктивные особенности влияют на итоговое состояние смеси. Эксперименты, проведенные с различными показателями рабочих параметров смесителя, помогли выявить наиболее оптимальные значения этих параметров, при которых значение неоднородности смеси является минимальным. Всего проведено 27 экспериментов. Для наглядности все результаты приведены в виде графиков. По графикам видно, что оптимальное значение параметров: длина образующей внутреннего барабана 0,6 м, угол наклона аппарата  $\alpha = 5^\circ$  и частота вращения барабана  $n = 45$  об/мин. При данных значениях неоднородность смеси минимальна,  $V_c = 9,63\%$ .

**Ключевые слова:** процесс смешивания, сыпучая смесь, барабанный смеситель, внутренняя конструкция, сегрегация, неоднородность смеси, коэффициент неоднородности, рабочие параметры, качество смешивания, экспериментальные исследования

**Для цитирования:** Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В., Суворова Ю.П. Определение рациональных параметров работы барабанного смесителя при получении сыпучих продуктов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2024. Т. 12, № 2. С. 29–37. DOI: 10.14529/food240204

Original article  
DOI: 10.14529/food240204

## DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE DRUM MIXER OPERATION WHEN RECEIVING BULK PRODUCTS

**D.M. Borodulin**<sup>1</sup>, [borodulin\\_dmitri@list.ru](mailto:borodulin_dmitri@list.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

**D.V. Sukhorukov**<sup>2</sup>, [pioner\\_dias@mail.ru](mailto:pioner_dias@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7995-3813>

**Yu.P. Suvorova**<sup>2</sup>, [Yulia-suvorova-1998@mail.ru](mailto:Yulia-suvorova-1998@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-4921-9942>

<sup>1</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

**Abstract.** The mixing process is widely used in various areas of production: for the manufacture of various types of products and semi-finished products, such as agricultural mixtures, suspensions, bone cements and others. This process is the movement of particles of bulk material components in the space of the mixed volume. Various types of mixing apparatus are used to move the components. One of the most common mixers are continuous drum type mixers. An important problem that needs to be dealt with when developing a mixer design is reducing the coefficient of heterogeneity of the resulting mixture. The heterogeneity of the granular mixture is associated with different physical and chemical properties of the components of which it consists. These include density, flowability, viscosity, etc. The object of study is a new design of a drum mixer with an internal drum. The subject of the study is the design features of this mixer, including the length of the inner drum, the angle of inclination of the drum and the frequency of its rotation. These design features affect the final state of the mixture. Experiments conducted with various indicators of the mixer operating parameters helped to identify the most optimal values of these parameters, at which the value of mixture heterogeneity is minimal. A total of 27 experiments were carried out. For clarity, all results are presented in the form of graphs. The graphs show that the optimal value of the parameters is: the length of the internal drum generatrix is 0.6 meters, the angle of inclination of the apparatus is  $\alpha = 5^\circ$  and the drum rotation speed is  $n = 45$  rpm. At these values, the heterogeneity of the mixture is minimal,  $V_c = 9.63$  %.

**Keywords:** mixing process, bulk mixture, drum mixer, internal structure, segregation, mixture heterogeneity, heterogeneity coefficient, operating parameters, mixing quality, experimental studies

**For citation:** Borodulin D.M., Sukhorukov D.V., Suvorova Yu.P. Determination of rational parameters of the drum mixer operation when receiving bulk products. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2024, vol. 12, no. 2, pp. 29–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/food240204

### Введение

В настоящее время широко распространено производство сухих смесей в таких областях производства, как пищевая, химическая промышленность, сельскохозяйственная, фармацевтическая промышленность, строительное производство. Сухие смеси широко используются как в качестве готового продукта, так и в качестве полуфабриката. Например, сыпучие композиции применяют при получении суспензий и эмульсий, в производстве химических добавок, сельскохозяйственных комбикормов и удобрений, строительных смесей и композиционных материалов, при

получении биологически активных добавок, лекарственных препаратов и т. д. С постоянно растущим темпом жизни современного человека возрастает потребность в увеличении объемов производства продуктов. Для этого необходимо высокоэффективное оборудование. Поэтому актуальной задачей является разработка эффективных конструкций смесительных аппаратов, позволяющих производить требуемые объемы продукции высокого качества.

Для получения сыпучих композиций с соотношением смешиваемых компонентов до 1:60 широко используют барабанные аппара-

ты как непрерывного, так и периодического действия [2, 9, 10]. Барабанный смеситель является универсальным оборудованием, которое может быть использовано для получения как хорошо-, так и плохосыпучих смесей [2, 4, 11]. Относительно большой объем барабана и наличие в нем специальных элементов (лопастей, лопаток, вставок, ребер жесткости и т. д.) позволяет равномерно распределять смешиваемые компоненты друг относительно друга, способствует их интенсивному смешиванию [1, 5, 15]. Это позволяет получать сыпучие смеси заданного качества, отвечающие требованиям современного рынка.

Для получения качественной смеси необходимо обеспечить максимально равномерное распределение всех компонентов в смеси. Однако компоненты смеси могут иметь различные характеристики (плотность, вязкость и другие физико-химические свойства). Это затрудняет достижение необходимого результата. Решение этой проблемы находится в правильной настройке работы смесителя [7, 12, 13, 14].

Разработка нового смесителя требует не только описания его конструкции и принципа работы, но и проведения экспериментальных исследований при различных рабочих параметрах смесителя.

**Цель работы** – выявление оптимальных значений рабочих параметров смесителя, при которых получают смеси заданного качества.

Для достижения данной цели были проведены экспериментальные расчеты однородности смеси при различных рабочих параметрах для новой конструкции барабанного смесителя.

#### **Объект и предмет исследования**

Объектом экспериментальных исследований является новая конструкция барабанного смесителя, схема которого представлена на рис. 1.

Рассмотрим принцип работы исследуемого смесителя. Через устройство загрузки 6 сыпучие материалы подаются во вращающийся на роликах 2 совместно с барабаном 1 цилиндр 3, и, растекаясь по его поверхности, общий поток смешиваемых материалов делится на два потока, один из которых продолжает движение внутри цилиндра, а второй высыпается через спиральный вырез. Образовавшиеся потоки циркулируют одновременно как в продольном, так и в поперечном направлении, создавая скрещивающиеся и рециркуляционные потоки, относительно оси

барабана, при этом смешиваясь в общий поток, движущийся вдоль барабана 1. Поток материала, находящийся в полости между цилиндром 3 и барабаном 1, попадает на пластины-ворошители 4 и, поднимаясь на них вверх, ссыпается на поверхность цилиндра 5, частично попадая через спиральный вырез внутрь него. Готовая смесь выводится из цилиндра на конвейер. Предложенное конструктивное решение позволяет увеличить время нахождения частиц внутри аппарата.

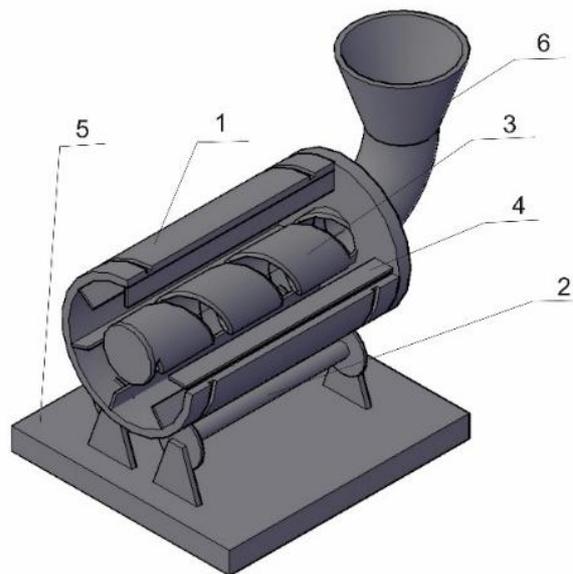


Рис. 1. Барабанный смеситель с центральным барабаном

Данный смеситель имеет ряд конструктивных характеристик, при изменении которых изменяется и итоговое качество конечной смеси. К таким параметрам относятся длина образующей внутреннего барабана, угол наклона барабана и частота вращения барабана. В качестве критерия оценки качества смешивания использовали коэффициент неоднородности  $V_c$  [3, 6, 8].

Первым этапом провели предварительные эксперименты по определению степени сыпучести компонентов исследуемой смеси.

Вторым этапом было проведение экспериментов по смешиванию компонентов смеси и расчету коэффициента неоднородности при различных значениях рабочих параметров смеси. Итоговая смесь разделялась на одинаковые по весу пробы и для каждой вычислялись массовая концентрация ключевого компонента –  $c_i$  и средняя концентрация ключевого компонента –  $\bar{c}$ . Коэффициент неоднородности вычислялся по формуле

$$V_c = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{c}} 100 \% = \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} * 100 \%, \quad (1)$$

в которой присутствует среднее квадратичное отклонение ( $\bar{\sigma}$ ), рассчитываемое по формуле

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\bar{\sigma}^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} \quad (2)$$

и математическое ожидание ( $m$ ), которое находим по формуле

$$m = \bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \quad (3)$$

где  $n$  – число проб, отобранных из смеси.

Последним этапом было составление таблицы значений коэффициента неоднородности и построение графиков его зависимости от рабочих параметров барабанного смесителя.

### Результаты работы

Результатом первого этапа эксперимента является значение сыпучести компонентов исследуемой смеси. Выбор рецептуры основывался на распространенности и популярности смеси для энтерального питания. Поэтому в качестве модельной смеси была выбрана одна смесь: Nutrien, состоящая из хорошо- и плохосыпучих компонентов. Полный состав смеси, из расчета на 1 кг готового продукта, представлен в табл. 1 [16].

В качестве ключевого компонента выбрали полунасыщенные жирные кислоты. Их содержание в конечном продукте определяли методом ситового анализа.

Смешивание композиции проводили на разработанном смесителе, поочередно варьируя его конструктивные и режимные параметры работы. Диапазон рабочих параметров представлен в табл. 2.

В результате проведенного эксперимента получили значения массы набранной пробы и массы ключевого компонента в каждой пробе. По этим данным с помощью приведенных выше формул (1)–(3) вычислили коэффициенты неоднородности  $V_c$  лабораторной готовой смеси, варьируя рабочие параметры. Зависимость коэффициента неоднородности от исследуемых параметров рассматриваемого смесителя представлена в табл. 3.

Для наглядности полученные данные представили в виде графиков, разделив их на три группы.

На первом графике представлена зависимость коэффициента неоднородности от длины образующей смесителя для угла наклона  $5^\circ$  (рис. 2).

Из графика видно, что скорости в 30 об/мин недостаточно для интенсивного смешивания, при увеличении длины смесителя коэффициент неоднородности уменьшается, но незначительно. При скорости 45 об/мин происходит более интенсивное смешивание. С увеличением длины барабана уменьшается неоднородность смеси, и при значении длины 0,6 м достигается минимальное значение ко-

Таблица 1

Наименование материала	Масса $m$ , г	Насыпная плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Дисперсность частиц, мкм	Влажность $W$ , %	Сыпучесть	Высота устойчивого откоса, $H_c$ , мм
Насыщенные жк	83	700...750	300...500	5..10	Хорошосыпучий	10..50
Мононенасыщенные жк	63	900..1000	200..1000	Не более 3	Хорошосыпучий	0..60
Казеин	185	530...570	80...120	10...16	Плохосыпучий	150...200
Полунасыщенные жк	36	1400...1500	200...600	5...7	Хорошосыпучий	40...45
Линоливая кислота	29	870...920	900...1200	0,05...0,1	Хорошосыпучий	0..40
Белок	185	440...460	20...250	До 4	Плохосыпучий	140...180
Жиры	183	550..570	100...350	15...20	Плохосыпучий	190...250
Другие компоненты (глюкоза, мальтоза и т. д.)	236	700..1000	100..1000	5..10	Хорошосыпучий	10..60

Таблица 2

Конструктивные		Режимные
Угол наклона ( $\alpha$ )	Длина образующей (l)	Частота вращения (n)
5°	0,4 м	30 об/мин
7°	0,5 м	45 об/мин
10°	0,6 м	60 об/мин

Таблица 3

№	$\alpha$	l, м	n, об/мин	$V_c$ , %
1	5°	0,4	30	13,53
2	5°	0,5	30	12,96
3	5°	0,6	30	12,97
4	5°	0,4	45	11,12
5	5°	0,5	45	10,13
6	5°	0,6	45	9,63
7	5°	0,4	60	11,46
8	5°	0,5	60	13,32
9	5°	0,6	60	12,99
10	7°	0,4	30	13,15
11	7°	0,5	30	12,53
12	7°	0,6	30	13,09
13	7°	0,4	45	12,66
14	7°	0,5	45	12,71
15	7°	0,6	45	13,26
16	7°	0,4	60	14,02
17	7°	0,5	60	12,13
18	7°	0,6	60	13,91
19	10°	0,4	30	12,49
20	10°	0,5	30	12,15
21	10°	0,6	30	12,31
22	10°	0,4	45	12,12
23	10°	0,5	45	11,33
24	10°	0,6	45	12,2
25	10°	0,4	60	11,76
26	10°	0,5	60	12,33
27	10°	0,6	60	12,25

коэффициента неоднородности. При увеличении скорости до 60 об/мин происходит интенсивное смешивание, минимальное значение достигается при длине 0,4 м. Но при продолжительном нахождении смеси в аппарате начинается ее расслоение, что приводит к увеличению коэффициента неоднородности смеси.

Далее рассмотрим график зависимости коэффициента неоднородности от ширины

образующей для угла наклона равного 7° (рис. 3).

При увеличении угла наклона смесь быстрее проходит вдоль смесителя и смешивание проходит более интенсивно. При скорости 30 об/мин длины барабана, равной 0,4 м, недостаточно для полного перемешивания, при длине 0,5 м достигается минимальное значение неоднородности, а при большей длине барабана смесь начинает расслаиваться. При 45 об/мин минимальное значение неоднородности достигается при длине барабана 0,4 м, при увеличении длины увеличивается время нахождения смеси в аппарате, приводя к расслоению смеси. Когда скорость равна 60 об/мин и длина барабана равна 0,4 м, смесь находится малое количество времени в аппарате, следовательно, не успевает перемешаться. Минимальное значение коэффициента неоднородности достигается при длине барабана 0,5 м, при увеличении длины увеличивается время нахождения смеси внутри барабана, что ведет к ее расслоению и диспергированию частиц.

И последним рассмотрим график зависимости коэффициента неоднородности от ширины образующей для угла наклона 10° (рис. 4).

При угле наклона 10° скорость прохождения вдоль оси барабана быстрее, чем при 5° и 7°. При скоростях 30 и 45 об/мин наименьшее значение коэффициента неоднородности достигается при длине 0,5 м. Длины 0,4 м не хватает для интенсивного смешивания, так как смесь меньше времени находится в смесителе, а при длине 0,6 м происходит расслоение смеси и диспергирование её частиц. При скорости 60 об/мин для перемешивания смеси достаточно длины 0,4 м, увеличение длины приводит к увеличению времени нахождения смеси внутри барабана, а следовательно, к диспергированию ее частиц.

Полученные данные показывают, что наименьшее значение коэффициента неоднородности смеси получается при длине барабана 0,6 м, угле наклона 5° и скорости ротора 45 об/мин.

#### Вывод

Для новой конструкции барабанного смесителя были проведены 27 экспериментальных исследований с различными значениями для ширины образующей, угла наклона барабана и частоты вращения барабана. Наименьшее значение неоднородности смеси достига-

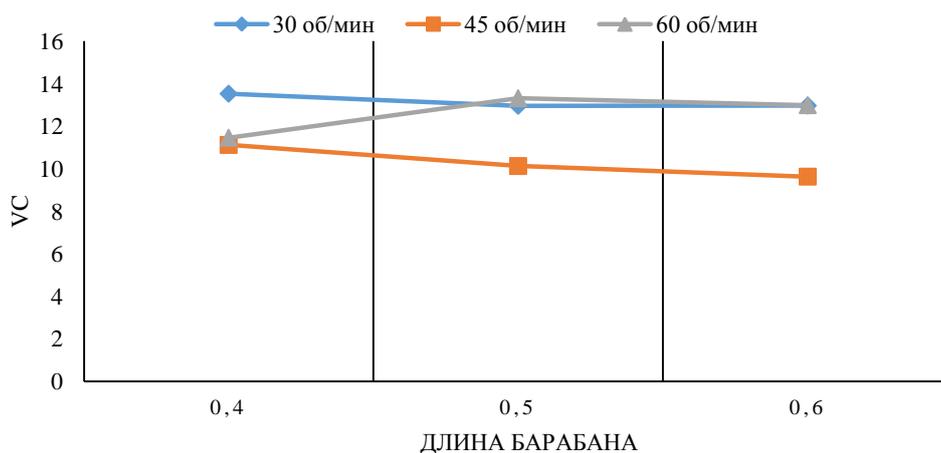


Рис. 2. График зависимости коэффициента неоднородности для угла наклона 5°

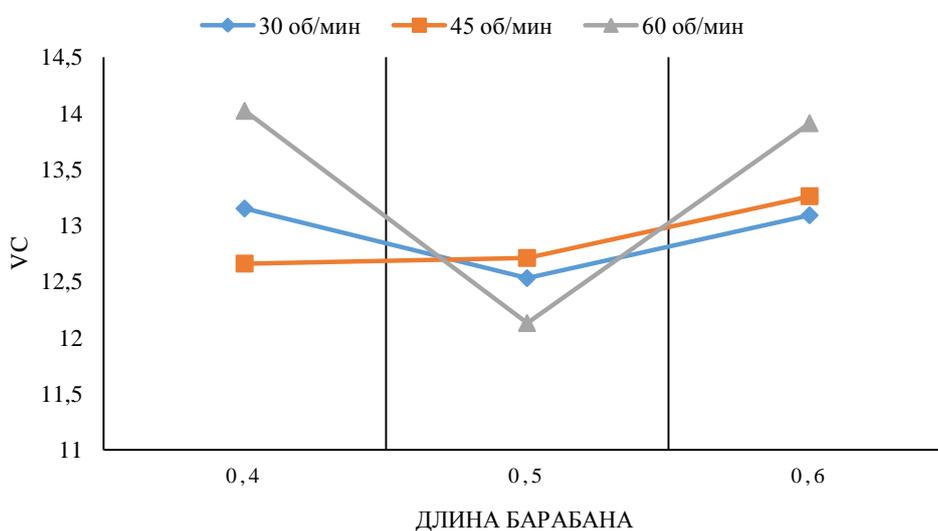


Рис. 3. График зависимости коэффициента неоднородности для угла наклона 7°

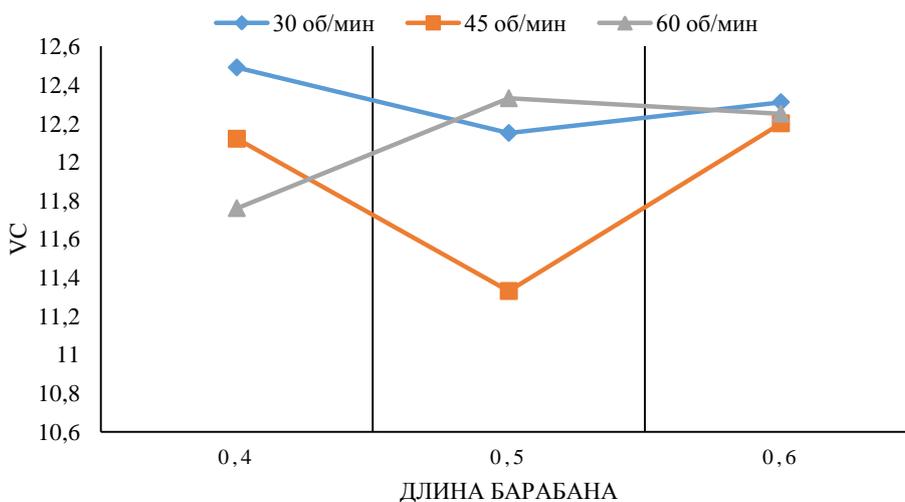


Рис. 4. График зависимости коэффициента неоднородности для угла наклона 10°

ется при ширине образующей, равной 0,6 метра, угле наклона аппарата  $\alpha = 5^\circ$  и частоте вращения барабана  $n = 45$  об/мин и равна  $V_c = 9,63$  %. Результаты показали, что большое значение скорости и большая длина смесителя (60 об/мин и 0,6 м) приводят к диспергированию частиц смеси из-за длительного нахождения компонентов в барабане и взаимодействия с внутренним барабаном. Это увеличивает коэффициент неоднородности и ухудшает качество готового продукта. Малый угол наклона смесителя и большая скорость ( $5^\circ$  и 60 об/мин) вращения приводят к рас-

слоению смеси, так как в результате длительного нахождения компонентов внутри барабана более легкие, пылевидные частицы стремятся вверх, а крупные частицы и их агломераты остаются в нижней части барабана. Следствием большого угла наклона и малой длины барабана ( $10^\circ$  и 0,3 м) является малое время нахождения смеси в барабане, недостаточное для идеального смешивания. Выход за пределы граничных условий приводит к значительному увеличению коэффициента неоднородности (свыше 15 %), что говорит о получении смеси неудовлетворительного качества.

### Список литературы

1. Балагуров И.А. и др. Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов / И.А. Балагуров, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2014. № 6. С. 67–70.
2. Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В., Комаров С.С. Применение барабанного смесителя в линии производства йогуртного продукта // Молочная промышленность. 2015. № 12. С. 20–21.
3. Верлока И.И., Зайцев А.И., Лебедев А.Е. Способ определения коэффициента неоднородности смеси трудноразделимых сыпучих материалов // Шестдесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции. Электронное издание. Ярославский государственный технический университет. 2016. С. 492–494.
4. Капранова А.Б., Бакин М.Н., Верлока И.И. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. Т. 54, № 5. С. 3.
5. Капранова А.Б. и др. Стохастическая модель смешения сыпучих материалов методом ударного воздействия / А.Б. Капранова, О.И. Кузьмин, В.А. Васильев, А.И. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2008. Т. 51, № 4. С. 72–74.
6. Лебедев А.Е., Зайцев А.И., Петров А.Б. Метод определения коэффициента неоднородности смеси при взаимодействии разреженных потоков // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2012. Т. 55, № 11. С. 119–121.
7. Мизонов В.Е., Berthiaux Н. Смешивание сыпучих материалов: от математического моделирования к новым конструкциям смесителей // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование: материалы пленарной сессии Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н. Косыгина». 2019. С. 49–52.
8. Патент на изобретение RU 2515009 С1. Способ определения коэффициента неоднородности смеси трудноразделимых сыпучих материалов / А.И. Зайцев, А.Е. Лебедев, А.Б. Капранова, А.И. Чадаев, А.А. Петров. № 2012155904/05; заяв. 21.12.2012. Оpubл. 10.05.2014.
9. Патент на изобретение RU 2643962 С1. Барабанный смеситель / Д.В. Бородулин, Д.М. Иванец, В.Н. Андрюшков, А.А. Сухоруков. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)». № 2016149974; заявл. 19.12.2016; опубл. 06.02.2018. Бюл. № 4.
10. Потапова М.Н., Шулбаева М.Т., Комаров С.С. Барабанный смеситель непрерывного действия с подведением энергии вибрации // Пищевые инновации в биотехнологии: сборник тезисов VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. А.Ю. Просекова. 2018. С. 269–272.

11. Резниченко И.Ю. и др. Определение рациональных технологических параметров работы барабанного смесителя непрерывного действия при получении безглютеновой мучной смеси / И.Ю. Резниченко, Д.М. Бородулин, А.В. Шафрай [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 4. С. 152–165.

12. Смолин Д.О., Дёмин О.В., Першин В.Ф. Математическая модель смешивания сыпучих материалов в лопастных смесителях // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 154.

13. Сухоруков Д.В. и др. Определение рациональных конструктивных параметров, влияющих на качество смешивания / Д.В. Сухоруков, Д.М. Бородулин, Н.В. Кузьмина, А.П. Коваленко // Пищевые инновации и биотехнологии: сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 17 мая 2022 года / под общ. ред. А.Ю. Просекова. Том 2. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. С. 73–74.

14. Черпицкий С.Н., Таршис М.Ю. Экспериментальные исследования влияния режимных параметров на качество смеси в новом смесителе сыпучих материалов // Семьдесят вторая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции: в 3-х частях. 2019. С. 25–27.

15. Borodulin D.M. et al. Simulation of mixing process in drum mixer with different topology of material flows / D.M. Borodulin, I.A. Bakin, D.V. Sukhorukov, S.A. Ratnikov // International scientific and practical conference “Agro-SMART – Smart solutions for agriculture” (Agro-SMART 2018). 2018. С. 685–689.

16. URL: <https://nutrien-medical.com/products/nutrien-standart-sukhaya-smes/?ysclid=1waplg6as5117949499>

### References

1. Balagurov I.A., Mizonov V.E., Berthiaux H. & Gatamel C. Modeling of the kinetics of mixing of heterogeneous bulk materials. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*, 2014, no. 6, pp. 67–70 (In Russ.)

2. Borodulin D.M., Sukhorukov D.V. & Komarov S.S. Application of the drum mixer in the yogurt product production line. *Dairy industry*, 2015, no. 12, pp. 20–21. (In Russ.)

3. Verloka I.I., Zaitsev A.I., Lebedev A.E. A method for determining the inhomogeneity coefficient of a mixture of hard-to-separate bulk materials. *Sixty-ninth All-Russian Scientific and Technical Conference of students, undergraduates and postgraduates of higher educational institutions with international participation*. Collection of conference materials. Electronic edition. Yaroslavl State Technical University, 2016, pp. 492–494. (In Russ.)

4. Kapranova A.B., Bakin M.H. & Verloka I.I. Modeling of the quality criterion of a mixture in the volume of a drum-tape device. *Chemical and oil and gas engineering*, 2018, no. 5, p. 3. (In Russ.)

5. Kapranova A.B., Kuzmin O.I., Vasiliev V.A., Zaitsev A.I. Stochastic model of mixing of bulk materials by the impact method. *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*, 2008, no. 4, pp. 72–74. (In Russ.)

6. Lebedev A.E., Zaitsev A.I., Petrov A.B. Method for determining the inhomogeneity coefficient of a mixture in the interaction of rarefied flows. *Izvestia of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*, 2012, no. 11, pp. 119–121. (In Russ.)

7. Mizonov V.E. & Berthiaux H. Mixing of bulk materials: from mathematical modeling to new mixer designs. Energy resource-efficient environmentally safe technologies and equipment. Materials of the plenary session of the International Scientific and Technical Symposium “The second International Kosygin Readings dedicated to the 100th anniversary of the A.N. Kosygin Russian State University”, 2019, pp. 49–52. (In Russ.)

8. Zaitsev A.I., Lebedev A.E., Kapranova A.B., Chadaev A.I. & Petrov A.A. *Patent na izobretenie RU 2515009 C1. Sposob opredeleniya koeffitsienta neodnorodnosti smesi trudnorazdelimyykh sypuchikh materialov* [Patent for the invention RU 2515009 C1. A method for determining the coefficient of heterogeneity of a mixture of hard-to-separate bulk materials]. No. 2012155904/05; application. 21.12.2012; publ. 10.05.2014.

9. Borodulin D.M., Ivanets V.N., Andryushkov A.A., Sukhorukov D.V. *Patent na izobrenenie RU 2643962 C1. Barabannyu smesitel'* [Patent for the invention RU 2643962 C1. Drum mixer]. No. 2016149974; application 19.12.2016; publ. 06.02.2018.
10. Potapova M.N., Shulbaeva M.T. & Komarov S.S. Drum mixer of continuous action with the summing up of vibration energy. *Food innovations in biotechnology. Collection of abstracts of the VI International Scientific Conference of Students, Aspirants and Young Scientists*, 2018, pp. 269–272. (In Russ.)
11. Reznichenko I.Yu., Borodulin D.M., Shafry AV. et al. Determination of rational technological parameters of the operation of a continuous-action drum mixer in the production of gluten-free flour mixture. *Storage and processing of agricultural raw materials*, 2020, no. 4, pp. 152–165. (In Russ.)
12. Smolin D.O., Demin O.V. & Pershin V.F. (2013) Mathematical model of mixing bulk materials in paddle mixers. *Modern problems of science and education*. (no. 2.) 154 (In Russ.)
13. Sukhorukov D.V., Borodulin D.M., Kuzmina N.V. & Kovalenko A.P. Determination of rational design parameters affecting the mixing quality. *Food innovations and Biotechnologies: A collection of abstracts of the X International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*, 2022, no. 2, pp. 73–74 (In Russ.)
14. Cherpitsky S.N., Tarshis M.Yu. Experimental studies of the influence of regime parameters on the quality of a mixture in a new mixer of bulk materials. *Seventy-second All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and postgraduates of higher educational institutions with international participation. Collection of conference materials*, 2019, pp. 25–27. (In Russ.)
15. Borodulin D.M., Bakin I.A., Sukhorukov D.V., Ratnikov S.A. Simulation of mixing process in drum mixer with different topology of material flows. *International scientific and practical conference "Agro-SMART – Smart solutions for agriculture" (Agro-SMART 2018)*, 2018, pp. 685–689.
16. URL: <https://nutrien-medical.com/products/nutrien-standart-sukhaya-smes/?ysclid=lwaplg6as5117949499>

#### **Информация об авторах**

**Бородулин Дмитрий Михайлович**, доктор технических наук, директор технологического института, профессор кафедры технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева», Москва, Россия, borodulin\_dmitri@list.ru

**Сухоруков Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерного дизайна, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово, Россия, pioner\_dias@mail.ru

**Суворова Юлия Павловна**, аспирант кафедры инженерного дизайна, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово, Россия, yulia-suvorova-1998@mail.ru

#### **Information about the authors**

**Dmitriy M. Borodulin**, Doctor of Sciences (Engineering), Director of the Technological Institute, Professor of the Department of Technology of Storage and Processing of Fruits, Vegetables and Plant Growing Products, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia, borodulin\_dmitri@list.ru

**Dmitriy V. Sukhorukov**, Candidate of Sciences (Engineering), docent of Department of Engineering Design, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, pioner\_dias@mail.ru

**Yulia P. Suvorova**, Postgraduate Student, Department of Engineering Design, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, yulia-suvorova-1998@mail.ru

**Статья поступила в редакцию 10.12.2023**

**The article was submitted 10.12.2023**