

## Исследование влияния вибрации на пористость и прочность гранул инстантированных напитков



А. М. Попов , К. Б. Плотников\* , П. П. Иванов ,  
И. Б. Плотников , Д. М. Попов , И. О. Плотникова

Кемеровский государственный университет , Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 15.09.2021

Поступила после рецензирования: 24.01.2022

Принята к публикации: 14.02.2022

\*e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com

© А. М. Попов, К. Б. Плотников\*, П. П. Иванов,  
И. Б. Плотников, Д. М. Попов, И. О. Плотникова, 2022



### Аннотация.

На рынке в широком ассортименте представлены инстантированные продукты питания, произведенные разными способами и методами. Поэтому повышение эффективности производства и снижение брака данного вида продукции является актуальной задачей в условиях высокой конкуренции. Целью работы является совершенствование процесса структурообразования гранулированных инстантированных продуктов.

В качестве объекта исследования выступает барабанный виброагрегат, в котором реализован метод управляемых сегрегированных потоков при получении гранулированного инстантированного продукта. Проводились исследования гранулометрического состава, пористости и прочности получаемых гранул на истирание и раздавливание, в зависимости от значений варьируемых параметров установки, с применением вибрационного классификатора в виде вертикальной пластины.

Новая конструкция барабанного виброагрегата с установленным классификатором позволила стабилизировать гранулометрический состав готового продукта за счет вибрационного измельчения гранул большего размера, чем определено требованиями. Установлено влияние частоты и амплитуды колебаний на пористость и прочность получаемых гранул. Скорость вращения ленточной мешалки оказывала большее влияние на процесс агломерирования, чем амплитуда и частота колебаний вибровозбудителя. Выявлена зависимость пористости и прочности получаемых гранул от варьируемых параметров работы классификатора. Согласно ей можно устанавливать необходимые режимные параметры в зависимости от требуемых свойств готовой продукции. Обработка экспериментальных данных позволила установить рациональные параметры процесса при производстве инстантированного гранулированного напитка в барабанном виброагрегате: частота и амплитуда колебаний вибровозбудителя 1 мм и 40 Гц соответственно; частота вращения мешалки 7 об/мин; угол наклона барабана 3°; амплитуда и частота виброклассификатора 2 мм и 100 Гц соответственно.

В результате проведенных исследований были установлены рациональные параметры процесса, а внедрение вибрационного классификатора повысило плотность распределения гранулометрического состава получаемого продукта.

**Ключевые слова.** Инстантированный напиток, гранулы, гранулирование, структурообразование, пористость, прочность, истирание, виброкатыватель, классификатор

**Для цитирования:** Исследование влияния вибрации на пористость и прочность гранул инстантированных напитков / А. М. Попов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 1. С. 58–69. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-58-69>

## Effect of Vibration on the Porosity and Strength of Instant Drink Granules

Anatoliy M. Popov<sup>ID</sup>, Konstantin B. Plotnikov\*<sup>ID</sup>, Pavel P. Ivanov<sup>ID</sup>,  
Igor B. Plotnikov<sup>ID</sup>, Dmitry M. Popov<sup>ID</sup>, Irina O. Plotnikova<sup>ID</sup>

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

Received: 15.09.2021

Revised: 24.01.2022

Accepted: 14.02.2022

\*e-mail: [k.b.plotnikov.rf@gmail.com](mailto:k.b.plotnikov.rf@gmail.com)

© A.M. Popov, K.B. Plotnikov, P.P. Ivanov,  
I.B. Plotnikov, D.M. Popov, I.O. Plotnikova, 2022



### Abstract.

Instant food products are extremely popular, and food industry knows numerous ways and methods of their production. To remain competitive, an instant drink production process should be efficient and flawless. The research objective was to improve the physical profile of granular instant products.

The study featured a vibrating drum unit controlled segregated flows. The granulometric composition, porosity, and strength of the obtained granules were tested in a vertical vibration classifier.

The new design of the drum with an installed classifier was able to grind larger granules. The research revealed the effect of frequency and amplitude on the porosity and strength of the granules. The rotation rate of the belt mixer had a greater effect on the agglomeration process than the amplitude and frequency of the vibrations in the generator. The porosity and strength of the granules depended on the parameters of the classifier. Therefore, the new drum design made it possible to control the operating parameters depending on the required properties of the finished product. The rational parameters were obtained as follows: frequency and amplitude of the vibration generator – 1 mm and 40 Hz, respectively; rotation speed – 7 rpm; drum tilt angle – 3°; amplitude and frequency of the classifier – 2 mm and 100 Hz, respectively.

The study revealed the optimal technological parameters for a new instant drink. The new vibration classifier increased the distribution density of the granular composition.

**Keywords.** Instant drink, granules, granulation, structure formation, porosity, strength, abrasion, vibro-roller, classifier

**For citation:** Popov AM, Plotnikov KB, Ivanov PP, Plotnikov IB, Popov DM, Plotnikova IO. Effect of Vibration on the Porosity and Strength of Instant Drink Granules. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(1):58–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-58-69>

### Введение

Инстантированные продукты питания все больше внедряются в повседневный рацион населения России и зарубежных стран. Это связано с удобством их использования в быту, т. к. они обладают длительным сроком хранения, а время их приготовления составляет от нескольких секунд (детские гранулированные чаи фирмы Bebita) до нескольких минут (быстрорастворимые кисели фирмы ООО НПО «Здоровое питание») в зависимости от состава инстантированного продукта. Инстантированные напитки внедряются и в систему общественного питания [1, 2].

Большинство инстантированных продуктов представлены в виде хлопьев или гранул. Это обусловлено тем, что гранулированный продукт быстрее растворяется, а гранулы уже содержат в себе равное количество рецептурных компонентов [2, 3]. При транспортировке порошкообразных продуктов,

не подвергшихся грануляции, происходит процесс сегрегации, что приводит к тому, что частицы большего размера занимают верхнее положение, а частицы меньшего размера перемещаются в нижнее. Это приводит к расслоению продукта по крупности и плотности, а приготовление напитка, содержащего заданные пропорции рецептурных компонентов, становится невозможным [4].

Существует большое разнообразие способов получения гранулированных продуктов, имеющих свои достоинства и недостатки. Необходимо учитывать технико-экономические показатели выбранного способа и возможность получения готового продукта с заданными свойствами.

Согласно исследованиям компании Lighthouse энергопотребление в российской промышленности превышает уровень зарубежных аналогов на 40–220 %, а при сохранении нынешних темпов развития снизить энергоёмкость ВВП на 60 % удастся

лишь к 2043 г. Это является неприемлемым для создания условий конкурентоспособного производства. Поэтому актуальной задачей является совершенствование аппаратного оформления процессов производства готовой продукции. Одним из способов повышения эффективности работы является метод агрегатирования, т. е. совмещение нескольких процессов в одном агрегате. Это должно снизить энергоемкость, металлоемкость и площадь, занимаемую оборудованием [5, 6].

Инстантированные гранулированные продукты производят из порошкообразного сырья с последующим структурообразованием. Порошковая система отличается тем, что в объеме порошка имеется несколько состояний материала. Порошки состоят из твердых частиц. Поры, существующие между частицами, заполнены газом или смесью газа и жидкости. По этой причине фундаментальные молекулярные свойства материала, из которого состоит порошок, могут иметь небольшое влияние на объемные механические свойства порошка. Физические свойства частиц в порошке, такие как гранулометрический состав и форма, оказывают значительное влияние на поведение порошка в массе. Таким образом, способность охарактеризовать свойства частиц в порошке важна для характеристики порошка как системы [7, 8].

В процессе гранулирования происходит сцепление частиц материалов за счет сил различной природы. Притяжение между частицами измеряется как адгезия частиц или сила, удерживающая две частицы вместе и предотвращающая разделение. Это функция от поверхностной энергии частиц включает как Ван-дер-Ваальсовы уравнения, так и электростатическое притяжение между частицами [9–11]. Когда речь идет об адгезии между двумя частицами, то факторами, определяющими количество взаимодействий, являются размер и форма частицы, а также степень сжатия. Качество взаимодействий зависит от химического состава поверхности и поверхностной свободной энергии частиц. Размер частиц имеет значение из-за силы тяжести. Для частиц большего размера преобладают гравитационные силы, но для частиц меньшего размера адгезия и трение играют большую роль [12]. Это причина того, что мелкие частицы имеют тенденцию к агломерации друг с другом, особенно когда размер отдельных частиц становится меньше нескольких мкм. В этом масштабе силы притяжения между частицами становятся сопоставимыми с гравитационными силами, разрывающими их [13].

Капиллярные силы из-за влаги, присутствующей на поверхности частиц, могут увеличить притяжение частиц. Силы трения влияют на поток частиц, прилегающих друг к другу, и зависят от коэффициента трения поверхности частицы и нормальной силы в точке контакта. Нормальная

сила в контакте контролируется осевой нагрузкой на сборку насыпного порошка и конфигурацией составляющих частиц. Каждая точка контакта между двумя частицами является точкой для присутствия адгезионных, капиллярных и сил трения. Таким образом, координационное число частицы, а также нагрузка в каждой точке контакта имеют влияние на объемное поведение порошка [14].

Межчастичная адгезия, фракционный состав, трение частиц и капиллярные силы вносят вклад в сложность определения характеристик сыпучего порошка. Обычным показателем для измерения этого объемного поведения является когезия. Вибрация распространена в процессе обработки твердых частиц. Она используется для таких применений, как транспортирование, просеивание, измельчение, уплотнение, смешивание и гранулирование [15]. По этим причинам динамическое поведение материалов при механической вибрации имеет большое значение для обработки сыпучих сред. Однако нет адекватного понимания поведения слоя частиц, подвергающихся вибрации. Необходимо глубокое изучение влияния режимных параметров на процесс классификации уже сформированных гранул.

Целью работы является совершенствование процесса структурообразования гранулированных инстантированных продуктов.

#### **Объекты и методы исследования**

В качестве объекта исследований выступил барабанный виброагрегат (рис. 1), в котором последовательно проводятся процессы структурообразования и сушки полученных гранул теплоносителем [16]. Барабанный виброагрегат работает следующим образом. Исходная смесь сыпучих компонентов поступает в барабанный виброгранулятор, где на нее накладывается вибрационное поле от вибровозбудителя. В результате смесь переводится в виброоживленное состояние и на ее поверхность подается связующий раствор. Перемещение гранул к выходному патрубку происходит за счет вибрационного воздействия. Не сформированные гранулы перемещаются в обратном направлении и поднимаются в верхнюю часть машины ленточной мешалкой. Сформированные гранулы в барабанный виброгранулятор поступают по эластичному рукаву 3 в барабанный виброокатыватель-сушилку 2, куда по тангенциально расположенному относительно корпуса патрубку подается теплоноситель, получаемый спиралеобразную траекторию. Высушенный продукт выгружается из барабанного виброокатывателя-сушилки под действием вибрационного поля.

Данная конструкция относится к машинам непрерывного действия. При анализе работы был выявлен следующий недостаток конструкции: при длительной работе изменяется гранулометрический

состав готового продукта в сторону увеличения количества гранул размером, превышающим 3 мм. Мелкая фракция возвращается ленточной мешалкой в зону распыла связующего раствора, а для гранул большего размера нет никаких препятствий для перемещения из барабанного виброгранулятора в виброкатыватель-сушилку. В этой связи была предложена модернизация данной конструкции, заключающаяся в установке вибрационного классификатора, который представляет из себя U-образную пластину, совершающую колебательные движения с заданной частотой и амплитудой.

Иллюстрация процесса структурообразования гранул в барабанном виброгрануляторе, а также их классификация представлена на рисунке 2 в виде упрощенного сегмента установки. Смесь сухих компонентов (сахарная пудра, картофельный крахмал) поступает через загрузочный патрубок и попадает в зону распыла связующего раствора (концентрированный экстракт ягод). Исходная сыпучая смесь переводится в виброожиданное состояние и перемещается вдоль машины в сторону разгрузочного патрубка за счет наклона корпуса барабанного виброгранулятора относительно горизонтальной плоскости на угол  $3^\circ$ . В зоне распыла происходит соударение частиц как между собой, так и со связующим раствором, что приводит к образованию гранул. Поскольку получаемые гранулы имеют разный размер и массу, то происходит процесс сегрегации потока за счет вибрационного поля, накладываемого на гранулируемый продукт (зона 2). Затем происходит захват гранул лопатками мешалки, погруженными в продукт на глубину  $h$  в зоне 3, и

их поднятие вдоль внутренней поверхности корпуса с последующим опрокидыванием. Перемешанный продукт в зоне 4 после опрокидывания гранул в зоне 3 приводит к их росту и постепенной сегрегации потока в зоне 5. Данный процесс повторяется циклично на протяжении всего времени прохождения продукта вдоль машины к разгрузочному патрубку. Мелкая фракция удаляется ленточной мешалкой в зону 1 распыла связующего раствора, а гранулы требуемого и большего размера поступают в зону 6 классификации гранул. Гранулы в процессе обтекания U-образной пластины подвергаются классификации. Мелкая фракция (зона 7) возвращается мешалкой, а гранулы требуемого размера перемещаются к разгрузочному патрубку и поступают в барабанный виброкатыватель-сушилку для дальнейшего удаления влаги.

Проводилось исследование гранулометрического состава, пористости и прочности получаемых гранул на истирание и раздавливание.

Гранулометрический состав определялся ситовым методом [17]. Пористость структуры гранул равна отношению свободного объема  $V_c$ , не заполненного элементарными структурами частицами, к общему объему  $V$  тела [18, 19]:

$$\dot{I} = \frac{V_c}{V} = 1 - \frac{V_T}{V} = 1 - T \quad (1)$$

где  $V_T$  – объем твердого скелета или матрицы,  $m^3$ ;  $T$  – доля объема тела, занятая компактной или твердой частью, %.

С целью определения пористости получаемых гранул до и после изменения конструкции барабанного

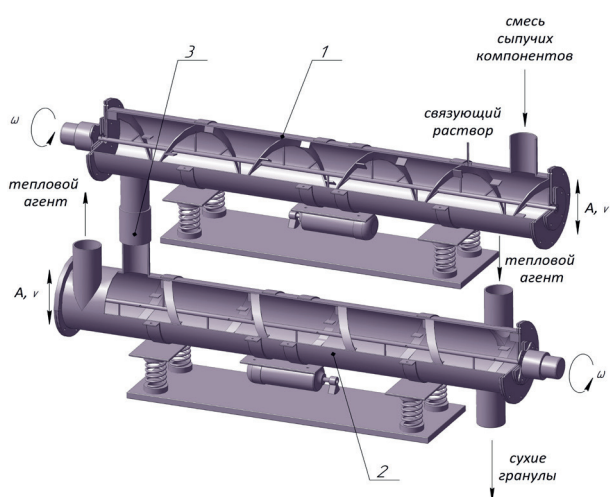


Рисунок 1. Барабанный виброагрегат:  
1 – барабанный виброгранулятор; 2 – барабанный виброкатыватель-сушиллка; 3 – эластичный рукав

Figure 1. Drum vibrating unit:  
1 – drum vibrogranulator; 2 – drum vibro-dryer; 3 – elastic sleeve

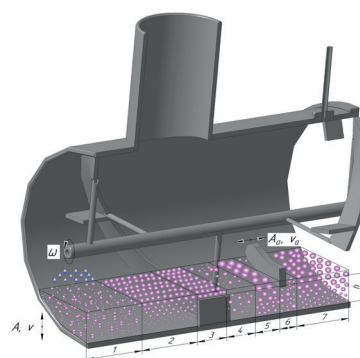


Рисунок 2. Схема сегмента барабанного виброгранулятора:

1 – зона распыла связующего раствора; 2 – зона сегрегации потока; 3 – зона захвата и подъема несформированных гранул; 4 – зона активного перемещения гранул; 5 – зона сегрегации потока; 6 – зона классификации; 7 – зона сегрегации потока

Figure 2. Drum vibrogranulator: 1 – binder solution spray zone; 2 – flow segregation zone; 3 – capture and lifting of unformed granules; 4 – active movement of granules; 5 – flow segregation zone; 6 – classification zone; 7 – flow segregation zone



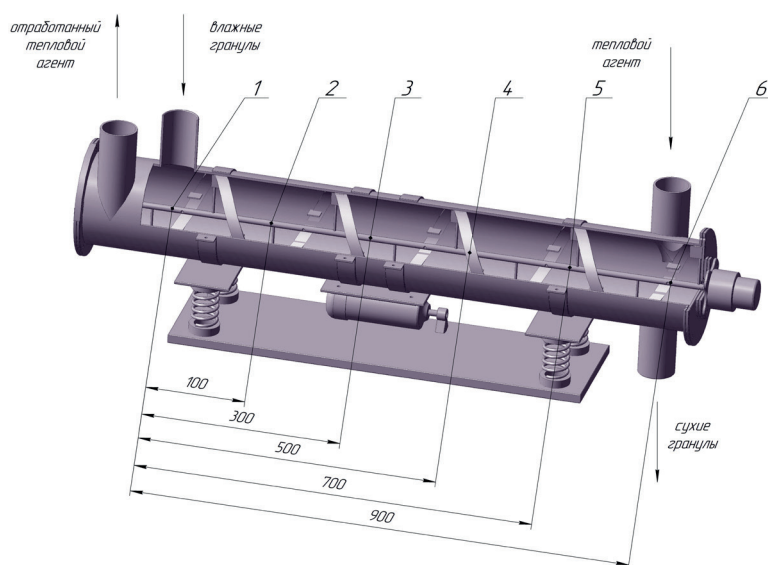


Рисунок 3. Барабанный виброкатыватель-сушилка:

1 – зона подачи продукта; 2, 3, 4, 5 – зоны отбора проб; 6 – зона выгрузки готового продукта

Figure 3. Drum vibro-dryer: 1 – product supply; 2, 3, 4, 5 – sampling; 6 – unloading

виброгранулятора использовался стандартный объемно-весовой метод [20].

Истирание – это процесс выкрашивания из-за повреждений материала за счет сил трения и кинетического удара. Истиранию подвергаются гранулы в процессе сушки, классификации и транспортировки до потребителя. В результате истирания образуется мелкодисперсная фракция, которая увеличивает пылеунос в процессе конвективной сушки, снижает выход готовой продукции, увеличивает энергозатраты на повторную обработку продукта и снижает во время транспортировки конкурентоспособность готовой продукции на рынке.

В процессе сушки дисперсного материала сначала происходит миграция влаги с поверхности гранулы к тепловому агенту, а затем диффундирование влаги из центра к периферии гранулы. В первый период процесса сушки истирание незначительно, т. к. еще сильны жидкие мостики между сухими компонентами дисперсионной среды гранулы. Следовательно, силы Ван-дер-Ваальса превышают силы трения между гранулами. До образования твердых мостиков и дальнейшей кристаллизации гранулы имеют эластичную структуру, которая менее склонна к истиранию [21, 22].

Для определения истирания полученных гранул в процессе сушки в барабанном виброагрегате проводились отборы проб по длине аппарата. На рисунке 3 изображена схема отбора проб. Отбор проб производился после выхода экспериментальной установки на рабочий режим. Отбиралось по 3 пробы на каждом участке через равные промежутки

времени. Отбор проб производился через патрубки, установленные в нижней части аппарата. После ситового анализа проб мелкодисперсная фракция, которая образуется в результате истирания, подвергалась микроскопическому исследованию [23–25].

Экспериментальная часть исследования проводилась в производственном цехе ООО НПО «Здоровое питание» (Кемерово). Для определения средних значений эксперимент повторяли трижды.

Для определения истирания готовых высушенных гранул проводилась серия экспериментов на лабораторной установке, представленной на рисунке 4. По внутренней поверхности барабана установлено 12 лопастей прямоугольного сечения, расположенных под углом  $20^\circ$  к касательной барабана. Лопасты при вращении барабана захватывают гранулы и перемещают их по периферии в верхнюю часть, откуда они ссыпаются. Частота вращения барабана составляет 20 об/мин, время проведения измерения 5 мин.

Методика проведения испытаний заключается в следующем: производится отбор проб гранул, высушенных и обеспыленных, а затем взвешивание на аналитических весах с точностью до 0,001 г. После гранулы помещают в барабан и закрывают крышку. По истечении времени проведения исследования установку отключают, вынимают образцы и обеспылевают с последующим взвешиванием. Разница в массе до и после измерений показывает значение истираемости гранул.

Для определения степени влияния режимных параметров процесса на конечную статическую

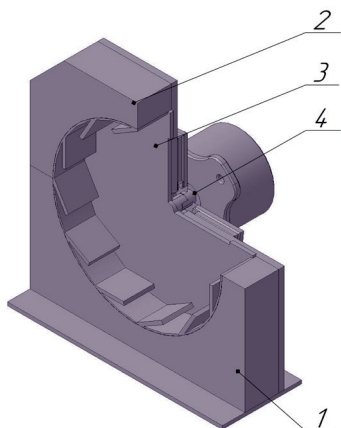


Рисунок 4. Общий вид экспериментальной установки для определения истирания полученных гранул  
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – барабан; 4 – привод

Figure 4. Experimental unit for attrition tests: 1 – body; 2 – cover; 3 – drum; 4 – drive

прочность проводилось их разрушение гранул на установке КП-3. Для исключения разницы готовых гранул по влажности их помещали в эксикатор на 24 ч. До и после высушивания в эксикаторе готовые гранулы подвергались взвешиванию на аналитических весах с ценой деления 0,001 мг. После окончательного высушивания гранулы помещались в установку КП-3, где подвергались статическому разрушению. Момент разрушения фиксировался визуально. Для

определения средней прочности гранул проводилось по 20 испытаний. Затем определялось среднее значение в зависимости от размера гранул.

В таблице 1 представлены регулируемые параметры проведения процесса гранулирования в барабанном виброагрегате.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 5 представлена зависимость среднемедианного размера гранул по длине барабанного виброгранулятора при разном времени непрерывной работы. В результате продолжительного времени работы происходит изменение среднемедианного размера получаемых гранул в сторону их увеличения. Это связано с принципом работы установки: мелкие частицы повторно возвращаются в зону грануляции, а частицы большего размера перемещаются в барабанный виброкатыватель-сушилку 2 (рис. 1). Процесс структурообразования гранул становится не стабильным. Еще одним недостатком увеличения размера гранул и дисперсного состава является сложность регулирования процесса сушки в барабанном виброкатывателе-сушилке, поскольку подбор рациональных параметров процесса осуществляется для частиц со среднемедианным размером от 1 до 3 мм. Процесс сушки гранул большего размера затруднен в силу того, что для данного дисперсного состава увеличивается время на проведение второго периода сушки.

Анализ данных позволил сделать вывод о том, что увеличение частоты и амплитуды колебаний

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

Table 1. Experimental conditions

Фактор	Обозначение факторов	Уровни		Центр эксперимента	Шаг варьирования
		Нижний	Верхний		
Амплитуда колебаний ( $A$ ), мм	$X_1$	0,50	3,00	1,75	0,50
Частота колебаний ( $\nu$ ), Гц	$X_2$	20	50	35	10
Частота вращения мешалки ( $n$ ), об/мин	$X_3$	3	12	7,5	1,0
Угол наклона БВГ ( $\alpha$ ), °	$X_4$	2,5	6	4,25	0,50
Плотность связующего раствора ( $\rho_{\text{св}}$ ), кг/м <sup>3</sup>	$X_5$	1014	1118	1066	52
Вязкость связующего раствора ( $\mu_{\text{св}}$ ), Па·с	$X_6$	$1,03 \times 10^{-3}$	$2,91 \times 10^{-3}$	$1,97 \times 10^{-3}$	$0,94 \times 10^{-3}$
Поверхностное натяжение связующего раствора ( $\sigma_{\text{св}}$ ), Н/м	$X_7$	45,70	59,60	52,65	6,95
Скорость сушильного агента ( $U$ ), м/с	$X_8$	1	3	2	1
Температура сушильного агента ( $t$ ), °C	$X_9$	45	65	55	10
Амплитуда колебаний U-образной пластины ( $A_{\text{д}}$ ), мм	$X_{10}$	1	3	2	0,5
Частота колебаний U-образной пластины ( $\nu_{\text{д}}$ ), Гц	$X_{11}$	20	120	70	10

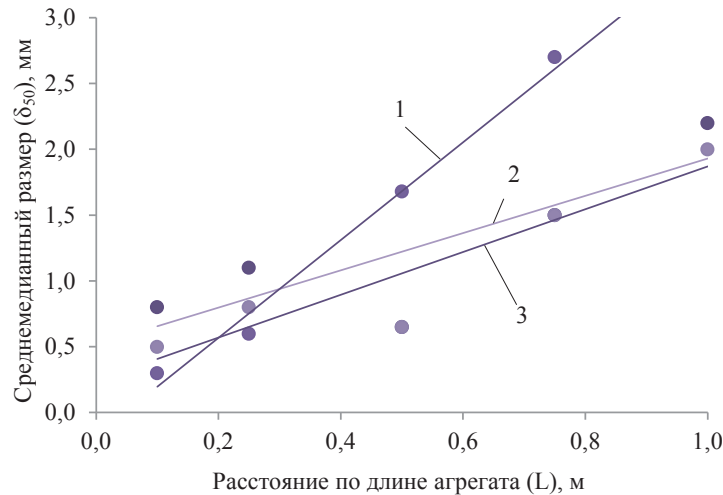


Рисунок 5. Зависимость среднемедианного размера частиц от расстояния по длине агрегата по времени: 1 – 20 мин; 2 – 60 мин; 3 – 60 мин с установленным вибрационным классификатором

Figure 5. Effect of the length of the unit on the average median particle size: 1 – 20 min; 2 – 60 min; 3 – 60 min (with a vibration classifier installed)

барабанного виброгранулятора оказывает меньшее воздействие на процесс агломерирования частиц, чем частота вращения мешалки. Это связано с тем, что при увеличении частоты вращения последней увеличивается время нахождения гранулируемого продукта в машине. При увеличении частоты вращения мешалки время нахождения дисперсной системы в зоне грануляции увеличивается, хотя при соударении частиц происходит частичное разрушение образовавшихся агломератов. Однако данного влияния недостаточно для стабилизации дисперсного состава получаемого гранулята. Частота и амплитуда колебаний корпуса барабанного виброгранулятора изменялись в диапазоне, указанном в таблице 1, в пределах, позволяющих создать виброожиженный слой продукта, который подвергался сегрегации. Поэтому данных значений величин было недостаточно для снижения размеров гранул и разрушения образовавшихся агломератов размерами, превышающих требуемые. Поэтому режимными параметрами устранить данный недостаток не представляется возможным. Линия 3 (рис. 5) показывает среднемедианный размер гранул при установке в агрегат вибрационного классификатора. Пластина входит в контакт с гранулами, имеющими наибольшие размеры. Наложение вибрационного поля на продукт приводит к разрушению гранул большего размера и их дальнейшему перераспределению. Образовавшиеся мелкие частицы займут крайнее нижнее положение в управляемом сегрегированном потоке откуда они будут захвачены мешалкой и транспортированы в зону грануляции, а гранулят с большими размерами частиц, занимая верхнее положение, переместится через эластичный рукав

в барабанный виброокатыватель-сушилку. Согласно графику средний размер частиц становится более стабильным при использовании вибрирующей пластины. При внедрении данного технического решения были проведены серии экспериментов на время стабильной работы в течение 180 мин. Полученные данные имели такие же близкие значения, как и при 60 мин (линия 3, рис. 5).

Из гистограммы плотности распределения частиц гранулята по истечении 60 мин работы барабанного виброгранулятора (рис. 6) видно, что до внедрения вибрационного классификатора наблюдалось изменение гранулометрического состава в сторону его увеличения. При этом не наблюдалось наличие мелкой фракции в готовой продукции. Это связано с тем, что частицы большего размера беспрепятственно перемещались в зону разгрузки барабанного виброгранулятора, минуя спиральную мешалку, в отличие от мелких частиц, которые транспортировались в зону грануляции и дополнительно в процессе окатывания подвергались агломерированию и занятию верхнего положения в управляемом сегрегированном потоке.

Обоснование рационального размера частиц, при котором наблюдалась наибольшая пористость и поглощающая способность, изложено в работе [5] и находится в пределах от 1 до 3 мм. Из данных, представленных на рисунке 6, видно, что при наложении вибрации на частицы большего размера в пределах, указанных в таблице 1, наблюдается их разрушение. Доля мелкой фракции в готовой продукции сравнима с прототипом агрегата. Размер полученного гранулята лежит в зоне необходимых размеров частиц. Пробы для исследований брались

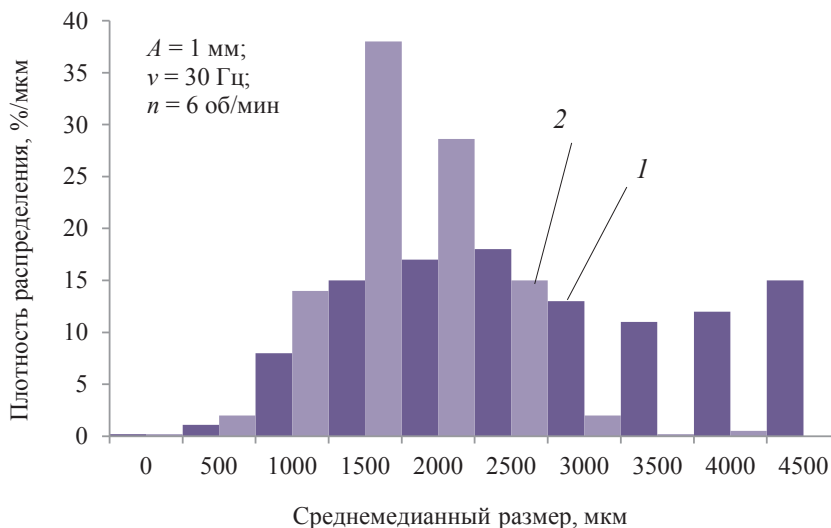


Рисунок 6. Гистограмма распределения плотности получаемых гранул  
 1 – без вибрационного классификатора; 2 – с классификатором

Figure 6. Density distribution: 1 – without a vibration classifier; 2 – with a classifier

после выхода установки на рабочий режим и по истечении 60 мин работы.

Обработку результатов экспериментов проводили в среде статистического пакета STATISTICA 12.0. Получена экспериментально-статистическая модель, описывающая процесс агломерирования в агрегате:

$$\delta_{50} = 0,148 + 0,83 \cdot X_1 + 0,012 \cdot X_2 + 0,05 \cdot X_3 - 0,1 \cdot X_4 + 145 \cdot X_6 \cdot X_1 - 0,1 \cdot X_{10} - 4 \times 10^{-3} \cdot X_{11} \quad (2)$$

Анализ полученного выражения дает наглядное представление о влиянии каждого фактора на среднемедианный размер полученного гранулированного инстантированного продукта: увеличение частоты и амплитуды колебаний приводит к снижению размера полученного продукта. При анализе влияния свойств связующего раствора на размеры получаемых гранул была определена прямая зависимость. Согласно ей увеличение концентрации используемого экстракта приводило к увеличению получаемых гранул.

Значения коэффициентов пористости, полученные в результате исследования образцов гранулированного инстантированного продукта, представлены на рисунке 7. Увеличение частоты и амплитуды колебаний вибрационного классификатора снижает пористость конечного продукта. Это связано с более плотной укладкой частиц в грануле. Величина пористости инстантированных напитков влияет на их растворимость в воде при приготовлении готового продукта. Не стоит забывать, что увеличение пор гранулированных продуктов приводит к снижению

их прочности. Поэтому поиск рациональных параметров сводится к удовлетворению требований, предъявляемых к продукции.

На рисунке 8 представлены результаты исследований истирания гранул при различных значениях частоты и амплитуды колебаний вибрационного классификатора. Величина истирания показывает склонность продукта к образованию мелких частиц в процессе транспортировки. Поэтому для минимизации образования пылевидной фракции следует проводить процесс классификации при максимально возможных значениях амплитуды и частоты колебаний вибрационной пластины с учетом их влияния на прочность и пористость получаемых гранул. Для определения процесса истирания по длине барабанного виброокатывателя-сушилки проводилась серия экспериментов с выходом установки на рабочий режим с последующей остановкой и анализом образцов по длине аппарата. Результаты этих исследований представлены на рисунке 9. Из графика видно, что с увеличением амплитуды колебаний происходит активный рост количества мелкодисперсной фракции. Видно, что по длине аппарата резкий рост количества мелких частиц с размерами менее 0,5 мм возрастает, начиная с участка, равного 500–600 мм по длине.

Резкое увеличение мелкодисперсной фракции связано с характером проведения процесса сушки. На участке 500–600 мм происходит окончательное удаление свободной не связанной влаги с поверхности частиц. Следовательно, структура гранулы становится более плотной, что приводит



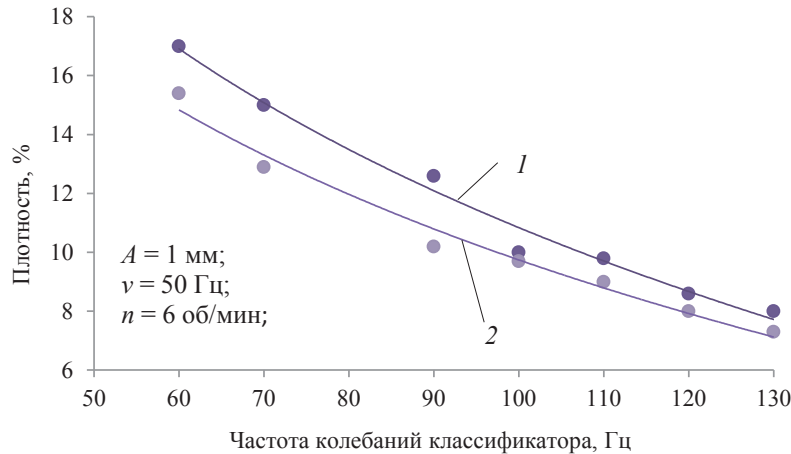


Рисунок 7. Зависимость пористости от частоты колебаний: (1)  $A_a = 2$  мм; (2)  $A_a = 3$  мм

Figure 7. Effect of frequency on porosity: (1)  $A_a = 2$  mm; (2)  $A_a = 3$  mm

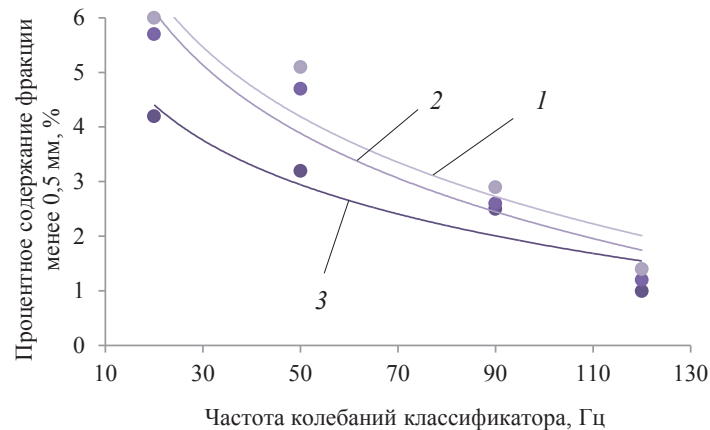


Рисунок 8. Зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции от частоты колебаний:

(1)  $A_a = 3$  мм; (2)  $A_a = 2$  мм; (3)  $A_a = 1$  мм

Figure 8. Effect of frequency on the percentage of finely dispersed fraction: (1)  $A_a = 3$  mm; (2)  $A_a = 2$  mm; (3)  $A_a = 1$  mm

к интенсификации истирания при соударении частиц дисперсного материала.

Образование мелкодисперсной фракции в высушиваемом продукте на участке от загрузки гранулята до 500 мм по длине установки имело схожую картину как для агрегата с установленным вибрационным классификатором, так и без него. Согласно данным (рис. 8) и благодаря дополнительному вибрационному воздействию для классификации гранул их прочность на истирание увеличивается. Во время второго периода сушки наблюдалось повышенное содержание мелкой фракции за счет истирания в установке без вибрационного классификатора. Рост числа мелких частиц (менее 0,5 мм) снижает выход готового продукта, увеличивает пылеунос и удельные энергозатраты на проведение процесса.

На рисунке 10 представлена зависимость прочности получаемых гранул в зависимости от частоты и амплитуды колебаний. Из графика видно, что с повышением как частоты, так и амплитуды колебаний происходит рост прочности получаемых гранул. Анализируя литературные данные аналогичных исследований, можно сделать вывод о том, что повышение прочности связано с более плотной укладкой частиц в агломерате.

Анализ данных, полученных при проведении экспериментальной части, свидетельствует о том, что процессы, протекающие в агрегатах данного типа, являются сложными. Увеличение частоты и амплитуды колебаний вибрационного классификатора позволяет менять не только дисперсный состав полученных гранул, но и их пористость и прочность как на истирание, так и на раздавливание. Данные показатели оказывают влияние на свойства готовой

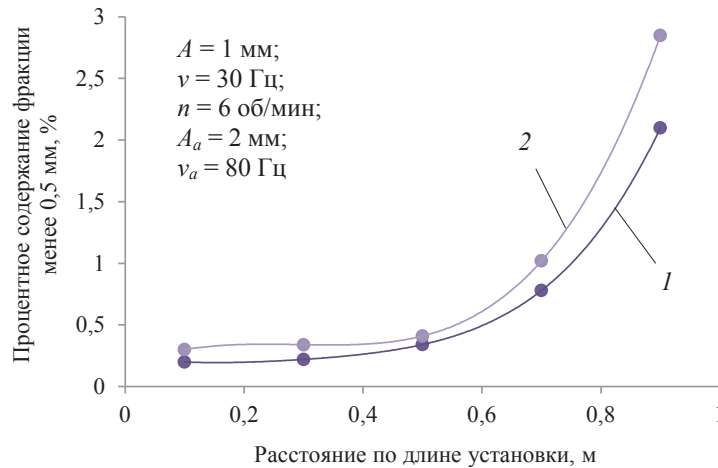


Рисунок 9. Зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции от участка по длине барабанного виброкатальгатора-сушилки: 1 – с классификатором; 2 – без классификатора

Figure 9. Effect of the length of the drum vibro-dryer on the percentage of finely dispersed fraction: 1 – with a classifier; 2 – without a classifier

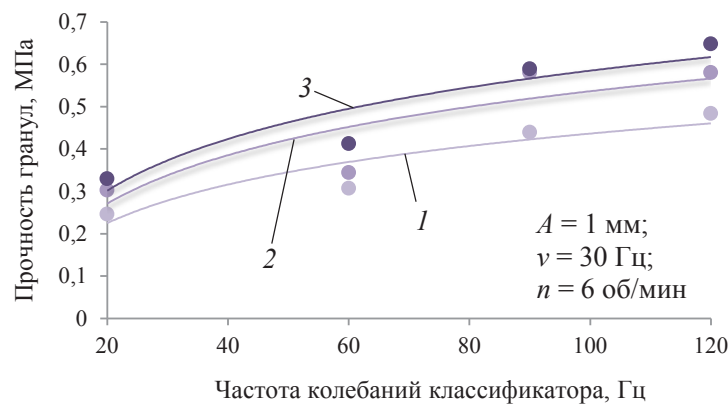


Рисунок 10. Зависимость прочности получаемых гранул от частоты колебаний вибрационного классификатора: (1)  $A = 3$  мм; (2)  $A = 2$  мм; (3)  $A = 3$  мм

Figure 10. Effect of frequency of the vibration classifier on the strength of the obtained granules: (1)  $A = 3$  mm; (2)  $A = 2$  mm; (3)  $A = 3$  mm

продукции. Поэтому для поиска рациональных параметров процесса структурообразования в новой конструкции использовался пакет анализа в системе Microsoft Excel по методике Ньютона. При обработке экспериментальных данных были получены следующие значения:  $A = 1$  мм;  $v = 40$  Гц;  $n = 7$  об/мин;  $\alpha = 3^\circ$ ;  $A_a = 2$  мм;  $v_a = 100$  Гц.

### Выводы

В результате исследования было установлено, что плотность распределения гранулометрического состава получаемого продукта становится более стабильной при использовании виброклассификатора. Данная модернизация позволяет усовершенствовать технологическую линию за счет получения продукта более высокого качества, а определенные

рациональные значения проведения процесса структурообразования в разработанной установке повышают эффективность ее использования. Установлено, что прочность на раздавливание и истирание связаны с динамической нагрузкой, которую накладывали в виде вибрационного поля. Это позволяет повысить структурно-механические свойства готового продукта.

### Критерии авторства

А. М. Попов – руководство работой в целом (20 %). К.Б Плотников – планирование эксперимента (15 %). П. П. Иванов – разработка методики проведения эксперимента (20 %)., И. Б. Плотников – обработка результатов эксперимента (20 %). Д. М. Попов – проведения

исследований (15 %). И. О. Плотникова –  
проведения исследований (15 %).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

#### Contribution

A.M. Popov supervised the research (20%).  
K. B. Plotnikov designed the experiment (15%).

P.P. Ivanov developed the methodology (20%).  
I.B. Plotnikov processed the results (20%). D.M. Popov  
conducted the research (15%). I.O. Plotnikova conducted  
the research (15%).

#### Conflict of interest

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

#### References/Список литературы

1. Latkov NYu, Koshelev YuA, Vekovtsev AA, Poznyakovskiy VM. Theoretical positions of modern sport nutrition and its practical implementation. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2017;5(4):82–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/food170411>
2. De Simone V, Caccavo D, Lamberti G, d'Amore M, Barba AA. Wet-granulation process: phenomenological analysis and process parameters optimization. *Powder Technology*. 2018;340:411–419. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.053>
3. Popov AM, Plotnikov KB, Ivanov PP, Donya DV, Pachkin SG, Plotnikova IO. Instant drinks with amaranth flour: Simulation of mechatronic systems of production. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(2):273–281. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-273-281>
4. Farberova EA, Tingaeva EA, Chuchalina AD, Kobeleva AR, Maximov AS. Obtaining granulated active carbon from wastes of vegetable raw materials. *ChemChemTech*. 2018;61(3):51–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.6060/tcct.20186103.5612>
5. Ermolaev YaYu. Research and development of production processes for barley flour instant granular drink. *Cand. sci. eng. abstract diss. Kemerovo: Kemerovo Technological Institute of Food Industry*; 2013. 20 p. (In Russ.).  
Ермолаев Я. Ю. Исследование и разработка процессов производства быстрорастворимого гранулированного напитка на основе ячменной муки: автореф. дис. канд. техн. наук. Кemerovo, 2013. 20 с.
6. Shentsova ES, Kurchaeva EE, Vostroilov AV, Esaulova LA. Determination of technological parameters of the granulation of mixed fodders for young rabbits and the evaluation of their effectiveness. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018;80(3):176–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-176-184>
7. Lisina NL. Environmental regulations in Russian food security. *Foods and Raw Materials*. 2019;7(1):193–201. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-193-201>
8. Sevostyanov MV, Ilyina TN, Boichuk IP, Perelygin DN, Koshchukov AV, Emelyanov DA. Pneumatic mechanical equipment for microgranulation of manmade materials. *Transactions of the Tambov State Technical University*. 2017;2(3):452–460. (In Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.452-460>
9. Lyubov VK, Popov AN, Popova EI, Yarkov DA. Survey of process for the production of granulated fuel wood. *Cherepovets State University Bulletin*. 2017;77(2):31–39. (In Russ.).  
Энергообследование процесса производства древесных гранул / В. К. Любов [и др.] // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. Т. 77. № 2. С. 31–39.
10. Fedorov IA, Nguyen CV, Prosekov AYU. Study of the elastic properties of the energetic molecular crystals using density functionals with van der Waals corrections. *ACS Omega*. 2021;6(1):642–648. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05152>
11. Dyshlyuk L, Babich O, Ivanova S, Vasilchenko N, Prosekov A, Sukhikh S. Suspensions of metal nanoparticles as a basis for protection of internal surfaces of building structures from biodegradation. *Case Studies in Construction Materials*. 2020;12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00319>
12. Krainov YuE, Mikhailova OV, Kirillov NK. Analysis of working chambers which provide thermal treatment and waste granulation of agricultural raw materials. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2018;42(2):6–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2018-2-6-12>
13. Osokin AV. Development of the mathematical model of granulated material movement in flat matrix granulator spinnerets. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(4):43–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-43-61>
14. Veronica N, Goh HP, Kang CYX, Liew CV, Heng PWS. Influence of spray nozzle aperture during high shear wet granulation on granule properties and its compression attributes. *International Journal of Pharmaceutics*. 2018;553(1–2):474–482. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.10.067>

15. Maytakov AL, Popov AM, Vetrova NT, Beryazeva LN, Zverikova MA. Modeling of manufacturing technologies for multicomponent granulated products. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018;80(4):63–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-63-68>
16. Попов АМ, Plotnikova IO, Plotnikov KB, Donya DV, Konyaev AV. Drum vibration granulator. Russia patent RU 2693772C2. 2019.  
Барабанный виброгранулятор: пат. 2693772C2 Рос. Федерация. № 2017145262 / Попов А. М. [и др.]; заявл. 21.12.2017; опубл. 04.07.2019, Бюл. № 19. 7 с.
17. Lebedev AB, Utkov VA, Khalifa AA. Sintered sorbent utilization for H<sub>2</sub>S removal from industrial flue gas in the process of smelter slag granulation. Journal of Mining Institute. 2019;237:292–297. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.292>
18. Latkov NYu, Vekovtsev AA, Nikityuk DB, Poznyakovskiy VM. Specialized product of antioxidant activity for sports nutrition. Human. Sport. Medicine. 2018;18(S):125–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/hsm18s18>
19. Guo L, Tao H, Cui B, Janaswamy S. The effects of sequential enzyme modifications on structural and physicochemical properties of sweet potato starch granules. Food Chemistry. 2019;277:504–514. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.014>
20. Yuan Q, Gong H, Xi H, Xu H, Jin Z, Ali N, *et al.* Strategies to improve aerobic granular sludge stability and nitrogen removal based on feeding mode and substrate. Journal of Environmental Sciences. 2019;84:144–154. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.04.006>
21. De Simone V, Dalmoro A, Lamberti G, Caccavo D, d'Amore M, Barba AA. HPMC granules by wet granulation process: Effect of vitamin load on physicochemical, mechanical and release properties. Carbohydrate Polymers. 2018;181:939–947. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.056>
22. Maytakov AL, Shlyapin AF, Tihonova NV, Poznyakovskiy VM. Substantiation of technological parameters of production and consumer properties of a new form of specialized beverage. Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2017;5(4):41–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/food170406>
23. Cherepanova MV, Kuzina EO, Poylov VZ, Munin DA. Research of pulverized halurgic potassium chloride agglomeration. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019;330(4):68–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/197>
24. Duy LX, Toan TQ, Anh DV, Hung NP, Huong TTT, Long PQ, *et al.* Optimization of canthaxanthin extraction from fermented biomass of *Paracoccus carotinifaciens* VTP20181 bacteria strain isolated in Vietnam. Foods and Raw Materials. 2021;9(1):117–125. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-117-125>
25. Shad Z, Mirhosseini H, Motshakeri M, Sanjabi MR, Meor Hussin AS.  $\alpha$ -amylase from white pitaya (*Hylocereus undatus* L.) peel: optimization of extraction using full factorial design. Foods and Raw Materials. 2021;9(1):79–86. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-79-86>