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

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2492
https://elibrary.ru/GUJYSR

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Применение вертикальных вибрационных смесителей в технологии получения мучных смесей

Д. М. Бородулин[1], М. Т. Шулбаева[2,*], О. Н. Мусина[3], Д. В. Сухоруков[2]

[1] *Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Россия*

[2] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

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

Поступила в редакцию: 06.02.2023
Принята после рецензирования: 25.09.2023
Принята к публикации: 03.10.2023

**М. Т. Шулбаева: sh-m-t@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4571-5571*
Д. М. Бородулин: https://orcid.org/0000-0003-3035-0354
О. Н. Мусина: https://orcid.org/0000-0002-4938-8136
Д. В. Сухоруков: https://orcid.org/0000-0001-7995-3813

© Д. М. Бородулин, М. Т. Шулбаева, О. Н. Мусина, Д. В. Сухоруков, 2024

Аннотация.
В пищевой отрасли существует тенденция перехода с традиционных видов сырья, которые характеризуются высокой влажностью, на их аналоги в сухом виде. Цель исследования – обосновать возможные конструкции вертикальных вибрационных смесителей, предназначенных для получения мучных смесей.
Объектом исследования являлись характеристики вертикальных вибрационных смесителей при получении мучных смесей, изучение которых позволило бы спрогнозировать качество получаемого продукта. Для получения смесей использовали муку пшеничную хлебопекарную I сорта, сахар белый, соль пищевую, порошок яичный и молоко сухое.
Научно обосновали возможность расширения области применения вертикальных вибрационных смесителей, предназначенных для зернистых материалов. Предложили три вертикальных вибрационных смесителя непрерывного действия для получения мучных смесей: подъемный, прямоточный и каскадный. Пшеничная мука, которая является основой мучных смесей, переходит на рабочем органе смесителя в устойчивое виброкипящее состояние в слоях толщиной не более 35 мм при амплитуде колебаний 4,5 мм и частоте более 20 Гц. Скорость движения муки растет с увеличением частоты колебаний рабочего органа и размеров площади перфорации, но падает с повышением высоты слоя. Эффективность данных аппаратов возрастает пропорционально увеличению площади отверстий на рабочих витках смесителей, а также от максимального слоя высоты муки. Наиболее эффективным из предложенных конструкций является прямоточный вибрационный смеситель. Периодичность импульсного дозирования ингредиентов в смеситель для получения мучных смесей удовлетворительного качества (Vc ≤ 14,5 %) не должна превышать половины, а хорошего (Vc ≤ 6 %) четверти среднего времени пребывания частиц в аппарате.
Результаты работы представляют значимость при проектировании технологических линий производства мучных смесей.

Ключевые слова. Пищевая промышленность, порошок, смесь, смешивание, вибрация, псевдоожижение, смеситель, производительность, качество

Для цитирования: Применение вертикальных вибрационных смесителей в технологии получения мучных смесей / Д. М. Бородулин [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 104–115. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2492

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2492
https://elibrary.ru/GUJYSR

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Vertical Vibratory Mixers in Flour-Mixing Technology

Dmitry M. Borodulin[1], Margarita T. Shulbaeva[2,*], Olga N. Musina[3], Dmitry V. Sukhorukov[2]

[1] *Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia*

[2] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

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

Received: 06.02.2023
Revised: 25.09.2023
Accepted: 03.10.2023

**Margarita T. Shulbaeva: sh-m-t@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4571-5571*
Dmitry M. Borodulin: https://orcid.org/0000-0003-3035-0354
Olga N. Musina: https://orcid.org/0000-0002-4938-8136
Dmitry V. Sukhorukov: https://orcid.org/0000-0001-7995-3813

© D.M. Borodulin, M.T. Shulbaeva, O.N. Musina, D.V. Sukhorukov, 2024

Abstract.
The food industry is currently demonstrating a tendency to substitute traditional high-humidity raw materials with their dry analogues. This research introduces new designs of vertical vibrating mixers that could preprogram flour mix quality. The vertical continuous vibration mixers designed for granular materials showed a good potential for a wider scope of application.
The experiment involved high-quality wheat flour, sugar, salt, egg powder, and powdered milk, as well as three vertical mixers, i.e., a lifting mixer, a flow mixer, and a cascade mixer.
Wheat flour entered the working body of the mixer and came into a stable vibration-boiling state in layers of ≤ 35 mm with a vibration amplitude of 4.5 mm and a frequency of ≥ 20 Hz. The speed rate of the flour increased together with the oscillation frequency of the working body and the size of the perforation area but went down as the layer grew wider. The efficiency increased following the increase in the perforation area on the spiral surface and depended on the maximal thickness of the dough layer. The flow vibrating mixer proved to be the most effective one. The frequency of pulse feeding of ingredients into the mixer was ≤ 50% (Vc ≤ 14.5%) to obtain flour mixes of satisfactory quality while good-quality mixes required 25% average time the particles spent in the mixer (Vc ≤ 6%).
The results obtained can be used to design technological lines for flour mix production.

Keywords. Food industry, powder, mix, mixing, vibration, fluidization, mixer, productivity, quality

For citation: Borodulin DM, Shulbaeva MT, Musina ON, Sukhorukov DV. Vertical Vibratory Mixers in Flour-Mixing Technology. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):104–115. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2492

Введение

Проблема повышения культуры питания и качества пищевых продуктов является актуальной для всех стран мира [1–7]. Корреляция между качеством пищевой продукции и качеством жизни населения находит подтверждение в работах ученых повсеместно [8–11]. Актуальным направлением является создание безопасных и качественных разработок на основе продуктов массового потребления, таких как продукты переработки зерна, в том числе смеси для домашнего хлебопечения и приготовления мучных кондитерских изделий [12, 13]. Качеству таких мучных смесей стоит уделить пристальное внимание.

Современной тенденцией в пищевой отрасли является переход с традиционных видов сырья, которые характеризуются высокой влажностью, на их аналоги в сухом виде. Преимуществами сухой пищевой продукции являются хорошая сохраняемость без потери качества, пониженная потребность в складских помещениях, стабильные функционально-технологические свойства и удобство получения полуфабрикатов, таких как мучные смеси (для кондитерских изделий или домашних хлебопечек). Использование готовых мучных смесей позволяет эффективнее вести технологический процесс предприятиями малого и среднего бизнеса. Поэтому популярным сегодня направлением является приготовление хлебопекарных и мучных кондитерских изделий (в том числе в домашних условиях) на основе использования готовых сухих смесей (порошков). Работы по улучшению техники и технологии получения

мучных смесей активно ведутся во всем мире [14–16]. Сбалансированные рецептуры мучных смесей получают аналитическим путем с применением современных цифровых технологий [17–21].

Смешивание зернистых сыпучих компонентов и порошков является важной технологической операцией не только в пищевой промышленности, но и в других отраслях – химической, строительной, фармацевтической и т. д. [22–27]. В последние годы в научной литературе наблюдается рост количества публикаций, которые посвящены смешиванию сыпучих материалов с использованием вычислительных и экспериментальных подходов в смесителях горизонтального и вертикального типов [28–34].

Смешивание порошков происходит при конвективном перемешивании в результате относительного движения групп частиц или при диффузионном перемешивании отдельных частиц [35–39]. Детально процессы смешивания порошков, в том числе в потоке по поверхностям и во вращающихся цилиндрических аппаратах, рассмотрены в работах R. Hogg (США) и J. Bridgwater (Великобритания) [39, 40]. Особенности вибрационного смешивания порошков применительно к фармацевтической отрасли описаны в работе A. Kottlan и др., а для пищевой отрасли в работе M. Asachi и др. [41, 42].

Для достижения высокого качества смеси порошков должны обладать однородностью распределения компонентов. В рецептурах смесей для кондитерских изделий (например, печенья) основными сухими компонентами являются пшеничная мука и сахарная пудра, а соль, сода, сухое молоко, яичный порошок и другие компоненты входят в небольших количествах. Количество компонентов в рецептуре достигает 15 наименований, что не является пределом, а соотношение ингредиентов обычно не превышает 1:100. Существует несколько методов оценки однородности смеси порошков, которые различаются основами, точностью, аппаратурным оформлением, стоимостью и условиями проведения анализа. В работах [24, 42–44] описаны современные методы оценки однородности смеси порошков, рассмотрены их преимущества и недостатки, дан обзор, классификация и сравнение существующих индексов смешивания, характеризующих качество смесей. Недостатком этих методов является высокая стоимость и сложное аппаратурное оформление, которое не дает возможности их применения на предприятиях малого и среднего бизнеса. Для решения этой проблемы мы предложили новый способ определения коэффициента неоднородности смеси.

Хотя вертикальные вибрационные смесители хорошо себя зарекомендовали (коэффициент вариации 8 % ≤ Vc ≤ 15 %) в пищевой отрасли для смешивания зернистых сыпучих материалов с небольшой долей порошков, эффективность получения порошковых смесей в существующих конструкциях вибрационных смесителей может быть повышена [45–50]. Например, путем усовершенствования конструкции (как предложено нами), подбором амплитуды и частоты колебаний, предварительным смешиванием компонентов и другими методами [47–50].

Таким образом, усовершенствование конструкции вертикальных вибрационных смесителей для получения мучных смесей (порошков) и исследование характеристик таких смесителей является актуальной научно-прикладной задачей.

Цель исследования – обосновать возможные конструкции вертикальных вибрационных смесителей, предназначенных для получения мучных смесей (порошков), исследовать характеристики смесителей и на основе анализа кривых отклика смесителей, полученных на дискретный входной сигнал, спрогнозировать качество смесей.

Объекты и методы исследования

В работе использовали следующие материалы: мука пшеничная хлебопекарная I сорта, сахар белый, соль пищевая, порошок яичный и молоко сухое, соответствующие требованиям действующей нормативной документации и гигиеническим требованиям ГСЭН РФ к качеству и безопасности сырья и пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01).

В широкой трактовке под эффективностью понимают соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами. В данной работе под эффективностью предлагается понимать объем (масса или вес) смеси, отнесенный к единице затраченной энергии.

Для оценки эффективности работы смесителей в качестве условного обозначения параметра «эффективность работы» введем показатель E_f, м^3/(кВт·ч):

$$E_f = \frac{V}{N \times 1000} \quad (1)$$

где V – объемная производительность смесителя, м^3/ч; N – затрачиваемая мощность, Вт.

Объемная производительность смесителя рассчитывается по формуле (2):

$$V = 3600 \times v \times S \quad (2)$$

где v – средняя скорость муки, м/с; S – площадь живого сечения потока, м^2.

Производительность смесителей зависит прямо пропорционально от скорости транспортирования сыпучего материала по рабочему органу аппарата. На скорость влияют частота и амплитуда колебаний рабочего органа, угол вибрации, размеры перфорации, высота дисперсного слоя и угол наклона поверхности рабочего органа. В ходе проведения исследований амплитуда колебаний и угол вибрации были неизменны – 4,5 мм и 45° соответственно. Варьировали лишь частоту, размеры перфорации, высоту слоя муки и угол наклона поверхности рабочего органа.

Поскольку время пребывания отдельных элементов потока (частиц смеси) и их концентрация являются непрерывной случайной величиной, т. е. имеют статистическую природу, то можно рассчитать математические ожидания $\Theta\tau$ (средние значения) этих величин, дисперсию $D\tau$ и коэффициенты вариации Vc. Зная параметры кривых отклика на одиночный δ-импульс, можно построить гипотетический отклик на цепочку входных импульсов с разным периодом следования. Вручную расчеты громоздки, поэтому мы разработали специальную программу ЭВМ «Определение коэффициента неоднородности смеси», зарегистрированную в Роспатенте (№ 2016617770). Сначала оператор вручную заполняет экспериментальными данными матрицу изменения концентрации индикатора во времени C(t), а затем программа рассчитывает среднее время пребывания $\Theta\tau$ индикатора в смесителе и его дисперсию $D\tau$. Дисперсия характеризует близость смесителя к модели идеального смешения. Далее программа дает оценку влияния периода t_{doz} (цикличности) подачи индикатора на качество смеси путем расчета коэффициента вариации Vc, который дает качественную оценку получаемой смеси. Чем меньше его величина, тем качественнее считается полученная смесь. Например, при Vc 3–6 % смесь можно считать хорошего качества.

Для расчета данных использовали программу MATSTAT (http://matstat.eu). Статистическую обработку данных осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 при уровне значимости 5 %. Средние значения сравнивали на предмет различий с использованием однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты и их обсуждение

Мы предложили три усовершенствованных конструкции вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия (рис. 1), которые предполагается использовать для получения мучных смесей (порошков). При включении осцилляторов (*1*) смесители начинают совершать винтовые колебания с интенсивностью, которая обеспечивает одновременное перемещение и виброкипение (псевдоожижение) дисперсной массы на рабочем органе (*3*), выполненном в виде ряда винтовых (рис. 1a и b) или кольцеобразных лотков (рис. 1c) с плоским перфорированным дном. В первой конструкции дисперсная фаза движется к выгрузочному патрубку вверх по винтовому лотку, во второй – вниз, в третьей – по кругу, проваливаясь в вырез на следующую ступень каскада.

Конструкция подъемного вертикального вибрационного смесителя (рис. 1a) позволяет повысить качество получаемых мучных смесей на фоне снижения потребления аппаратом электроэнергии. Вибрационный аппарат состоит из цилиндра, который является загрузочным бункером. На его внешней стороне закреплен винтовой желоб с перфорированным основанием, который заканчивается в верхней части аппарата выгрузочным патрубком. В цилиндрической части аппарата находятся сквозные отверстия. У нижнего отверстия закреплен малый перфорированный лоток с нижним сплошным основанием, а у верхнего отверстия расположен делитель потока.

Аппарат работает следующим образом: включенный вибропривод приводит смеситель в рабочее состояние, при котором начинает осуществляться виброкипение смешиваемых компонентов смеси внутри винтового желоба. Компоненты начинают смешиваться и двигаться вверх по желобу, достигая необходимой однородности смеси. Однако часть компонентов через отверстия в перфорированном желобе ссыпается на лежащий внизу виток желоба, обеспечивая т. н. рециркуляцию смеси. Такое действие приводит к «сглаживанию» флуктуаций питающих дозаторов. Помимо этого, отверстия в желобе способствуют

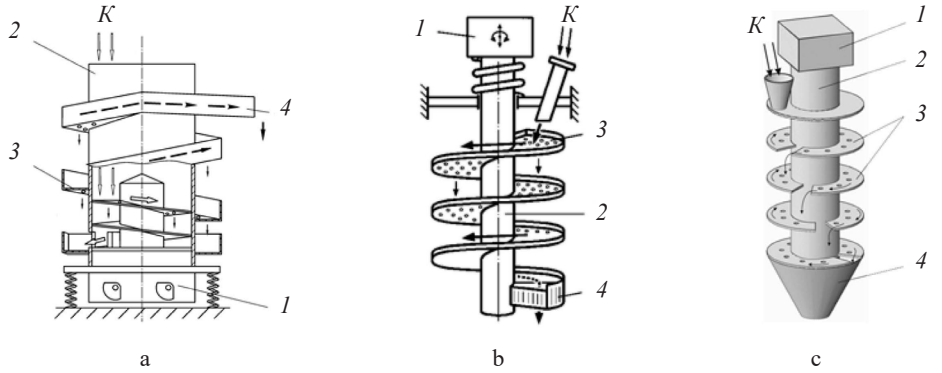

Рисунок 1. Конструкции вертикальных вибрационных смесителей: a – подъемный смеситель; b – прямоточный смеситель; c – каскадный смеситель (*1* – вибропривод; *2* – цилиндрическая несущая колонна; *3* – перфорированный рабочий орган; *4* – выгрузочный патрубок; K – компоненты; стрелками показаны материальные потоки)

Figure 1. Vertical vibrating mixers: a – lifting mixer; b – flow mixer; c – cascade mixer (*1* – vibration drive; *2* – cylindrical support column; *3* – perforated working body; *4* – discharge pipe; K – components; arrows mark material flows)

подсасыванию воздуха, в то время как основной материал подбрасывается вверх, а при его падении вытесняется обратно через отверстия и слой материала. За счет данного эффекта удается уменьшить технологические параметры вибрации при стационарном режиме работы вибрационного смесителя, что приводит к снижению его энергопотребления.

Конструкция прямоточнного вертикального вибрационного смесителя (рис. 1b) позволяет повысить качество получаемых мучных смесей и стабильность его работы. Это достигается путем движения основного потока смешиваемых компонентов смеси сверху вниз по перфорированному рабочему органу, а вспомогательный поток просеивается через отверстия. Это происходит за счет того, что внизу на сплошном витке смесителя закреплен разгрузочный патрубок для сбора полученной смеси. Это позволило изменить движение сыпучих компонентов внутри смесителя: основной поток компонентов под действием колебаний движется сверху вниз по перфорированному лотку рабочего органа, а часть смешиваемых компонентов ссыпается через отверстия. Таким образом, происходит наложение потоков материала с верхнего лотка на нижний. Также происходит их усреднение по ключевому компоненту смеси.

Конструкция каскадного вертикального вибрационного смесителя (рис. 1c) позволяет повысить качество получаемых мучных смесей путем поддержания на рабочем органе требуемого уровня компонентов 10–50 мм. Это достигается благодаря вырезанным секторам перфорированных плоских колец. Смешиваемые компоненты, двигаясь сверху вниз по плоским кольцам вокруг цилиндрической несущей колонны, сбрасываются на лежащую внизу ступень. Аналогично предыдущей конструкции через перфорацию часть материала опережающим потоком попадает на основной поток, идущий по нижнему лотку, тем самым усредняя качество получаемой смеси.

Вертикальные вибрационные смесители непрерывного действия (рис. 1), которые предполагается использовать для получения мучных смесей (порошков), мы изготовили для эмпирической оценки их производительности.

На рисунке 2 показано, как влияет высота слоя и частота колебаний при амплитуде 4,5 мм на скорость транспортирования муки вверх по сплошному рабочему органу с углом подъема 4°31`, а на рисунках 3 и 4 по перфорированному. В первом случае диаметр 10-ти отверстий составлял 5 мм, во втором 7 мм. Скорость движения муки растет с увеличением частоты колебаний рабочего органа f и размеров площади перфорации, а падает с повышением высоты слоя. В результате этой серии экспериментов установлено, что скорость движения муки выше по перфорированному лотку (рабочему органу). Это происходит за счет вибрационного подсасывания воздуха и вытеснения его сквозь слой материала, что создает более интенсивное витание твердой фазы.

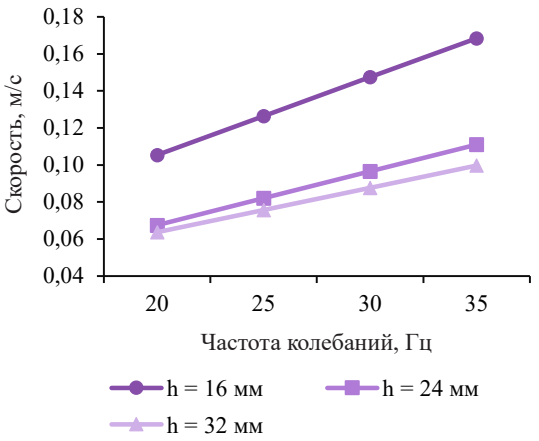

Рисунок 2. Скорость движения муки вверх по сплошному винтовому лотку

Figure 2. Feeding speed of flour up the screw tray

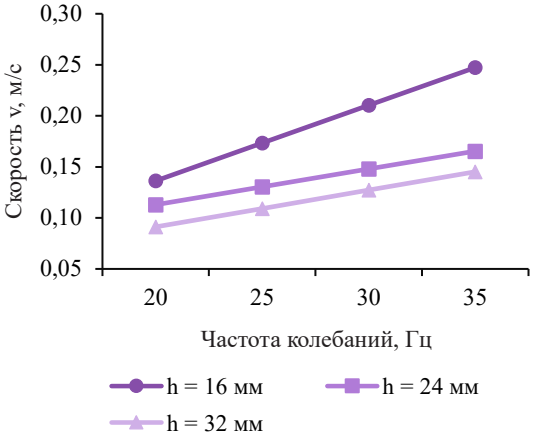

Рисунок 3. Скорость движения муки вверх по перфорированному винтовому лотку: $d_{отв}$ = 5 мм

Figure 3. Feeding speed of flour up the perforated screw tray: hole diameter = 5 mm

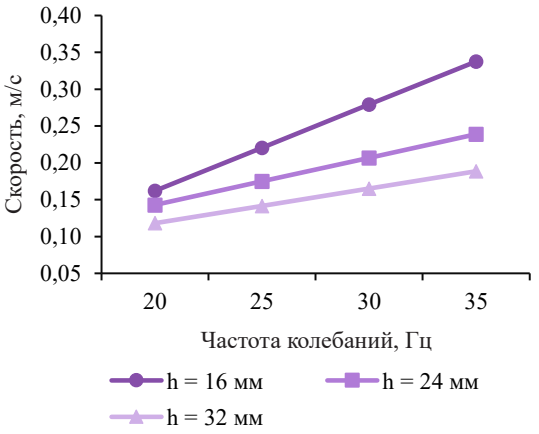

Рисунок 4. Скорость движения муки вверх по перфорированному винтовому лотку: $d_{отв}$ = 7 мм

Figure 4. Feeding speed of flour up the perforated screw tray: hole diameter = 7 mm

Подобный эффект реализован нами в подъемном смесителе (рис. 1a). Поскольку его рабочий орган полностью перфорирован, то производительность смесителя возросла в среднем в 1,5 раза по сравнению с контрольной конструкцией со сплошным лотком.

В каскадном смесителе (рис. 1c), по сравнению с подъемным (рис. 1a), за счет уменьшения угла наклона рабочего органа до горизонтального состояния повышена скорость транспортирования сыпучего материала по перфорированному кольцевому лотку (рис. 5 и 6).

Прямоточный смеситель (рис 1b), по сравнению с подъемным и каскадным аппаратами, имеет еще большую производительность за счет повышения скорости движения сыпучего материала по рабочему органу под уклон (рис. 7 и 8).

Для всех предложенных конструкций смесителей экспериментальные данные в диапазоне частот колебаний рабочего органа от 20,87 (1250 кол/мин) до 33,33 Гц (2000 кол/мин) хорошо аппроксимируются линейными уравнениями.

Используя формулы (1) и (2), мы дали аналитическую оценку эффективности работы смесителей. Результаты представлены в таблице 1 и в графическом виде на рисунках 9–15, где условное обозначение оси ординат, например, d5h16, трактуется следующим образом: первое число – диаметр отверстия (5 мм), второе – высота слоя (16 мм); по оси абсцисс f – частота колебаний рабочего органа (Гц).

Экспериментально доказали, что эффективность данных аппаратов возрастает пропорционально увеличению площади отверстий на рабочих витках смесителей (ее максимальное значение достигается при десяти отверстиях с диаметром 7 мм), а также от максимального слоя высоты муки, который не должен превышать 32 мм. Наиболее эффективным является прямоточный вибрационный смеситель (рис. 1b).

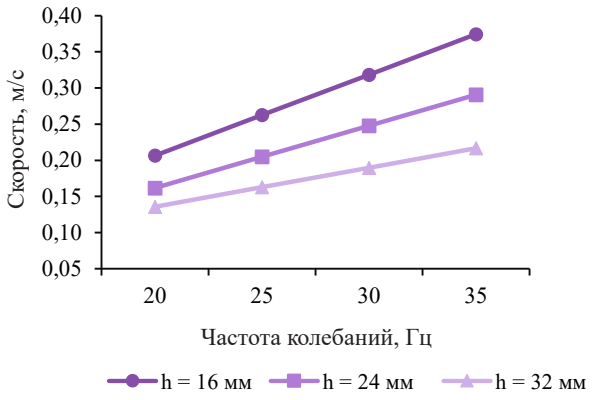

Рисунок 5. Скорость движения муки по перфорированному кольцевому лотку: $d_{отв}$ = 5 мм

Figure 5. Feeding speed of flour along the perforated ring tray: hole diameter = 5 mm

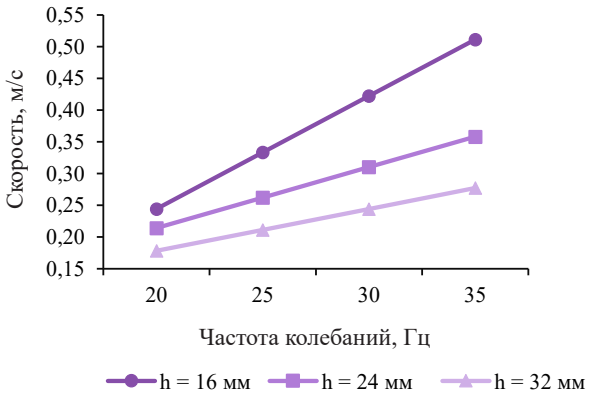

Рисунок 6. Скорость движения муки по перфорированному кольцевому лотку: $d_{отв}$ = 7 мм

Figure 6. Feeding speed of flour along the perforated ring tray: hole diameter = 7 mm

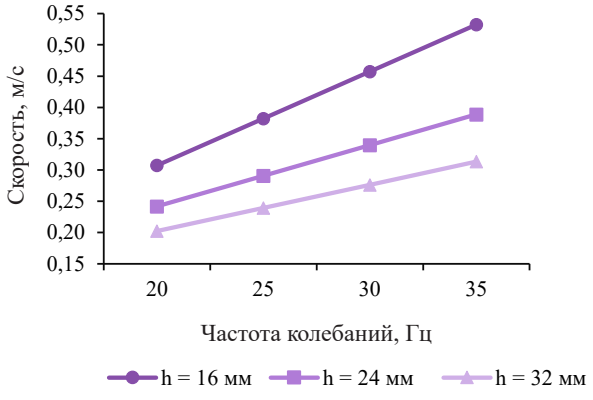

Рисунок 7. Скорость движения муки вниз по перфорированному кольцевому лотку: $d_{отв}$ = 5 мм

Figure 7. Feeding speed of flour down the perforated ring tray: hole diameter = 5 mm

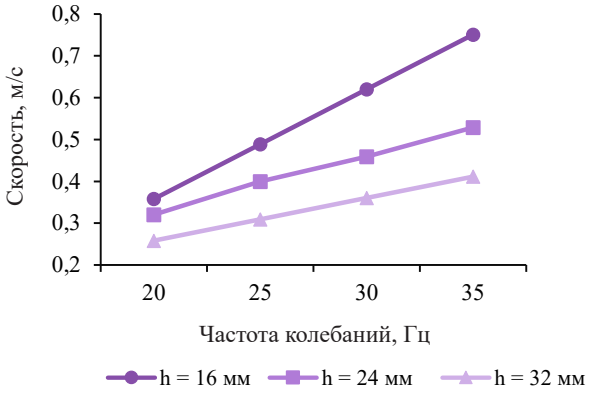

Рисунок 8. Скорость движения муки вниз по перфорированному кольцевому лотку: $d_{отв}$ = 7 мм

Figure 8. Feeding speed of flour down the perforated ring tray: hole diameter = 7 mm

Таблица 1. Эффективность работы экспериментальных вертикальных вибрационных смесителей

Table 1. Operating efficiency of experimental vertical vibrating mixers

Частота колебаний / Показатели	Гц	20,83		33,33	
	кол/мин	1250		2000	
Высота слоя, мм	–	16	32	16	32
Ширина лотка, мм	–	50	50	50	50
Мощность, Вт	–	330	330	816	816
Скорость на подъем, м/с (подъемный смеситель)	без перфорации	0,109	0,066	0,161	0,096
	d = 5 мм	0,142	0,094	0,235	0,139
	d = 7 мм	0,172	0,122	0,318	0,181
Скорость по кольцу, м/с (каскадный смеситель)	d = 5 мм	0,216	0,140	0,356	0,208
	d = 7 мм	0,259	0,184	0,482	0,266
Скорость под уклон, м/с (прямоточный смеситель)	d = 5 мм	0,320	0,209	0,507	0,301
	d = 7 мм	0,380	0,267	0,707	0,394
Эффективность (на подъем), кВт·ч/м^3 (подъемный смеситель)	без перфорации	0,952	1,149	0,570	0,676
	d = 5 мм	1,246	1,647	0,829	0,983
	d = 7 мм	1,502	2,134	1,123	1,276
Эффективность (по кольцу), кВт·ч/м^3 (каскадный смеситель)	d = 5 мм	1,887	2,452	1,256	1,466
	d = 7 мм	2,265	3,214	1,700	1,880
Эффективность (под уклон), кВт·ч/м^3 (прямоточный смеситель)	d = 5 мм	2,796	3,647	1,790	2,125
	d = 7 мм	3,320	4,664	2,496	2,782

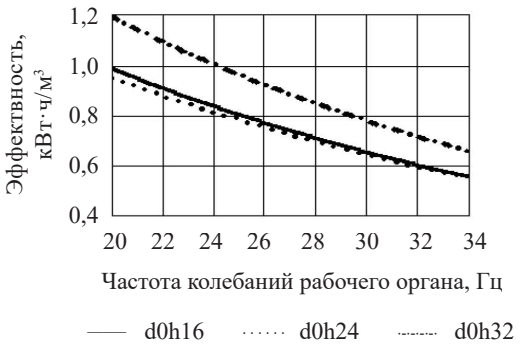

Рисунок 9. Эффективность подъемного смесителя со сплошным рабочим органом

Figure 9. Efficiency of the lifting mixer with a solid working body

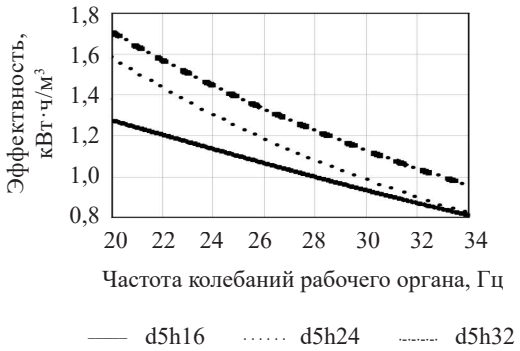

Рисунок 10. Эффективность подъемного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 10. Efficiency of the lifting mixer with a perforated working body

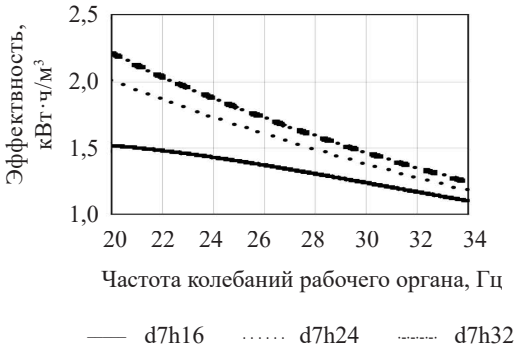

Рисунок 11. Эффективность подъемного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 11. Efficiency of the lifting mixer with a perforated working body

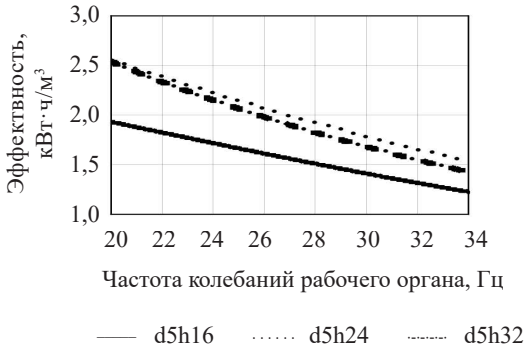

Рисунок 12. Эффективность каскадного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 12. Efficiency of the cascade mixer with a perforated working body

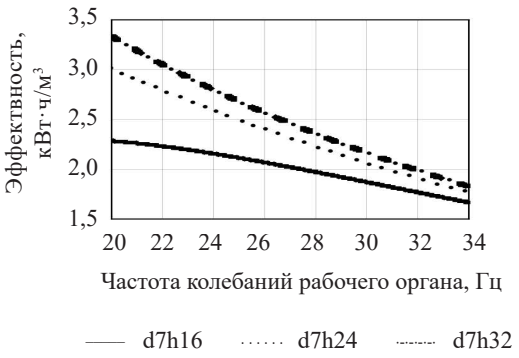

Рисунок 13. Эффективность каскадного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 13. Efficiency of the cascade mixer with a perforated working body

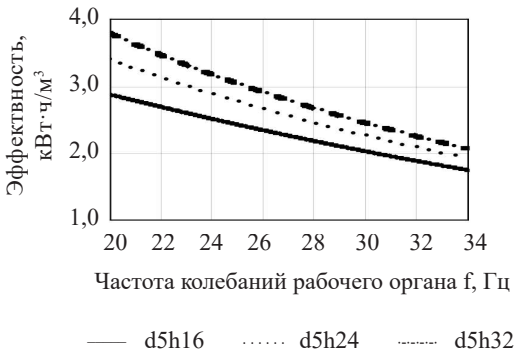

Рисунок 14. Эффективность прямоточного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 14. Efficiency of the flow mixer with a perforated working body

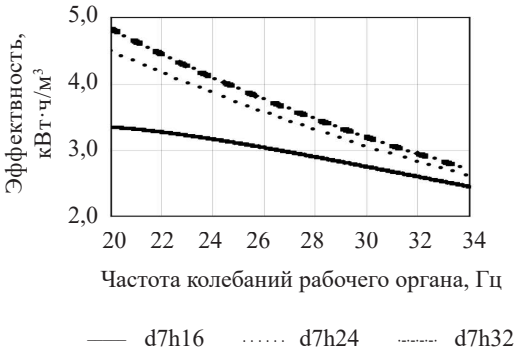

Рисунок 15. Эффективность прямоточного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 15. Efficiency of the flow mixer with a perforated working body

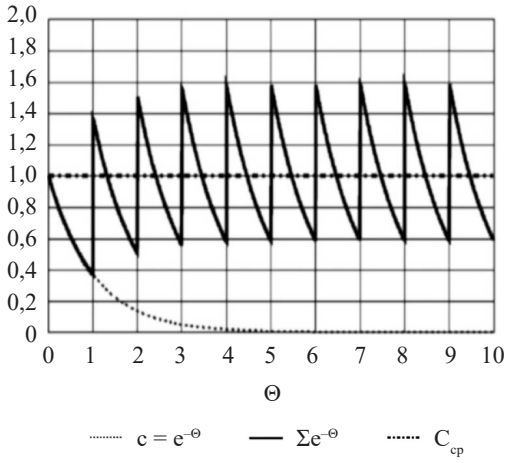

Рисунок 16. Расчетные кривые отклика проточного аппарата «идеального смешения» на цепочку входных δ-импульсов

Figure 16. Response curves of the flow “ideal mixer” calculated on a chain of input δ-pulses

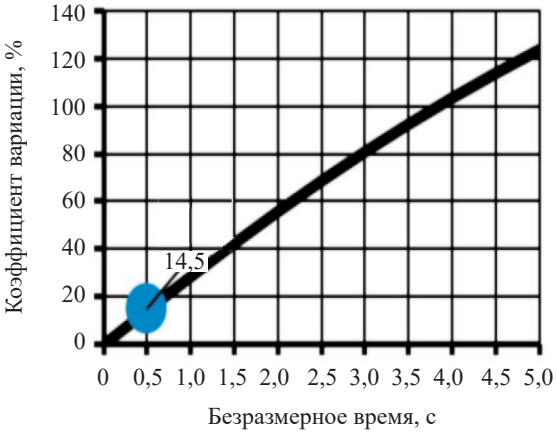

Рисунок 17. Зависимость изменения значения коэффициента вариации «ключевого» компонента в смеси от безразмерного времени его пребывания в аппарате «идеального смешения»

Figure 17. Effect of dimensionless time in the “ideal mixer” on the coefficient of variation of the key component in the mix

На основе анализа кривых отклика проточного смесителя на входной δ-импульс, полученных с помощью разработанной нами программы ЭВМ, теоретически спрогнозировали качество мучных смесей (рис. 16).

Периодичность импульсного дозирования ингредиентов в аппарат «идеального смешения» не должна превышать половины среднего времени пребывания. В этом случае качество смеси является удовлетворительным $Vc \leq 14{,}5$ % (рис. 17).

Анализ данных об откликах предложенных нами усовершенствованных конструкций вертикальных вибрационных смесителей на импульсный ввод трассера показал, что они близки к аппарату «идеального вытеснения», т. к. дисперсия $D\tau$ времени пребывания не превышает 0,23 (рис. 18).

Периодичность импульсного дозирования ингредиентов в реальный смеситель для получения сы-

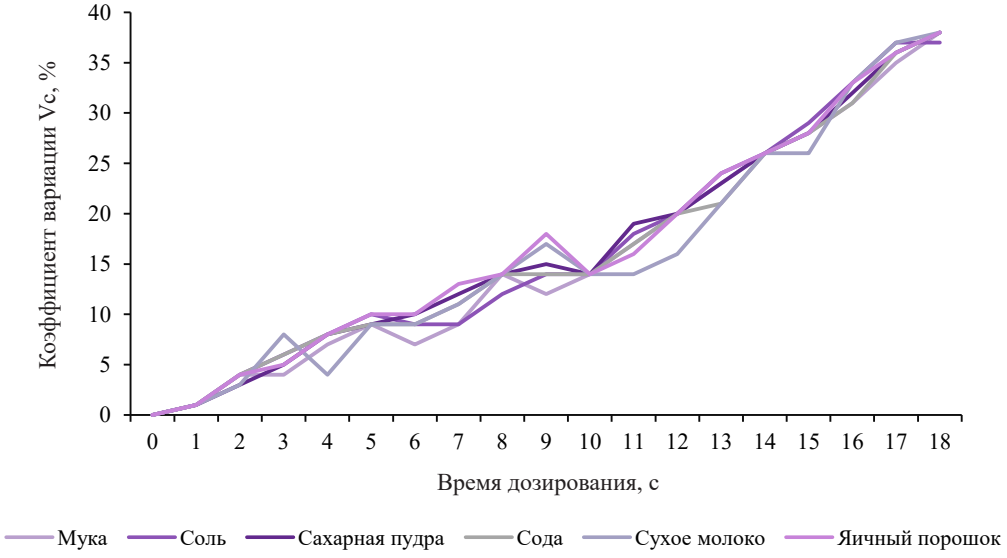

Рисунок 18. Зависимость коэффициента вариации смеси от периода дозирования при среднем времени пребывания трассера в смесителе 24,8 с

Figure 18. Effect of feeding period on the variation coefficient of the mix at 24.8 s average time of the tracer in the mixer

пучих композиций удовлетворительного качества (Vc ≤ 14,5 %) не должна превышать половины, а хорошего (Vc ≤ 6 %) четверти среднего времени пребывания частиц в аппарате.

Выводы

1. Научно обосновали возможность расширения области применения вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия, предназначенных для зернистых сыпучих материалов, на работу с мучными смесями (порошками). Предложили три конструктивных варианта вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия для получения мучных смесей (порошков): подъемный, прямоточный и каскадный;

2. Пшеничная мука, которая является основой мучных смесей, переходит на рабочем органе смесителя в устойчивое виброкипящее состояние в слоях толщиной не более 35 мм при амплитуде колебаний 4,5 мм и частоте более 20 Гц. Причем на перфорированной поверхности мука легче переходит в виброкипящее состояние по сравнению со сплошной поверхностью;

3. Скорость движения муки растет с увеличением частоты колебаний рабочего органа и размеров площади перфорации, но падает с повышением высоты слоя. Эффективность данных аппаратов возрастает пропорционально увеличению площади отверстий на рабочих витках смесителей (ее максимальное значение достигается при десяти отверстиях с диаметром 7 мм), а также от максимального слоя высоты муки, который не должен превышать 32 мм;

4. Предложенные конструкции смесителей близки к аппарату «идеального вытеснения». Наиболее эффективным из предложенных конструкций является прямоточный вибрационный смеситель;

5. Периодичность импульсного дозирования ингредиентов в смеситель для получения мучных смесей удовлетворительного качества (Vc ≤ 14,5 %) не должна превышать половины, а хорошего (Vc ≤ 6 %) четверти среднего времени пребывания частиц в аппарате.

Критерии авторства

Д. М. Бородулин – руководил работой, выполнял обзор и анализ публикаций по теме. М. Т. Шулбаева – проводила исследования и отвечала за написание рукописи. О. Н. Мусина – выполняла экспериментальные исследования и общую редакцию рукописи. Д. В. Сухоруков – выполнял расчеты, обработку и анализ полученных в ходе экспериментов данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

D.M. Borodulin supervised the research and reviewed scientific publications. M.T. Shulbaeva conducted the research and wrote the manuscript. O.N. Musina performed the experimental research and revised the manuscript. D.V. Sukhorukov was responsible for calculations, processing, and analysis of the experimental data.

Conflict of interest

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

References

1. van Zutphen KG, Lingala S, Bajoria M, Beesabathuni K, Kraemer K. The role of international agencies in achieving food security. In: Ferranti P, Berry EM, Anderson JR, editors. Encyclopedia of food security and sustainability. Elsevier; 2019. pp. 149–164. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22447-5

2. Brunstrom JM, Flynn AN, Rogers PJ, Zhai Yu, Schatzker M. Human nutritional intelligence underestimated? Exposing sensitivities to food composition in everyday dietary decisions. Physiology and Behavior. 2023;263. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114127

3. Jeddi MZ, Boon PE, Cubadda F, Hoogenboom R, Mol H, Verhagen H, *et al.* A vision on the "foodture" role of dietary exposure sciences in the interplay between food safety and nutrition. Trends in Food Science and Technology. 2022; 120:288–300. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.024

4. Ferreira H, Vasconcelos M, Gil AM, Pinto E. Benefits of pulse consumption on metabolism and health: A systematic review of randomized controlled trials. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021;61(1):85–96. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1716680

5. Mariotti F, Gardner DC. Dietary protein and amino acids in vegetarian diets – A review. Nutrients. 2019;11(11). https://doi.org/10.3390/nu11112661

6. Nosworthy MG, Hernandez-Alvarez AJ, Franczyk AJ, Medina G, Neufeld J, Arcand Y, *et al.* Effect of cooking on the in vitro and in vivo protein quality of soy, oat and wheat varieties. Cereal Chemistry. 2023;100(2):460–472. https://doi.org/10.1002/cche.10623

7. Hafizov SG, Musina ON, Hafizov GK. Extracting hydrophilic components from pomegranate peel and pulp. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(1):168–182. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2425

8. Afshin A, Sur PJ, Fay KA, Cornaby L, Ferrara G, Salama JS, *et al.* Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. The Lancet. 2019;393(10184):1958–1972. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30041-8

9. Livingstone KM, Ramos-Lopez O, Pérusse L, Kato H, Ordovas JM, Martínez JA. Reprint of: Precision nutrition: A review of current approaches and future endeavors. Trends in Food Science and Technology. 2022;130:51–62. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.10.010

10. Brennan L, de Roos B. Nutrigenomics: Lessons learned and future perspectives. The American Journal of Clinical Nutrition. 2021;113(3):503–516. https://doi.org/10.1093/ajcn/nqaa366

11. Bush CL, Blumberg JB, El-Sohemy A, Minich DM, Ordovás JM, Reed DG, *et al.* Toward the definition of personalized nutrition: A proposal by the American Nutrition Association. Journal of the American College of Nutrition. 2020; 39(1):5–15. https://doi.org/10.1080/07315724.2019.1685332

12. Rawat M, Varshney A, Rai M, Chikara A, Pohty AL, Joshi A, *et al.* A comprehensive review on nutraceutical potential of underutilized cereals and cereal-based products. Journal of Agriculture and Food Research. 2023;12. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100619

13. Laskowski W, Górska-Warsewicz H, Rejman K, Czeczotko M, Zwolińska J. How important are cereals and cereal products in the average polish diet? Nutrients. 2019;11(3). https://doi.org/10.3390/nu11030679

14. Martineau-Côté D, Achouri A, Pitre M, Wanasundara J, Karboune S, L'Hocine L. Investigation of the nutritional quality of raw and processed Canadian faba bean (*Vicia faba* L.) flours in comparison to pea and soy using a human *in vitro* gastrointestinal digestion model. Food Research International. 2023;173(1). https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113264

15. Vela AJ, Villanueva M, Ronda F. Physical modification caused by acoustic cavitation improves rice flour breadmaking performance. LWT. 2023;183. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114950

16. 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

17. Musina O, Putnik P, Koubaa M, Barba FJ, Greiner R, Granato D, *et al.* Application of modern computer algebra systems in food formulations and development: A case study. Trends in Food Science and Technology. 2017;64:48–59. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.011

18. Angizeh F, Montero H, Vedpathak A, Parvania M. Optimal production scheduling for smart manufacturers with application to food production planning. Computers and Electrical Engineering. 2020;84. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106609

19. Mensi A, Udenigwe CC. Emerging and practical food innovations for achieving the Sustainable Development Goals (SDG) target 2.2. Trends in Food Science and Technology. 2021;111:783–789. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.079

20. Aguilera JM. The food matrix: Implications in processing, nutrition and health. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2019;59(22):3612–3629. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1502743

21. Chadare FJ, Idohou R, Nago E, Affonfere M, Agossadou J, Fassinou TK, *et al.* Conventional and food-to-food fortification: An appraisal of past practices and lessons learned. Food Sciences and Nutrition. 2019;7(9):2781–2795. https://doi.org/10.1002/fsn3.1133

22. Granato D, Barba FJ, Kovačević DB, Lorenzo JM, Cruz AG, Putnik P. Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. Annual Review of Food Science and Technology. 2020;11:93–118. https://doi.org/10.1146/annurev-food-032519-051708

23. Jaspers M, Roelofs TP, Lohrmann A, Tegel F, Maqsood MK, Song YL, *et al.* Process intensification using a semi-continuous mini-blender to support continuous direct compression processing. Powder Technology. 2023;428. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118844

24. Bhalode P, Ierapetritou M. A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. Powder Technology. 2020;373:195–209. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.043

25. Tomita Y, Nagato T, Takeuchi Y, Takeuchi H. Control of residence time of pharmaceutical powder in a continuous mixer with impeller and scraper. International Journal of Pharmaceutics. 2020;586. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119520

26. Tomita Y, Takeuchi Y, Natsuyama S, Takeuchi H. Characteristics of residence time distribution in a continuous high shear mixer granulation using scraper rotation. International Journal of Pharmaceutics. 2021;605. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120789

27. Matuszek DB, Biłos ŁA. Computer image analysis as a method of evaluating the quality of selected fine-grained food mixtures. Sustainability. 2021;13(6). https://doi.org/10.3390/su13063018

28. Florian M, Velázquez C, Méndez R. New continuous tumble mixer characterization. Powder Technology. 2014;256:188–195. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.023

29. Lee KT, Kimber JA, Cogoni G, Brandon JK, Wilsdon D, Verrier HM, *et al.* Continuous mixing technology: Characterization of a vertical mixer using residence time distribution. Journal of Pharmaceutical Sciences. 2021;110(7):2694–2702. https://doi.org/10.1016/j.xphs.2021.01.035

30. Xiong H, Bao Y, Wang J, Cai Z. Power characteristic of adhesive particles mixing in a stirred tank. The Chinese Journal of Process Engineering. 2020;20(11):1273–1280. https://doi.org/10.12034/j.issn.1009-606X.220040

31. Zuo Z, Chen X, Gong S, Xie G. Numerical study of the mixing process of binary-density particles in a bladed mixer. Advanced Powder Technology. 2021;32(5):1502–1520. https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.03.009

32. Ebrahimi M, Yaraghi A, Jadidi B, Ein-Mozaffari F, Lohi A. Assessment of bi-disperse solid particles mixing in a horizontal paddle mixer through experiments and DEM. Powder Technology. 2021;381:129–140. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.041

33. Yari B, Beaulieu C, Sauriol P, Bertrand F, Chaouki J. Size segregation of bidisperse granular mixtures in rotating drum. Powder Technology. 2020;374:172–184. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.030

34. Golshan S, Blais B. Insights into granular mixing in vertical ribbon mixers. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2021;99(7):1570–1581. https://doi.org/10.1002/cjce.23965

35. Palmer J, Reynolds GK, Tahir F, Yadav IK, Meehan E, Holman J, *et al.* Mapping key process parameters to the performance of a continuous dry powder blender in a continuous direct compression system. Powder Technology. 2020;362:659–670. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.028

36. Deng T, Garg V, Salehi H, Bradley MSA. Correlations between segregation intensity and material properties such as particle sizes and adhesions and novel methods for assessment. Powder Technology. 2021;387:215–226. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.023

37. Bridgwater J. The mixing of cohesionless powders. Powder Technology. 1972;5(4):257–260. https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)80028-7

38. Hogg R. Characterization of relative homogeneity in particulate mixtures. International Journal of Mineral Processing. 2003;72(1–4):477–487. https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00121-2

39. Hogg R. Mixing and segregation in powders: Evaluation, mechanisms and processes. KONA Powder and Particle Journal. 2009;27:3–17. https://doi.org/10.14356/kona.2009005

40. Bridgwater J. Fundamental powder mixing mechanisms. Powder Technology. 1976;15(2):215–236. https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)80051-4

41. Kottlan A, Glasser BJ, Khinast JG. Vibratory mixing of pharmaceutical powders on a single-tablet-scale. Powder Technology. 2021;387:385–395. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.040

42. Asachi M, Nourafkan E, Hassanpour A. A review of current techniques for the evaluation of powder mixing. Advanced Powder Technology. 2018;29(7):1525–1549. https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.03.031

43. Matuszek DB, Bierczyński K, Jędrysiak A, Kraszewska A. Homogeneity of the selected food mixes. Czech Journal of Food Sciences. 2021;39(3):197–207. https://doi.org/10.17221/225/2020-CJFS

44. Bhalode P, Ierapetritou M. A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. Powder Technology. 2020;373:195–209. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.043

45. Cuq B, Berthiaux H, Gatumel C. Powder mixing in the production of food powders. In: Bhandari B, Bansal N, Zhang M, Schuck P, editors. Handbook of food powders: Processes and properties. Woodhead Publishing. 2013. pp. 200–229. https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.200

46. Borodulin DM, Zorina TV, Ivanets VN, Nevskaya EV, Turina OE, Borisova AE. Key operation parameters of the vibration mixer in the production of flour baking mixes. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(1):77–84. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-77-84

47. Mizonov V, Balagurov I, Berthiaux H, Gatumel C. Intensification of vibration mixing of particulate solids by means of multi-layer loading of components. Advanced Powder Technology. 2017;28(11):3049–3055. https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.09.016

48. Hashemnia K, Pourandi S. Study the effect of vibration frequency and amplitude on the quality of fluidization of a vibrated granular flow using discrete element method. Powder Technology. 2018;327:335–345. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.097

49. Dubkova N, Kharkov V, Ziganshin B. Effect of mode amplitude on power consumption in vibrating mixer. In: Radionov AA, Gasiyarov VR, editors. Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. Cham: Springer; 2021. pp. 362–369. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_42

50. Menbari A, Hashemnia K. Effect of vibration characteristics on the performance of mixing in a vertically vibrated bed of a binary mixture of spherical particles. Chemical Engineering Science. 2019;207:942–957. https://doi.org/10.1016/J.CES.2019.07.026