ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-196-208
УДК 664.65.05

Оригинальная статья
http://fptt.ru

Определение рациональных параметров работы вибрационного смесителя для получения мучных сыпучих смесей

Д. М. Бородулин[1], Д. В. Сухоруков[1,*], О. Н. Мусина[2,3], М. Т. Шулбаева[1], Т. В. Зорина[1], Д. И. Киселев[1], Е. С. Миллер[1]

[1] Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

[2] Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, Барнаул, Россия

[3] Алтайский государственный технический университет им И. И. Ползунова, Барнаул, Россия

Дата поступления в редакцию: 22.01.2021

Дата принятия в печать: 19.03.2021

**e-mail: pioner_dias@mail.ru*

© Д. М. Бородулин, Д. В. Сухоруков, О. Н. Мусина, М. Т. Шулбаева, Т. В. Зорина, Д. И. Киселев, Е. С. Миллер, 2021

Аннотация.
Введение. Перспективным направлением развития рационального здорового питания является получение мучных сыпучих смесей, способных длительное время храниться без изменения качества, для производства хлебобулочных изделий. Получение данных смесей на вибрационных смесителях непрерывного действия недостаточно изучено, поэтому данные исследования являются актуальными. Цель работы – выявление рациональных параметров работы вибрационного смесителя для получения мучных сыпучих смесей.
Объекты и методы исследования. Порошкообразные сыпучие композиции на основе пшеничной муки. На основе корреляционного анализа описаны математические модели процесса смешивания в вибрационных смесителях, реализующих метод «последовательного разбавления», с целью сравнения значений сглаживающей способности смесителей и выявления целесообразности использования исследуемого смесителя. Экспериментальные исследования проводили на лабораторном стенде. Для определения рациональных параметров работы аппарата при получении мучных сыпучих смесей проведены 2 полнофакторных эксперимента.
Результаты и их обсуждение. Рассмотрены вопросы влияния неравномерности подачи сыпучих материалов на качество готовых композиций. Описано состояние и перспективы развития современного смесеприготовительного оборудования. Обоснован выбор вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия в качестве основы для поиска технического решения. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния амплитуды A (м) и частоты колебаний f (Гц), угла вибрации β (°), а также высоты виброкипящего слоя на процесс смесеприготовления мучных сыпучих смесей.
Выводы. В результате полнофакторного эксперимента были определены рациональные технологические параметры работы нового вибрационного смесителя, при которых достигается наилучшее качество получаемых мучных сыпучих смесей: A = 0,0046 м, рабочая частота колебания f = 33,48 Гц, доля ключевого компонента соли пищевой – 0,05. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение смесителя обеспечивает равномерность перемешивания ингредиентов и высокое качество смешивания мучных хлебопекарных смесей.

Ключевые слова. Смеситель, порошкообразные композиции, пшеничная мука, метод «последовательного разбавления», сглаживающая способность

Для цитирования: Определение рациональных параметров работы вибрационного смесителя для получения мучных сыпучих смесей / Д. М. Бородулин, Д. В. Сухоруков, О. Н. Мусина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2021. – Т. 51, № 1. – С. 196–208. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-196-208.

Original article

Available online at http://fptt.ru/eng

Flour Baking Mixes: Optimal Operating Parameters for Vibration Mixers

Dmitry M. Borodulin[1], Dmitry V. Sukhorukov[1,*], Olga N. Musina[2,3], Margarita T. Shulbaeva[1], Tatyana V. Zorina[1], Dmitry I. Kiselev[1], Ekaterina S. Miller[1]

[1] Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

[2] Altai Research Institute of Agriculture, Barnaul, Russia

[3] Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Received: January 22, 2021 Accepted: March 19, 2021

*e-mail: pioner_dias@mail.ru
© D.M. Borodulin, D.V. Sukhorukov, O.N. Musina, M.T. Shulbaeva, T.V. Zorina, D.I. Kiselev, E.S. Miller, 2021

Abstract.
Introduction. New long-storage flour baking mixes are a promising direction in the development of healthy diets. The research objective was to identify the rational parameters for using continuous vibration mixers in flour production.
Study objects and methods. The study featured wheat flour baking mixes. A correlation analysis helped to build mathematical models of the mixing process in vibration mixers using the sequential dilution method. By comparing the smoothing ability of several mixers, the authors identified their feasibility. The research included two full-factor laboratory experiments.
Results and discussion. The paper gives a brief review of modern mixing equipment and describes the effect of uneven feeding of bulk materials on the quality of the finished mixes. The vertical vibration mixers proved to be an optimal technical solution. The experiment featured the effect of the amplitude A (m), vibration frequency f (Hz), vibration angle β (°), and the height of the vibrofluidized bed on the process.
Conclusion. The research revealed the following optimal technological parameters: A = 0.0046 m, f = 33.48 Hz, the share of food salt = 0.05. Continuous vibration mixers provided uniform high-quality baking mixes.

Keywords. Mixer, powdered compositions, wheat flour, serial dilution method, smoothing ability

For citation: Borodulin DM, Sukhorukov DV, Musina ON, Shulbaeva MT, Zorina TV, Kiselev DI, et al. Flour Baking Mixes: Optimal Operating Parameters for Vibration Mixers. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(1):196–208. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-196-208.

Введение

Проблема здорового питания актуальна для большинства стран, в том числе и для Российской Федерации.

Одно из наиболее перспективных направлений развития тенденции полезного питания – производство сыпучих мучных смесей, которые могут храниться длительное время без изменения качества выпечки [1, 2]. Многокомпонентность смесей позволяет сбалансировать их состав и разрабатывать продукты, обладающие комплексным действием и способствующие укреплению защитных свойств человеческого организма.

Существует много исследований, касающихся производства сыпучих мучных смесей в различных типах смесителей [3–5]. Однако производство этих смесей в вибрационных смесителях непрерывного действия изучено недостаточно, поэтому данное исследование является актуальным.

Анализ публикаций, которые посвящены вопросам смешения сыпучих композиций, показывает все трудности этого процесса.

Процесс смешения сыпучих композиций можно представить как объемное перемещение частиц двух и более компонентов для получения однородной среды (по составу, физико-механическим и др. свойствам). Для смешивания сыпучих материалов нужно приложить внешние усилия, которые позволяют частичкам смешиваемых компонентов передвигаться друг относительно друга. В нем можно выделить следующие основные составляющие: перенос объемов смешиваемых компонентов; деформирование; микродеформирование смешиваемых масс внутри отдельных объемов и между ними.

Процесс смешивания носит случайный характер. В связи с этим большинство методик оценки характера смешения берут за основу методы статистического анализа.

К ключевому компоненту предъявляются следующие требования:
– его содержание в смеси должно быть в небольшом количестве;
– его физически свойства должны быть отличаемы от остальных компонентов;
– его содержание в пробе можно просто определить.

Неоднородность смеси, получаемой в смесителе непрерывного действия, зависит от ряда причин: подача исходных компонентов в вибрационный смеситель осуществляется неравномерно; при недостаточном смешении сыпучей смеси возникает отклонение распределения частиц компонентов от среднего; присутствие в сыпучей композиции конгломератов компонентов.

Для сравнительной оценки перемешивающих устройств используют такие понятия, как эффективность и интенсивность перемешивания.

Эффективность перемешивания определяется количеством энергии, которую необходимо затратить на достижение технологического эффекта. На нее влияют гранулометрический состав смеси (размеры, форма и т. д.), плотность исходных компонентов, состояние поверхности частиц и их влажность, сила трения и т. д.

Интенсивность перемешивания – это время, которое необходимо для достижения заданного технологического результата. Интенсификация процессов смешения приводит к уменьшению размеров аппарата и увеличению его производительности [6].

Известен ряд способов смешения компонентов: периодическое смешивание и непрерывный поточный метод.

Периодическое смешивание осуществляется в течение некоторого времени и состоит из следующих процессов: конвективного и диффузионного смешения, а также сегрегации частиц.

Все эти процессы в аппарате происходят одновременно, но в различные периоды смешения они играют разную роль. В самом начале процесса на уровне макрообъемов смеси преобладает конвективное смешение, т. е. происходит переход гранул из слоя в слой за счет составляющей вектора скорости, которая в данный момент не зависит от физико-химических свойств частиц ингредиентов. На этом этапе важную роль играет характер движения рабочих органов аппарата и сыпучей композиции, объем аппарата, его параметры и конструкция. Смешивание считается диффузионным, если передвижения частиц относительно друг друга осуществляется случайным образом и в различные стороны. Диффузионное смешение в этот период незначительно, т. к. граница раздела между ингредиентами смеси невелика. На данный момент скорость смешения высока [7].

После распределения ингредиентов смеси по всему объему аппарата начинает преобладать диффузионное смешение, которое протекает на уровне микрообъемов. После чего, наряду с диффузионным смешением, на процесс начинает влиять сегрегация частиц. Затем наступает момент, когда эти процессы уравновешивают друг друга. Следовательно, дальнейшее смешение больше не имеет смысла и процесс необходимо закончить.

Альтернативой периодическому способу смешения может служить непрерывный поточный метод. Он легче поддается автоматизации и более производителен, т. к. смесители выполняют работу быстрее за счет того, что компоненты одновременно смешиваются и транспортируются к разгрузочному патрубку, достигая однородности. Однако из-за непрерывной подачи компонентов смеси дозаторами дискретного действия у готового продукта на выходе из аппарата получается неоднородный состав. Поэтому смеситель должен обладать хорошей сглаживающей способностью флуктуаций расходов питающих входящих потоков [8–10].

С увеличением расходов ингредиентов, т. е. когда доля «ключевого» компонента к «фоновому» становится более чем 1:100, получать смесь заданного качества становится все труднее. В этом случае «ключевой» ингредиент сначала смешивается с частью «фонового», а затем с основной массой. Метод «последовательного разбавления» позволяет сдвигать ограничения в соотношениях расходов составляющих композиции в сторону больших значений. Принципиально этот способ в смесителях периодического действия может быть реализован путем подачи компонентов в аппарат в определенной последовательности, т. е. с разрывом во времени. В оборудовании непрерывного действия осуществить метод «последовательного разбавления» значительно сложнее, т. к. требуется подача ингредиентов в разные его зоны [11, 12].

На выбор непрерывного или периодического смешивания влияют свойства компонентов: размер частиц, их форма, удельный вес, влажность и др.

Цель работы – выявление рациональных параметров работы вибрационного смесителя для получения мучных сыпучих смесей.

Объекты и методы исследования

В качестве материалов использовали порошкообразные сыпучие композиции на основе пшеничной муки.

На первом этапе работы рассмотрены вопросы влияния неравномерности подачи сыпучих материалов на качество готовых композиций. Описано состояние и перспективы развития современного смесеприготовительного оборудования. Обоснован выбор вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия в качестве основы для поиска технического решения.

На втором этапе на основе корреляционного анализа описаны математические модели процесса смешивания в исходных конструкциях и оригинальном вибрационном СНД, реализующий метод «последовательного разбавления», с целью сравнения значений сглаживающей способности.

Третий этап посвящен описанию лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований.

Для проведения технологической фазы производства сыпучих мучных смесей необходимо соблюдение следующих условий: предотвращение образование конгломератов смешанных частиц или их фактическое разрушение; стабильная подача ингредиентов в вибросмесителе; максимальное снижение влияния погрешности дозирования исходных компонентов на качество конечной смеси; высокая производительность и интенсивность процесса смешивания.

Для исследования процесса смешивания мучных сыпучих смесей был разработан лабораторно-экспериментальный стенд, который состоит из: опытно-промышленного образца смесителя

вибрационного типа с дозировочным оборудованием, ленточных конвейеров, пульта управления и строботахометра.

В связи с необходимостью изменения в широком диапазоне режимов работы вибрационного СНД и дозирующих устройств в качестве электроприводов использовали электродвигатели постоянного тока. В качестве источника постоянного тока с регулируемым напряжением использовалась электроустановка, которая состояла из лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), мостового выпрямителя ВМ-25, вольтметра и амперметра.

Частота вращения рабочих органов дозирующего оборудования и вибросмесителя замерялись строботахометром.

Ленточные и дискретные пробоотборники использовались для анализа однородности образца конечной смеси. Эффективность непрерывно действующих смесительных агрегатов при производстве высококачественных мучных смесей зависит от постоянства питающих потоков исходных ингредиентов. Это, в свою очередь, зависит от типа и надежности дозировочного оборудования.

При исследованиях были применены объемные дозаторы дискретного и непрерывного действия [13]. Вибрационные смесители хорошо сглаживают флуктуации (погрешности дозирования) питающих материалопотоков, формируемые этими дозаторами.

Одним из важнейших требований является организация движения материальных потоков внутри рабочей камеры устройства, устранение застойных участков и создание дополнительных точек пересечения для генерации материальных потоков. Неоднородность в подаче исходных ингредиентов может быть случайной и закономерной. В первом случае количество представленного материала через равные временные промежутки зависит от изменения скорости измерительного устройства, неоднородности структуры материала и тому подобное. Способность смесителей корректировать колебания потоков материала зависит от организации движения материальных потоков и количества материала, который они содержат [14, 15]. Поэтому при разработке новой конструкции вибрационного смесителя необходимо активировать виброкипение рабочих материалов и увеличить соотношение смешанных компонентов. На основе этого мы разработали конструкцию вибрационного СНД (рис. 1).

На рисунке 1 представлена конструкция разработанного вибрационного СНД, реализующего метод «последовательного разбавления» смеси (Патент RU 2626415C1). Инерционный двухвальный четырехдебалансный инерционный вибратор в представленной работе выполняет роль вибропривода [16, 17].

На четвертом этапе исследования приведены результаты экспериментальных исследований [18]. В качестве влияющих параметров были использованы: угол вибрации (β = 30, 45 и 60º), амплитуда вибрации (A = 0,0025, 0,0035 и 0,0045 м) и частота вибрации (f = 16,71, 22, 26, 28 и 33,48 Гц).

Угол вибрации регулировался путем поворота дебалансов относительно оси.

Амплитуда колебаний установки изменялась путем увеличения или уменьшения массы дебалансов.

Частота вибрации регулировалась изменением напряжения, подаваемого на электродвигатель вибропривода посредством ЛАТРа.

После анализа отечественного и зарубежного рынка сырья для экспериментальных исследований были выбраны две сухие мучные смеси с различными качественными характеристиками ингредиентов (плотностью, фракционным составом, влажностью). Размер частиц смеси 1 составил 40–190 мкм, для смеси 2 – 5–400 мкм. Состав смесей представлен

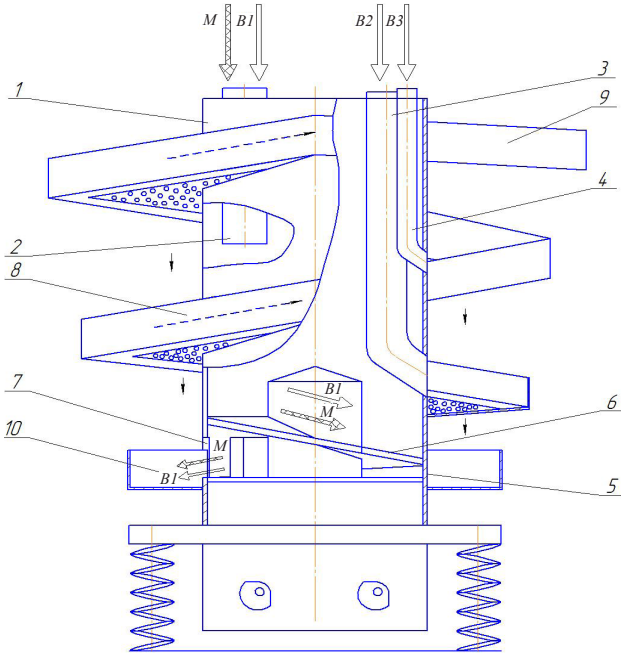


Рисунок 1. Схема разработанного вибрационного смесителя: *M* – ключевой компонент («малый»); *B1*, *B2*, *B3* – фоновые компоненты («большие»); *1* – загрузочный бункер; *2*, *3*, *4* – патрубки ввода сыпучих ингредиентов; *5* – дно; *6* – винтовой лоток; *7* – сквозное отверстие; *8* – винтовой перфорированный лоток; *9* – выгрузочный патрубок; *10* – сплошной кольцевой лоток

Figure 1. Schematic diagram of the new vibration mixer: *M* – key component; *B1*, *B2*, *B3* – background components; *1* – loading hopper; *2*, *3*, *4* – input branch pipes; *5* – bottom; *6* – screw tray; *7* – through hole; *8* – perforated screw tray; *9* – unloading branch pipe; *10* – solid circular tray

Таблица 1. Состав мучных сыпучих смесей

Table 1. Composition of the flour mixes

Наименование сырья	Расход сырья, кг	
	Смесь 1	Смесь 2
Пшеничная хлебопекарная мука, I сорт	82,6	73,3
Пищевая соль	1,5	1,6
Сахар белый	1,8	2,1
Кунжутная мука	4,4	–
Изолят сывороточного белка	4,5	–
Изолят соевого белка	4,3	–
Сухая клейковина	0,9	4,0
Чечевичная цельномолотая мука	–	9,5
Цельномолотая мука из бурого риса	–	9,5
Итого	100,0	100,0

в таблице 1. Первой была смесь с высоким содержанием белка (смесь 1). Вторая представляла собой смесь с добавлением чечевичной муки и муки из коричневого риса (смесь 2).

Оценка качества мучной хлебопекарной смеси проводилась при проведении исследований с помощью коэффициента неоднородности V_c по концентрации ключевого компонента в смеси (соли пищевой). Для этого производился отбор пробы из смеси. Нами использовался метод титрования (метод Мора), т. к. он является наиболее распространенным методом анализа соли [19, 20].

С помощью системы комплексного анализа «Statistica» проводили обработку полученных экспериментов.

Результаты и их обсуждение

Для моделирования процессов непрерывного смешивания введем условные обозначения:

i = 1, 2, …, n – количество витков основного рабочего органа аппарата;

j = 1, 2, …, m – количество витков дополнительного рабочего органа аппарата;

$X_0(t) = X_0$, $X_B(t) = X_B$ – массовый расход смеси на входе в аппарат и выходе из него соответственно;

$X_{0B}(t) = X_{0B}$ – массовый расход смеси, которая поступает на нижний неперфорированный виток основного рабочего органа с нижнего неперфорированного витка дополнительного рабочего органа;

$X_i(t) = X_i$ – случайная величина, характеризующая массовый расход смеси, сходящей с i-го витка основного рабочего органа;

$X_j(t) = X_j$– случайная величина, характеризующая массовый расход смеси, сходящей с j-го витка дополнительного рабочего органа;

ρX_0 – часть массового расхода фонового компонента и всего трассера;

δX_0 – часть массового расхода фонового компонента, подаваемого на второй виток перфорированного дополнительного рабочего органа;

$(1-\rho)X_0$ – оставшаяся часть массового расхода фонового компонента при выполнении необходимого условия $0 < \rho < 1$;

$(1-\rho-\delta)X_0$ – оставшаяся часть массового расхода фонового компонента при выполнении необходимого условия $(\rho + \delta) \le 1$;

α_i – коэффициент «внутренней» рециркуляции, характеризующий часть массового расхода смеси, поступающей с i-го витка основного рабочего органа на нижележащий, $0 \le \alpha k_i \le 1$;

β_i – коэффициент «внешней» рециркуляции, характеризующий часть массового расхода смеси, выходящей с n-го витка основного рабочего органа аппарата, $0 \le \beta_i \le 1$;

γ_i – коэффициент рециркуляции, характеризующий опережающую часть массового расхода смеси, поступающей с i-го витка основного рабочего органа на нижележащий, $0 \le \gamma_i \le 1$;

γ_j – коэффициент рециркуляции, характеризующий опережающую часть массового расхода смеси, поступающей с j-го витка дополнительного рабочего органа на нижележащий, $0 \le \gamma_j \le 1$;

τ – интервал корреляции;

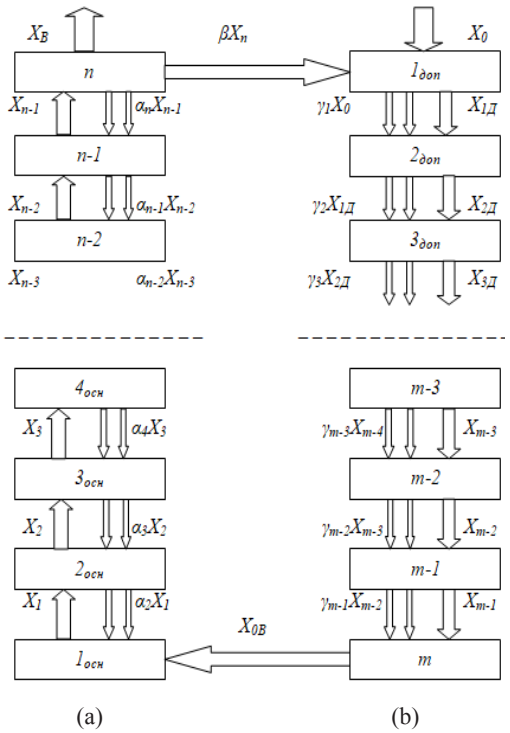
$Kx_i(\tau) = Kx_i$, $Kx_j(\tau) = Kx_j$ – корреляционные функции материальных потоков;

$\sigma_{x0}^2 = Kx_0(0)$, $\sigma_{x\text{в}}^2 = Kx_{\text{в}}(0)$ – дисперсии входящего и выходящего потоков.

На рисунке 2 представлена схема организации движения материальных потоков на исходной

$$\begin{cases} X_1 = X_0 + \beta X_n - \gamma_1 X_0 \\ X_2 = X_1 + \gamma_1 X_0 - \gamma_2 X_1 \\ X_3 = X_2 + \gamma_2 X_1 - \gamma_3 X_2 \\ ---------- \\ X_j = X_{j-1} + \gamma_{j-1} X_{j-2} - \gamma_j X_{j-1} \\ ---------- \\ X_{m-1} = X_{m-2} + \gamma_{m-2} X_{m-3} - \gamma_{m-1} X_{m-2-2} \\ X_m = X_{m-1} + \gamma_{m-1} X_{m-2} \\ X_{0B} = X_{m-1} + \gamma_{m-1} X_{m-2} \end{cases} \quad (1)$$

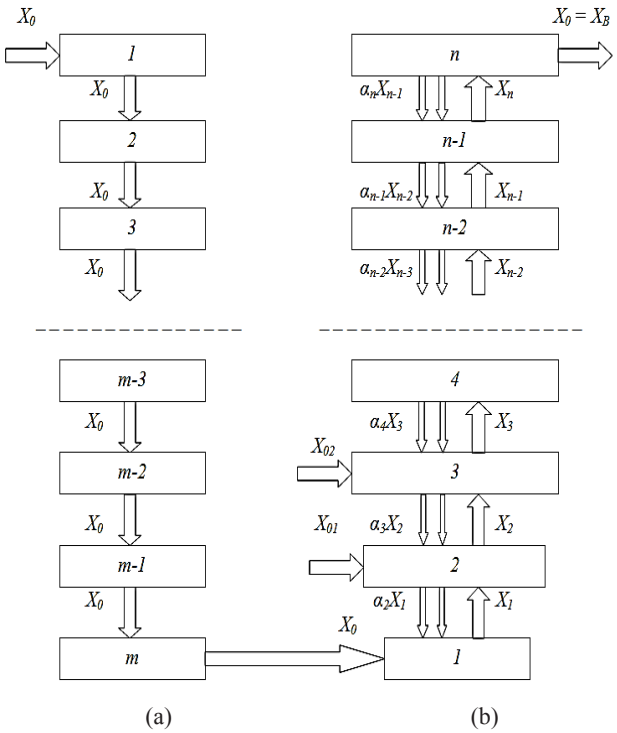
$$\begin{cases} X_1 = X_{0B} + \alpha_2 X_1 \\ X_2 = X_1 + \alpha_3 X_2 - \alpha_2 X_1 \\ X_3 = X_2 + \alpha_4 X_3 - \alpha_3 X_2 \\ ---------- \\ X_i = X_{i-1} + \alpha_{i+1} X_i - \alpha_i X_{i-1} \\ ---------- \\ X_{n-1} = X_{n-2} + \alpha_n X_{n-1} - \alpha_{n-1} X_{n-2} \\ X_n = X_{n-1} - \alpha_n X_{n-1} - \beta X_n \\ X_B = X_{n-1} - \alpha_n X_{n-1} \end{cases} \quad (2)$$



(a) (b)

Рисунок 2. Схема организации движения материальных потоков в вибрационном смесителе непрерывного действия: а) основной рабочий орган; б) дополнительный рабочий орган

Figure 2. Material flows in the continuous vibration mixer: a) main working body; b) additional working body



(a) (b)

Рисунок 3. Схема организации движения материальных потоков в вибрационном смесителе непрерывного действия: а) основной рабочий орган; б) дополнительный рабочий орган

Figure 3. Material flows in the continuous vibration mixer: a) main working body; b) additional working body

$$\begin{cases} Kx_1(\tau) = Kx_0(\tau) - \gamma_{21} Kx_0(\tau) \\ Kx_2(\tau) = Kx_1(\tau) + \gamma_{21} Kx_0(\tau) - \gamma_{22} Kx_1(\tau) \\ Kx_3(\tau) = Kx_2(\tau) + \gamma_{22} Kx_1(\tau) - \gamma_{23} Kx_2(\tau) \\ \text{----------} \\ Kx_j(\tau) = Kx_{j-1}(\tau) + \gamma_{2j-1} Kx_{j-2}(\tau) - \gamma_{2j} Kx_{j-1}(\tau) \\ \text{----------} \\ Kx_{m-1}(\tau) = Kx_{m-2}(\tau) + \gamma_{2m-2} Kx_{m-3}(\tau) - \gamma_{2m-1} Kx_{m-2}(\tau) \\ Kx_m(\tau) = Kx_{m-1}(\tau) + \gamma_{2m-1} Kx_{m-2}(\tau) \\ Kx_{0B}(\tau) = Kx_{m-1}(\tau) + \gamma_{2m-1} Kx_{m-2}(\tau) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Kx_1(\tau) = Kx_{0B}(\tau) - \alpha_{22} Kx_1(\tau) \\ Kx_2(\tau) = Kx_1(\tau) + \alpha_{23} Kx_2(\tau) - \alpha_{22} Kx_1(\tau) \\ Kx_3(\tau) = Kx_2(\tau) + \alpha_{24} Kx_3(\tau) - \alpha_{23} Kx_2(\tau) \\ \text{----------} \\ Kx_i(\tau) = Kx_{i-1}(\tau) + \alpha_{2i+1} Kx_i(\tau) - \alpha_{2i} Kx_{i-1}(\tau) \\ \text{----------} \\ Kx_{n-1}(\tau) = Kx_{n-2}(\tau) + \alpha_{2n} Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_{2n-1} Kx_{n-2}(\tau) \\ Kx_n(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_{2n} Kx_{n-1}(\tau) \\ Kx_B(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_{2n} Kx_{n-1}(\tau) \end{cases} \quad (4)$$

конструкции вибрационного смесителя непрерывного действия (Патент RU 2286203C1). На рисунке 3 изображена схема движения материальных потоков в вибрационном СНД с использованием метода «последовательного разбавления» (Патент RU 262641C1).

Рассмотрим схему организации движения потоков в вибрационном СНД, представленную на рисунке 2. Материальный баланс для материала, движущегося по дополнительному (1) и основному рабочим органам (2), описываются системами уравнений (1, 2).

Корреляционные функции для систем уравнений (1, 2) будут иметь вид уравнений (3, 4).

Примем коэффициенты рециркуляции и опережения равными между собой, (т. е. $\alpha_2 = \ldots \alpha_n = \alpha$, $\gamma_1 = \ldots = \gamma_n = \gamma$). Учитывая, что $Kx_0(0) = \sigma_{x0}^2$ и $Kx_в(0) = \sigma_{xв}^2$ [6], то, решая системы уравнений (3, 4), получим выражение для определения степени сглаживания $S(\alpha, \beta, \gamma)$ рабочего органа:

$$S = \frac{\sigma_{xo}^2}{\sigma_{xв}^2} = \left[\frac{\left((1-\alpha^2)^{n-1} - (\gamma^2+(1-\gamma))^{2(n-1)} \cdot (1-\alpha)^{2(n-1)} \cdot \beta^2\right)}{\left((\gamma^2+(1-\gamma))^{2(n-1)} \cdot (1-\alpha)^{2(n-1)}\ (1-\beta)^2\right)}\right] \quad (5)$$

Поскольку в новой конструкции вибрационного СНД, реализующего метод «последовательного разбавления», рассматривается только коэффициент рециркуляции α, то при решении уравнения (5) примем β и γ постоянными величинами равными 0,5 [20]. Таким образом, рассмотрим зависимость степени сглаживания от коэффициента рециркуляции α и количества витков *n*, которая представлена в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что чем меньше количество витков и больше коэффициент рециркуляции α, тем выше сглаживающая способность *S*. Наибольшее значение сглаживающей способности составляет *S* = 20,42 при α = 0,80 и *n* = 4. Преимуществом данного вибрационного смесителя является то, что он может иметь малое количество витков рабочего органа и, соответственно, небольшие габариты и материалоемкость.

Аналогичным образом находим выражение для определения степени сглаживания для схемы, представленной на рисунке 2:

$$S = \frac{\sigma_{x0}^2}{\sigma_{x\text{в}}^2} = \left[\frac{2(1+\alpha_n)(1+\alpha_{n-1})(1+\alpha_{n-2})(1+\alpha_{n-3})(1+\alpha_{n-4})}{\begin{array}{c}(1-\alpha_n)(1-\alpha_{n-1})(1-\alpha_{n-2})(1-\alpha_{n-3})(1-\alpha_{b-4})+\alpha_{n-5}^2(1-\alpha_n)(1-\alpha_{n-1})\cdot\\ \cdot(1-\alpha_{n-2})(1-\alpha_{n-3})(1+\alpha_{n-4})+(1-\alpha_n)(1-\alpha_{n-1})(1-\alpha_{n-2})(1-\alpha_{n-5})^2\cdot\\ \cdot(1+\alpha_{n-3})(1+\alpha_{n-4})\end{array}}\right] \quad (6)$$

Зависимость степени сглаживания от коэффициента рециркуляции α и количества витков *n* представлена в таблице 3.

Таблица 3 показывает, что важные значения *S*-параметра находятся в правом нижнем углу. Однако увеличение данного параметра приводит к значительному увеличению объема аппарата, поскольку возрастает количество его витков.

Как было выяснено ранее [20], для получения качественных смесей на вибрационных смесителях достаточно, чтобы их сглаживающая способность была в диапазоне от 290 до 2000 единиц. Исследуемый аппарат позволяет получать такие смеси при коэффициенте опережающих потоков равным 0,7. При этом, исходя из таблицы 3, количество его витков будет равным 5 или 6 в зависимости от необходимой степени сглаживания входящих материальных потоков.

Из данных, представленных в таблицах 2 и 3, можно увидеть, что целесообразно использовать новую конструкцию вибрационного СНД, применяющего метод «последовательного разбавления», поскольку он обладает высокой сглаживающей способностью для производства сухой мучной смеси заданного качества.

Скорость передачи вибрации смеси через рабочий орган устройства влияет на работу смесителя. Рассмотрим результаты производства смеси 1. Для определения скорости вибротранспортирования смеси через рабочий орган вибросмесителя ключевыми исследуемыми параметрами были: амплитуда (A = 0,0025, 0,0035 и 0,0045 м), угол вибрации (β = 30, 45 и 60°), высота виброкипящего слоя (ВКС = 0,02, 0,03 и 0,04 м), частота вибрации (f = 16,71, 22, 26, 28 и 33,48 Гц), диаметр отверстий перфорированного рабочего органа вибрационного СНД (d = 0,005 и 0,007 м, без перфорации). Отверстия расположены на витке с шагом 0,025 м.

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рисунках 4–7.

На рисунке 4 представлены графические зависимости скорости перемещения смеси по виткам аппарата от влияния угла вибрации β и частоты колебаний рабочего органа вибрационного СНД при постоянных значениях амплитуды вибрации рабочего органа A = 0,0045 м и высоты ВКС = 0,02 м.

Рисунок 4 показывает, что максимальная скорость перемещения смеси по виткам аппарата достигается при наибольших значениях угла вибрации и частоты вибрации f (в исследуемом диапазоне их изменений).

На рисунке 5 представлены графические зависимости скорости перемещения смеси по виткам аппарата от влияния диаметра отверстий и частоты колебаний рабочего органа. При этом амплитуда вибрации A = 0,0046 м и угол вибрации β = 45° являлись постоянными.

На рисунке 6 представлены графические зависимости скорости перемещения смеси по

Таблица 2. Значения параметра *S*(α, *n*)

Table 2. Values of the parameter *S*(α, *n*)

α*n*	4	5	6	7	8
0,40	2,10	1,72	1,51	1,39	1,30
0,50	3,16	2,36	1,94	1,6	1,52
0,60	5,11	3,48	2,66	2,18	1,88
0,70	9,19	5,77	4,10	3,18	2,61
0,80	20,42	12,04	8,10	5,93	4,63

Таблица 3. Значения параметра *S*(α, *n*)

Table 3. Values of the parameter *S*(α, *n*)

α*n*	4	5	6	7	8
0,40	7,62	17,81	41,49	96,79	226,01
0,50	13,61	40,48	121,49	364,48	1089
0,60	25,47	103,5	410	1642	6567
0,70	54,59	311	1767	9948	56287
0,80	145,8	1321	11824	106316	956710

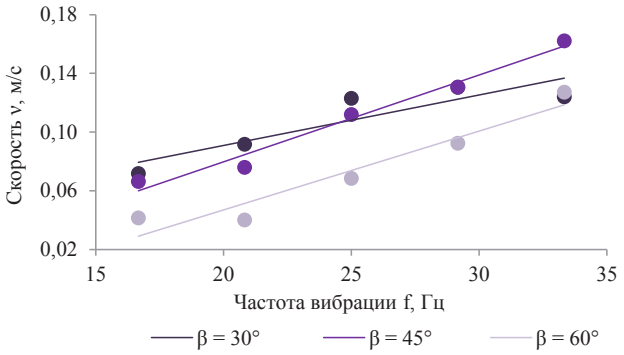


Рисунок 4. Зависимости скорости перемещения мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу от угла и частоты вибрации

Figure 4. Effect of angle and vibration frequency on the flow rate of the flour baking mix

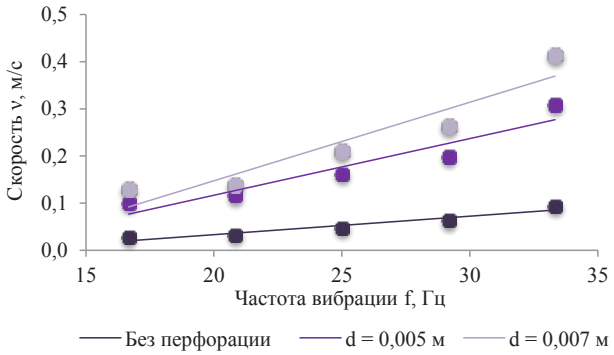


Рисунок 5. Зависимости скорости перемещения мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу от диаметра отверстий и частоты вибрации перфорированного рабочего органа вибрационного СНД

Figure 5. Effect of the diameter of the holes and the vibration frequency of the perforated working body on the flow rate of the flour baking mix

виткам аппарата от амплитуды и частоты колебаний рабочего органа вибрационного СНД. При этом угол вибрации β = 45° и высота ВКС = 0,02 м являлись постоянными.

Рисунок 6 показывает, что максимальная скорость перемещения смеси по виткам аппарата достигается при наибольших значениях амплитуды А и частоты вибрации f (в исследуемом диапазоне их изменений).

На рисунке 7 представлены графические зависимости скорости перемещения смеси по виткам аппарата от влияния высоты ВКС и частоты колебаний рабочего органа вибрационного СНД. При этом угол вибрации β = 45° и амплитуда вибрации А = 0,0046 м являлись постоянными.

Рисунок 7 показывает, что максимальная скорость перемещения смеси по виткам аппарата достигается при минимальной высоте ВКС и максимальной частоты вибрации f (в исследуемом диапазоне ее изменений).

Проанализировав результаты проведенных выше исследований, выявили, что возрастание скорости вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси происходит прямо пропорционально росту частоте колебаний рабочего органа f и амплитуды колебаний А.

Далее были проведены эксперименты по определению пропускной способности отверстия рабочего органа вибрационного смесителя. Перфорация необходима для организации в аппарате рециркулирующих потоков.

На рисунке 8 представлены графические зависимости. Они показывают влияние расхода мучной хлебопекарной смеси через отверстия при ее движении по рабочему органу аппарата от угла β и частоты вибрации f рабочего органа вибрационного СНД. При этом амплитуда вибрации рабочего органа А = 0,0046 м и высота виброкипящего слоя составила 0,02 м.

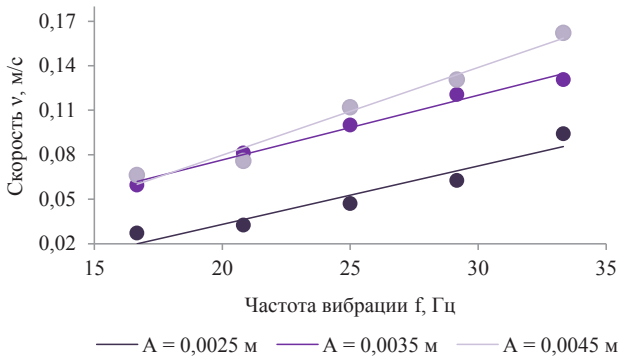


Рисунок 6. Зависимости скорости перемещения смеси по виткам аппарата от амплитуды и частоты колебаний рабочего органа вибрационного СНД

Figure 6. Effect of the amplitude and frequency of oscillations of the working body on the flow rate of the flour baking mix

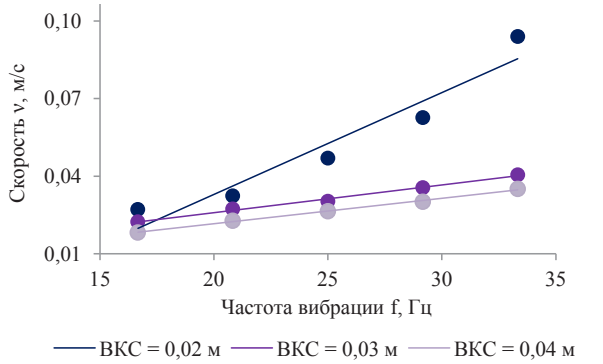


Рисунок 7. Зависимости скорости перемещения смеси по виткам аппарата от высоты ВКС и частоты колебаний рабочего органа вибрационного СНД

Figure 6. Effect of the amplitude and frequency of oscillations of the working body on the flow rate of the flour baking mix

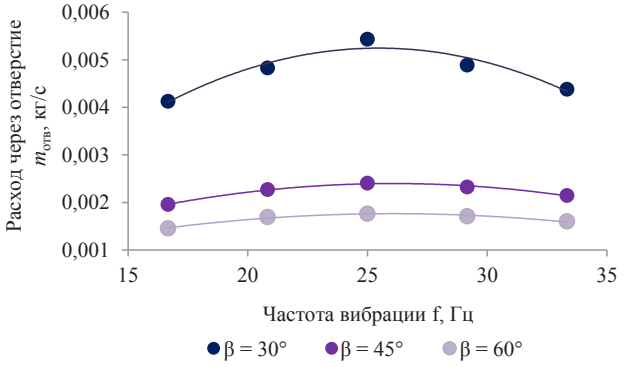


Рисунок 8. Зависимости пропускной способности отверстий перфорации рабочего органа вибрационного СНД от угла и частоты вибрации

Figure 8. Effect of the angle and vibration frequency on the throughput of the perforation holes

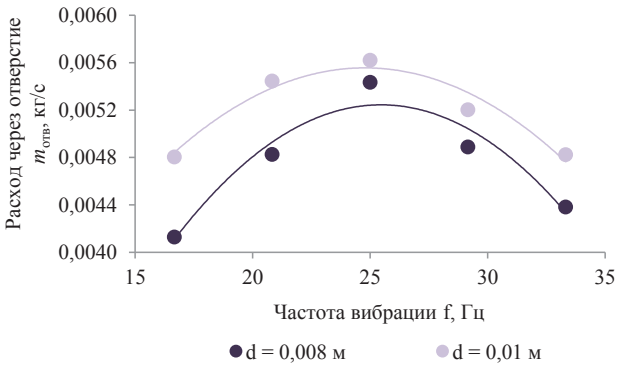


Рисунок 9. Зависимости пропускной способности отверстий перфорации рабочего органа вибрационного СНД от диаметра перфорации и частоты вибрации

Figure 9. Effect of the perforation diameter and vibration frequency on the throughput of the perforation holes

Рисунок 8 показывает, что расход исследуемой мучной смеси обратно пропорционален углу вибрации β.

Из рисунка 9 видно, что при постоянных параметрах угла, амплитуды вибрации и высоты ВКС (β = 45°, A = 0,0045 и 0,02 м соответственно) изменение диаметра перфорации d до максимального значения прямо пропорционально максимальному расходу через отверстие $m_{отв}$.

Графические зависимости, демонстрирующие влияние расхода исследуемой мучной смеси от амплитуды A и частоты вибрации f колебаний рабочего органа вибрационного СНД, представлены на рисунке 10. Угол вибрации и высота ВКС постоянны и составили β = 45° и 0,02 м соответственно.

Из рисунка 10 видно, что амплитуда вибрации A изменяется прямо пропорционально расходу материала.

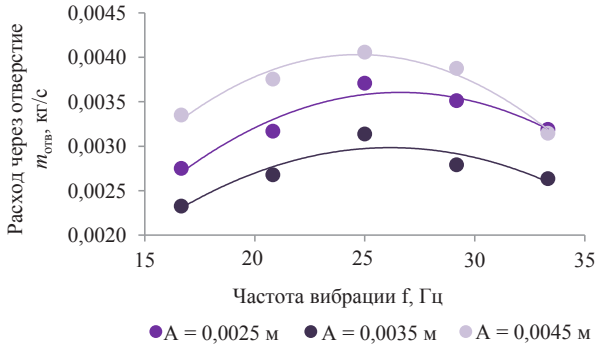


Рисунок 10. Зависимости пропускной способности отверстий перфорации рабочего органа диаметром 0,008 м от амплитуды и частоты вибрации

Figure 10. Effect of the amplitude and vibration frequency on the throughput of the 0.008 m perforation holes

Проанализировав рисунок 11, определили, что при постоянных параметрах угла и амплитуды вибрации (β = 45° и A = 0,0046 м соответственно) расход через отверстие ($m_{отв}$) находится в прямо пропорциональной зависимости от высоты ВКС.

Из представленных рисунков 8–11 видно, что большинство графических зависимостей обладают экстремумами, полученными при переходе материала из виброожиженного состояния в виброкипящее. Проанализировав полученные данные, мы выявили, что при увеличении таких характеристик, как амплитуда вибрации и высота ВКС, пропускная способность перфорации снижается.

Затем определяли взаимное влияние технологических параметров на потребляемую мощность смесителя. Эти эксперименты имеют важное значение при исследовании эффективности

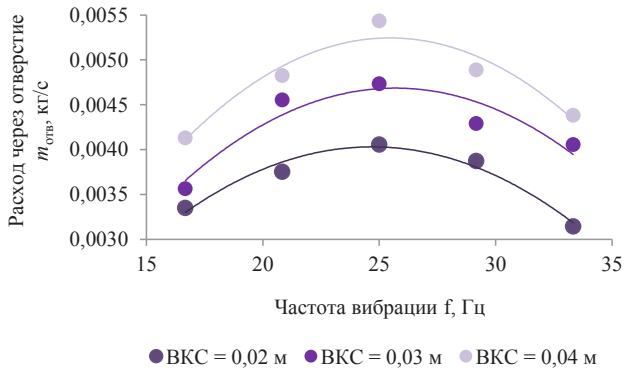


Рисунок 11. Зависимости пропускной способности отверстий перфорации рабочего органа вибрационного СНД диаметром 0,008 м от высоты ВКС и частоты вибрации

Figure 11. Effect of the height and vibration frequency on the throughput of the 0.008 m perforation holes

смесеприготовительных процессов. Были использованы следующие ключевые параметры: частота вибрации и амплитуда вибрации; ряд исследуемых значений f = 16,71, 22, 26, 28 и 33,48 Гц, A = 0,0025, 0,0035 и 0,0045 соответственно. Исследовали две конструкции смесителя, обладающие разной массой: 16 и 26 кг. Масса смесителя зависит от количества витков рабочего органа: 4 и 8 витков соответственно.

Для устойчивой работы конструкции массой 26 кг необходимо 22 Гц. Это минимальное рабочее значение частоты колебаний смесителя. Вторая конструкция (16 кг) способна работать при минимальном значении частоты колебаний 17 Гц.

На следующем этапе работы проведены два полнофакторных эксперимента для исходной и разработанной конструкций вибрационных СНД.

Определили рациональные технологические параметры работы исходного вибрационного СНД, при которых достигается наименьший коэффициент неодноодности (V_c = 4 %): амплитуда колебания A = 0,0046 мм, рабочая частота колебания f = 33,48 Гц, угол вибрации β = 45°.

Рассмотрим подробно полнофакторный эксперимент на разработанном вибрационном СНД. Исследовали следующие параметры: частоту вибрации f = 16,71, 26, 33 и 48 Гц, амплитуду колебания дебалансов A = 0,0026, 0,0036 и 0,0046 м, долю ключевого компонента соли пищевой к = 0,05, 0,15 и 0,2.

Мучную хлебопекарную смесь (V_c = 8,13 %), обогащенную белком, можно получить при амплитуде колебаний A = 0,0046 м и доле ключевого компонента к = 0,05.

При частоте вибрации f = 33,48 Гц и доле ключевого компонента к = 0,05 м получали смесь наилучшего качества с коэффициентом неоднородности V_c = 12 %.

При амплитуде A = 0,0045 м и частоте вибрации f = 33,48 Гц получали смесь с коэффициентом неоднородности V_c = 7,86 %.

На заключительном этапе работы с помощью разработанной регрессионной модели выявили среднее значение относительной погрешности: для смеси, обогащенной белком, – 9,83 %, а для смеси с добавлением чечевичной муки и муки из бурого риса – 9,98 %. Данная регрессионная модель может использоваться для прогнозирования качества производимых смесей, т. к. допустимое значение погрешности составляет ± 10 %.

В результате полнофакторного эксперимента выявили рациональные параметры работы разработанного вибрационного СНД для достижения лучшего качества смешивания: частота вибрации f = 33,48 Гц, амплитуда колебания A = 0,0046 м, доля ключевого компонента к = 0,05 м. Определили, что на коэффициент неоднородности в новой разработанной конструкции при получении исследуемых мучных сыпучих смесей наибольшее влияние оказывает доля ключевого компонента к.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение смесителя обеспечивает равномерность перемешивания ингредиентов и высокое качество смешивания мучных хлебопекарных смесей.

Выводы

На основе литературного обзора были выявлены недостатки, которые позволили разработать новую конструкцию вибрационного смесителя, на которую получен патент RU 2626415C1.

Разработаны математические модели вибрационного смесителя на основе корреляционного анализа, позволяющие определить рациональную топологическую схему движения материальных потоков. В результате выявлено, что при количестве витков n = 5 или n = 6 и коэффициенте рециркуляции равном α = 0,7 сглаживающая способность вибрационного СНД, реализующего метод «последовательного разбавления», варьируется в пределах 309–1753 единиц, в то время как на исходной конструкции сглаживающая способность варьируется в пределах 4,10–5,77 единиц. Таким образом, оригинальный вибрационный СНД, реализующй метод «последовательного разбавления», обладает лучшей способностью сглаживать флуктуации входящих потоков, чем исходная конструкция.

Установлено влияние параметров колебаний и высоты ВКС мучных сыпучих смесей на скорость их вибротранспортирования по рабочему органу и пропускную способность перфорации. Определены ключевые рациональные параметры работы вибрационного смесителя при получении мучных смесей: амплитуда A = 0,0046 м, угол вибрации β = 45°, ВКС = 0,02 м, диаметр отверстий перфорированного рабочего органа вибрационного СНД d = 0,005. Определены рациональные параметры работы вибрационного смесителя, реализующего метод «последовательного разбавления», при получении мучных сыпучих смесей: амплитуда колебания A = 0,0046 м, рабочая частота колебания f = 33,48 Гц, доля ключевого компонента к = 0,05.

Критерии авторства

Д. М. Бородулин разработал общую концепцию проекта, схему эксперимента, участвовал в выполнении опытов и статистической обработке данных, подготовке статьи и интерпретации результатов. Д. В. Сухоруков, М. Т. Шулбаева, Т. В. Зорина, Д. И. Киселев и Е. С. Миллер участвовали в выполнении опытов и статистической обработке данных, подготовке статьи и интерпретации результатов. О. Н. Мусина участво-

вала в составлении схемы эксперимента, подготовке рукописи и интерпретации результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Выражаем благодарность учебно-вспомогательному персоналу кафедры «Технологическое проектирование пищевых производств» ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» и ФГАНУ «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности» за помощь в организации эксперимента.

Contribution

D.M. Borodulin defined the concept, designed the research, participated in the experiments and statistical analysis, wrote the manuscript, and interpreted the results. D.V. Sukhorukov, M.T. Shulbaeva, T.V. Zorina, D.I. Kiselev, and E.S. Miller performed the experiment, analyzed the obtained data, wrote the manuscript, and interpreted the results. O.N. Musina designed the study, drafted the manuscript, and interpreted the results.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgments

We would like to express our gratitude to the educational support staff of the Department of the Technological Design of Food Production of the Kemerovo State University and the Scientific Research Institute for the Baking Industry for their help in organizing the experiment.

Список литературы

1. Factors influencing the sensory perception of reformulated baked confectionary products / E. C. Garvey, M. G. O'Sullivan, J. P. Kerry [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2020. – Vol. 60, № 7. – P. 1160–1188. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1562419.

2. Birch, C. S. Ensuring the future of functional foods / C. S. Birch, G. A. Bonwick // International Journal of Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 54, № 5. – P. 1467–1485. https://doi.org/10.1111/ijfs.14060.

3. Substituting wheat flour with okara flour in biscuit production / M. A. Momin, M. F. Jubayer, A. A. Begum [et al.] // Foods and Raw Materials. – 2020. – Vol. 8, № 2. – P. 422–428. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-422-428.

4. Yaver, E. Effects of different dephytinisation methods on chemical properties of commercial and traditional breads prepared from composite flour / E. Yaver, N. Bilgiçli // Food Chemistry. – 2019. – Vol. 276. – P. 77–83. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.169.

5. Nyembwe, P. M. Potential of defatted marama flour-cassava starch composites to produce functional gluten-free bread-type dough / P. M. Nyembwe, H. L. de Kock, J. R. N. Taylor // LWT – Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 92. – P. 429–434. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.062.

6. Буховец, В. А. Разработка технологии производства хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности / В. А. Буховец, Д. В. Ефимова, Л. В. Давыдова // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 2. – С. 193–200. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-193-200.

7. Особенности технологии безглютеновых хлебобулочных изделий / О. Л. Вершинина, В. В. Гончар, Ю. Ф. Росляков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2019. – Т. 368–369, № 2–3. – С. 39–41.

8. Bigne, F. Mesquite (*Prosopis alba*) flour as a novel ingredient for obtaining a "panettone-like" bread. Applicability of part-baking technology / F. Bigne, M. C. Puppo, C. Ferrero // LWT – Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 89. – P. 666–673. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.029.

9. Intensification of bulk material mixing in new designs of drum, vibratory and centrifugal mixers / V. N. Ivanets, D. M. Borodulin, A. B. Shushpannikov [et al.] // Foods and Raw Materials. – 2015. – Vol. 3, № 1. – P. 62–69. https://doi.org/10.12737/11239.

10. Разработка смесительного агрегата для получения мучных хлебопекарных смесей с повышенным содержанием белка / Д. М. Бородулин, Т. В. Зорина, Е. В. Невская [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 4. – С. 579–586. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-579-586.

11. Angioloni, A. Effects of pressure treatment of hydrated oat, finger millet and sorghum flours on the quality and nutritional properties of composite wheat breads / A. Angioloni, C. Collar // Journal of Cereal Science. – 2012. – Vol. 56, № 3. – P. 713–719. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.08.001.

12. Developing gluten free bakery improvers by hydrothermal treatment of rice and corn flours / H. Bourekoua, L. Benatallah, M. N. Zidoune [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2016. – Vol. 73. – P. 342–350. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.032.

13. Varzakas, T. Quality and safety aspects of cereals (wheat) and their products / T. Varzakas // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2016. – Vol. 56, № 15. – P. 2495–2510. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.866070.

14. The effects of lupin (*Lupinus angustifolius*) addition to wheat bread on its nutritional, phytochemical and bioactive composition and protein quality / C. B. J. Villarino, V. Jayasena, R. Coorey [et al.] // Food Research International. – 2015. – Vol. 76. – P. 58–65. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.046.

15. Maize flour parameters that are related to the consumer perceived quality of "*broa*" specialty bread / B. Carbas, M. C. Vaz-Patto, M. R. Bronze [et al.] // Food Science and Technology. – 2016. – Vol. 36, № 2. – P. 259–267. https://doi.org/10.1590/1678-457X.6674.

16. Mixolab™ for rheological evaluation of wheat flour partially replaced by soy protein hydrolysate and fructooligosaccharides for bread production / M. Schmiele, M. H. Ferrari Felisberto, M. T. Pedrosa Silva Clerici [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2017. – Vol. 76. – P. 259–269. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.014.

17. Позднякова, О. Г. Разработка технологии производства кондитерских изделий функционального назначения / О. Г. Позднякова, Е. А. Егушова, Е. А. Тыщенко // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48, № 3. – С. 90–95. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-90-95.

18. Collar, C. Impact of visco-metric profile of composite dough matrices on starch digestibility and firming and retrogradation kinetics of breads thereof: Additive and interactive effects of non-wheat flours / C. Collar // Journal of Cereal Science. – 2016. – Vol. 69. – P. 32–39. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.02.006.

19. Васильев, А. С. Формирование показателей качества пшеничного хлеба при добавлении порошка топинамбура / А. С. Васильев, Е. Н. Чумакова, Ю. Т. Фаринюк // Вестник КрасГАУ. – 2019. – Т. 146, № 5. – С. 174–181.

20. Мистенева, С. Ю. Разработка мучных кондитерских изделий с использованием нерафинированного растительного сырья / С. Ю. Мистенева, Е. А. Демченко, Т. В. Савенкова // Пищевая промышленность. – 2019. – № 8. – С. 66–71. https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10129.

References

1. Garvey EC, O'Sullivan MG, Kerry JP, Kilcawley KN. Factors influencing the sensory perception of reformulated baked confectionary products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020;60(7):1160–1188. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1562419.

2. Birch CS, Bonwick GA. Ensuring the future of functional foods. International Journal of Food Science and Technology. 2019;54(5):1467–1485. https://doi.org/10.1111/ijfs.14060.

3. Momin MA, Jubayer MF, Begum AA, Nupur AH, Ranganathan TV, Mazumder MAR. Substituting wheat flour with okara flour in biscuit production. Foods and Raw Materials. 2020;8(2):422–428. https://doi.org/10.21603/2308- 4057-2020-2-422-428.

4. Yaver E, Bilgiçli N. Effects of different dephytinisation methods on chemical properties of commercial and traditional breads prepared from composite flour. Food Chemistry. 2019;276:77–83. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.169.

5. Nyembwe PM, de Kock HL, Taylor JRN. Potential of defatted marama flour-cassava starch composites to produce functional gluten-free bread-type dough. LWT – Food Science and Technology. 2018;92:429–434. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.062.

6. Bukhovets VA, Yefimova DV, Davydova LV. New production technology for nutritionally enhanced bakery products. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(2):193–200. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-193-200.

7. Vershinina OL, Gonchar VV, Roslyakov YuF, Eremina AE, Simonyan EA. Features technology of gluten-free bakery products. News of Institutes of Higher Education. Food Technology. 2019;368–369(2–3):39–41. (In Russ.).

8. Bigne F, Puppo MC, Ferrero C. Mesquite (*Prosopis alba*) flour as a novel ingredient for obtaining a "panettone-like" bread. Applicability of part-baking technology. LWT – Food Science and Technology. 2018;89:666–673. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.029.

9. Ivanets VN, Borodulin DM, Shushpannikov AB, Sukhorukov DV. Intensification of bulk material mixing in new designs of drum, vibratory and centrifugal mixers. Foods and Raw Materials. 2015;3(1):62–69. https://doi.org/10.12737/11239.

10. Borodulin DM, Zorina TV, Nevskaya EV, Sukhorukov DV, Cherkashina DK. Mixing unit for production of flour baking mixes with high protein content. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(4):579–586. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-579-586.

11. Angioloni A, Collar C. Effects of pressure treatment of hydrated oat, finger millet and sorghum flours on the quality and nutritional properties of composite wheat breads. Journal of Cereal Science. 2012;56(3):713–719. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.08.001.

12. Bourekoua H, Benatallah L, Zidoune MN, Rosell CM. Developing gluten free bakery improvers by hydrothermal treatment of rice and corn flours. LWT – Food Science and Technology. 2016;73:342–350. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.032.

13. Varzakas T. Quality and safety aspects of cereals (wheat) and their products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2016;56(15):2495–2510. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.866070.

14. Villarino CBJ, Jayasena V, Coorey R, Chakrabarti-Bell S, Foley R, Fanning K, et al. The effects of lupin (*Lupinus angustifolius*) addition to wheat bread on its nutritional, phytochemical and bioactive composition and protein quality. Food Research International. 2015;76:58–65. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.046.

15. Carbas B, Vaz-Patto MC, Bronze MR, Bento-Da-Silva A, Trigo MJ, Brites C. Maize flour parameters that are related to the consumer perceived quality of "*broa*" specialty bread. Food Science and Technology. 2016;36(2):259–267. https://doi.org/10.1590/1678-457X.6674.

16. Schmiele M, Ferrari Felisberto MH, Pedrosa Silva Clerici MT, Chang YK. Mixolab™ for rheological evaluation of wheat flour partially replaced by soy protein hydrolysate and fructooligosaccharides for bread production. LWT – Food Science and Technology. 2017;76:259–269. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.014.

17. Pozdnyakova OG, Egushova EA, Tyshchenko EA. Functional confectionery products: development of production process. Food Processing: Techniques and Technology. 2018;48(3):90–95. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-90-95.

18. Collar C. Impact of visco-metric profile of composite dough matrices on starch digestibility and firming and retrogradation kinetics of breads thereof: Additive and interactive effects of non-wheat flours. Journal of Cereal Science. 2016;69:32–39. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.02.006.

19. Vasilyev AS, Chumakova EN, Farinyuk YuT. The formation of wheat bread quality indicators by adding Jerusalem artichoke powder. Bulletin of KSAU. 2019;146(5):174–181. (In Russ.).

20. Misteneva SYu, Demchenko EA, Savenkova TV. Development of flour confectionery products with use of unrefined plant raw materials. Food Industry. 2019;(8):66–71. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10129.