

УДК 666.9.017

DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0010

**ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНУЛИРОВАННОГО ЗАВТРАКА**

© 2022

**Устинова Юлия Владиславовна**, кандидат технических наук, доцент**Шевченко Татьяна Викторовна**, доктор технических наук, профессор**Попов Анатолий Михайлович**, доктор технических наук, профессор*Кемеровский государственный университет**(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6,**e-mails: yul48888048@yandex.ru, tatyana.shevchenko.1948@mail.ru, popov4116@yandex.ru)***Узунов Глеб Борисович**, научный сотрудник Московского института стали и сплавов*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»**(119049, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, e-mail: uzunovgleb@edu.misis.ru)*

**Аннотация.** Механическое воздействие на гранулы представляет собой динамический процесс, при котором гранулы непрерывно формируются и разрушаются образуя энергию передаваемой от одной гранулы к другой в момент их столкновения. Тем не менее, грануляция сопряжена с многочисленными проблемами из-за требований к качеству формируемых гранул с точки зрения однородности содержимого и физико-химических свойств, таких как размер гранул, насыпная плотность, пористость, твердость, влажность, прессуемость. Проведены эксперименты по определению прочностных характеристик гранул быстрорастворимых завтраков при определенной влажности. Выявлено, что механическая прочность повышается для сырых  $W = 10-12\%$  и сухих гранул  $W = 5-5,5\%$ . Изучено влияние изменения влажности в процессе сушки на механическую прочность гранул быстрорастворимого завтрака. За счет повышения содержания влаги в грануляте прочность гранул уменьшается. При определении скорости проникновения воды в гранулы завтрака изучалась пористость инстантированного гранулированного продукта. Исследование зависимости пористости гранулированного завтрака от гранулометрического состава показало, что с увеличением диаметра гранул наблюдается уменьшение их пористости. Подобран оптимальный диаметр гранул для производства быстрорастворимого завтрака, который должен находиться в интервале от 0,5 до 2,5 мм. В интервале 1,0-2,0 мм диаметра гранул большая часть находится в способе с активатором, который способствует в 3-5 раз снизить время гранулирования в тарельчатом грануляторе. С увеличением влажности гранулированного завтрака до 10% значения коэффициентов трения плавно возрастают. Зависимость пластической прочности от влагосодержания смеси для гранулированного завтрака определяются не только содержанием жидкой фазы (влаги), но и характером связи влаги с твердой фазой.

**Ключевые слова:** гранулы, пористость, структура, прочность, быстрорастворимый завтрак.

**STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GRANULATED BREAKFAST**

© 2022

**Ustinova Yulia Vladislavovna**, candidate of technical sciences, associate professor**Shevchenko Tat'yana Viktorovna**, doctor of technical sciences, professor**Popov Anatoly Mikhaylovich**, doctor of technical sciences, professor*Kemerovo state University**(650000, Russia, Kemerovo, street Krasnaya, 6,**e-mails: yul48888048@yandex.ru, tatyana.shevchenko.1948@mail.ru, popov4116@yandex.ru)***Uzunov Gleb Borisovich**, researcher at the Moscow Institute of Steel and Alloys*National Research Technological University "MISIS"**(119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, p. 1, e-mail: uzunovgleb@edu.misis.ru)*

**Abstract.** Mechanical action on pellets is a dynamic process in which pellets are continuously formed and destroyed forming energy transferred from one pellet to another at the moment of their collision. Nevertheless, granulation is fraught with numerous problems due to the requirements for the quality of the formed granules in terms of the uniformity of the contents and physico-chemical properties, such as granule size, bulk density, porosity, hardness, humidity, and persistence. Experiments were carried out to determine the strength characteristics of granules of instant breakfast at a certain humidity. It was found that the mechanical strength increases for raw  $W = 10-12\%$  and dry granules  $W = 5-5.5\%$ . The influence of humidity changes in the drying process on the mechanical strength of instant breakfast granules has been studied. By increasing the moisture content in the granulate, the strength of the granules decreases. When determining the rate of penetration of water into breakfast granules, the porosity of the instant granulated product was studied. The study of the dependence of the porosity of granulated breakfast on the granulometric composition showed that with an increase in the diameter of the granules, a decrease in their porosity is observed. The optimal diameter of granules for the production of instant breakfast has been selected, which should be in the range from 0.5 to 2.5 mm. In the range of 1.0–2.0 mm of the diameter of the granules, most of them are in the method with an activator, which helps to reduce the granulation time in the poppet granulator by 3-5 times. With an increase in the humidity of the granulated breakfast to 10%, the values of the friction coefficients gradually increase. The dependence of plastic strength on the

moisture content of the granulated breakfast mixture is determined not only by the content of the liquid phase (moisture), but also by the nature of the connection of moisture with the solid phase.

**Keywords:** granules, porosity, structure, strength, instant breakfast.

**Введение.** Грануляция – это процесс увеличения размера, при котором мелкие частицы объединяются в более крупные, физически прочные агломераты [1]. Улучшаются характеристики сжатия и растворения гранул, внешний вид продукта, что может иметь важное значение в пищевой промышленности при производстве быстрорастворимых завтраков [2-4].

Гранулы производятся для повышения однородности в конечном продукте, для увеличения плотности смеси, чтобы она занимала меньший объем на единицу веса для лучшего хранения и транспортировки. Следовательно, идеальные характеристики гранул включают сферическую форму для улучшения потока, узкое распределение частиц по размеру для однородности содержимого и объемного дозирования, достаточную мелкодисперсность для заполнения пустотных пространств между гранулами для лучшего уплотнения и характеристик сжатия, а также достаточную влажность и твердость для предотвращения разрушения [5-7].

Процесс грануляции может быть как сухим, так и влажным. Сухое гранулирование включает механическое уплотнение (прессование) с последующим процессом калибровки, в то время как для влажного гранулирования используется жидкое связующее. Существуют методы влажного гранулирования: с высоким сдвигом и гранулирование в псевдооживленном слое [8-9].

Влажное гранулирование – это единичная операция, при которой мелкие первичные дисперсные материалы (порошки, зерна и т.д.) агломерируются благодаря жидкому связующему для получения более крупных гранул [10]. Этот процесс можно разделить на несколько этапов. После смешивания частиц основного ингредиента в сухую смесь добавляют жидкое связующее, которое можно распылять непосредственно на сухие ингредиенты. Смоченные частицы связывают другие частицы, образуя ядра. Из-за контакта с другими ядрами, стенкой гранулятора или другими частями гранулятора (например, измельчителем или перегородками) ядро может деформироваться или уплотняться. Два ядра могут сливаться, когда материал деформируется. Уплотнение обеспечивает движение жидкости к поверхности, которая необходима для связывания других частиц [11-13]. При влажном гранулировании можно использовать множество методов и различные типы оборудования.

Рост гранул при влажном гранулировании с высокой скоростью сдвига представляет собой динамический процесс, при котором гранулы непрерывно формируются и разрушаются. Известно, что различными механизмами, участвующими во влажной грануляции, являются увлажнение и образование зародышей; консолидация и рост; а также разрушение и истирание [14].

Перемещение гранулируемого продукта по по-

верхности барабанного аппарата необходимо для проведения процесса окатывания. Пищевой продукт в виде порошка поступает во вращающийся аппарат и обрабатывается связующей жидкостью. Приобретая необходимую плотность, смоченные частички агломерируются и окатываются. Окатывание относят к разновидности структурной грануляции, образуя окатыши в виде измельченных комочков сферической формы [15-17].

Существует четыре механизма процесса грануляции, такие как смачивание, образование окатышей, слияние или рост, уплотнение или разрушение гранул. Начальное смачивание исходного порошка пищевой продукции связующей жидкостью зависит от скорости распыления. Смачивание способствует образованию окатышей мелкодисперсных порошков. На стадии слияния или роста частично увлажненные частицы сливаются, образуя гранулы. Процесс образования окатышей тесно связан со стадией смачивания. По мере роста гранул они уплотняются. Стадия уплотнения контролирует внутреннюю пористость и прочность гранул. Сформированные гранулы могут быть восприимчивы к истиранию, если они имеют слабую связь или во время сушки образуются дефекты [18-20].

**Цель исследований** – провести оценку механической прочности и определить пористость с использованием активатора гранул быстрорастворимого завтрака.

Объектами исследований являлись сухие и влажные гранулы быстрорастворимого сухого завтрака, в качестве гранулирующей жидкости использовалась дистиллированная вода. В процессе разработки рецептуры сухого быстрорастворимого завтрака в качестве основного сырья использовались: мука овсяная, яблоки сушеные, концентрат сывороточных белков, модифицированный крахмал картофельный, сахарная пудра, витаминный премикс (ВП 77-14).

**Материалы и результаты исследований.** В работе использовали бюретку объемом 2 мл с ценой деления 0,02 мл, колбу объемом 100 мл с плотно закрытой резиновой пробкой для изучения пористости гранулированного завтрака. Гранулы опускают и немедленно закрывают пробкой в бюретку, заполненную дистиллированной водой. Вода в бюретке поднимается до определенного уровня и остается неизменным при удалении воздуха. При заполнении пористой гранулы уровень воды в бюретке меняется. Для определения прочности гранул на устройстве была проведена оценка их прочности на сжатие. Метод определения заключается в следующем: гранулу помещают между держателем и чашкой, фракцию высыпают в чашку и измельчают гранулят. Затем фракцию взвешивают на весах и определяют нагрузку в кг [21].

Для определения механической прочности ис-

пользовали образцы быстрорастворимых завтраков с рабочей влажностью сырых гранул  $W=10-12\%$ , сухих  $W=5-5,5\%$ . На рисунке 1 представлена зависимость механической прочности от размера гранул при определенной влажности.

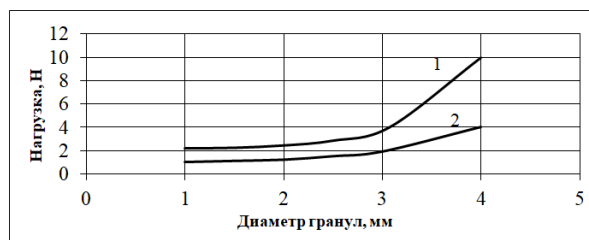


Рисунок 1 – Прочность гранул при механической нагрузке  
1 – для сухих гранул ( $W = 5\%$ );  
2 – для влажных гранул ( $W = 12\%$ )

Механическая прочность повышается, за счет уплотнения крупных агломератов при гранулировании. Гранулы, располагаясь более компактно в гранулируемом материале удаляют частицы привязанных к грануле. За счет ударов лопастей активатора смешиваемые материалы ударяются о стенки смесителя изменяя поверхностный слой смеси.

Нами проведены испытания прочности гранул высушенных гранул диаметром 2 мм на нагрузку (рис. 2).

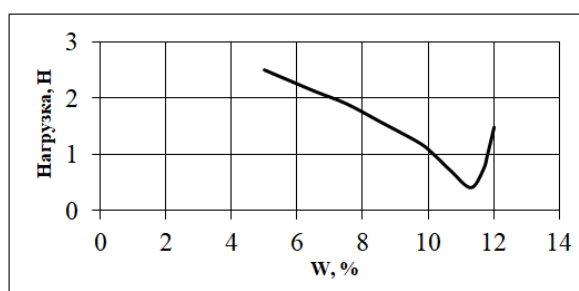


Рисунок 2 – Влияние изменения влажности в процессе сушки на механическую прочность гранул быстрорастворимого завтрака

Из графика рисунка 2 видно, что происходит значительное уменьшение прочности гранул. Структура гранул при поглощении паров воды меняется за счет повышения содержания влаги в грануляте. Входящий в состав гранулированного завтрака крахмал и сахарная пудра поглощает влагу. Белок, за счет перехода в аморфное состояние также изменяет влагу в грануляте.

Уменьшение пористости происходит за счет растворения сахарной пудры и увлажнения гранулированных завтраков. В работе изучали скорость проникновения воды в гранулы завтрака для исследования динамики изменения пористости.

На рисунке 3 представлены результаты значений коэффициентов пористости, где с увеличением диаметра гранул наблюдается уменьшение их пористости.

Выявлен оптимальный диаметр гранул, который должен находиться в интервале от 0,5 до 2,5 мм. Увеличение пористости, проявляемое более крупными гранулами, может быть объяснено наличием больших пустот, особенностью, характерной для более

крупных частиц, и ограниченной площадью поверхности, доступной для соединения между частицами. Вероятно, это является причиной того, что пористость полученных компактов была относительно высокой по сравнению с более мелкими гранулами.

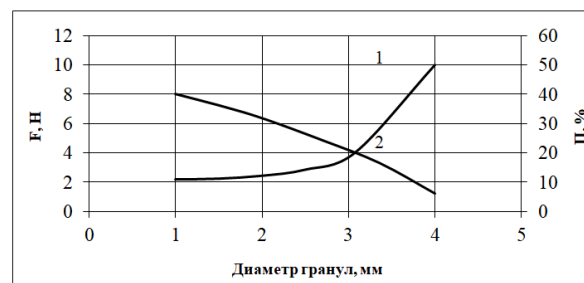


Рисунок 3 – Значение коэффициентов пористости от гранулометрического состава завтрака:  
1 – прочность гранул на раздавливание;  
2 – пористость

С помощью метода ситового анализа определяли гранулометрический состав, в котором число фракций соответствует числу сит. Рисунки 4 и 5 отображают фракционный гранулята завтрака.

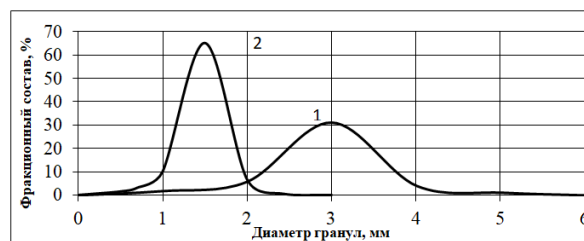


Рисунок 4 – Распределение гранул быстрорастворимого завтрака по размерам:  
1 – способ без активатора; 2 – способ с активатором

В интервале 1,0–2,0 мм диаметра гранул большая часть находится в способе с активатором. Кривые в виде низкой и высокой формы указывают на монодисперсность полученного гранулята.

Преобладание различных фракций изображено на кумулятивной кривой распределения гранул (рис. 5). По кривой устанавливают какой процент гранул имеет размеры от  $d_{min}$  до  $d_i$ .

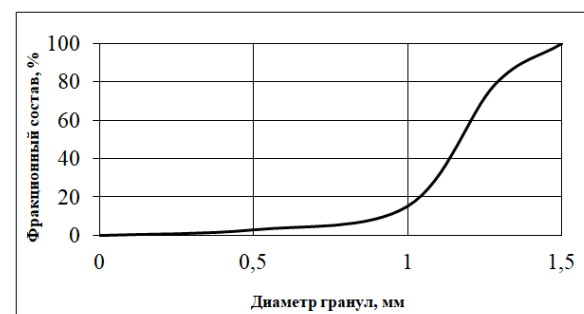


Рисунок 5 – Распределение гранул быстрорастворимого завтрака на фракции

В тарельчатом грануляторе, при наличии активатора и прочих равных условиях, снижается время гранулирования в 3–5 раз. Образование гранул класса менее

2,5 мм возрастает до 90-95%.

При среднем диаметре гранул 1,5 мм – 700-900 кг/м<sup>3</sup> определена насыпная плотность исследуемого продукта. Насыпная плотность увеличивается с 850 кг/м<sup>3</sup> до 950 кг/м<sup>3</sup> при изменении размера гранул (рис. 6).

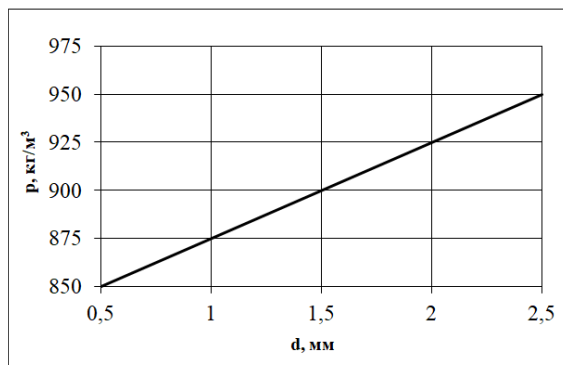


Рисунок 6 – Зависимость размера гранул от насыпной плотности продукта

Изменение коэффициента трения быстрорастворимого гранулированного завтрака в зависимости от влажности представлено на рисунке 7.

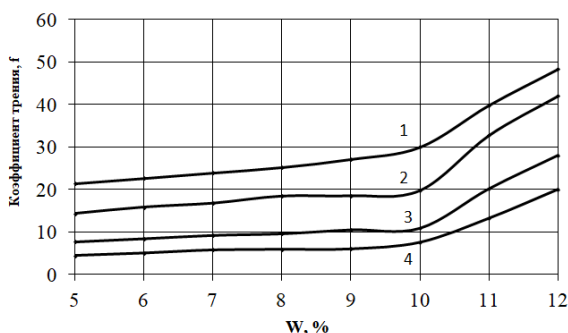


Рисунок 7 – Изменение коэффициентов внутреннего (1) и внешнего трения по транспортной резине (2), фторопласту (3) и стали (4) в зависимости от влажности гранул быстрорастворимого завтрака

С увеличением влажности гранулированного завтрака до 10% значения коэффициентов трения плавно возрастают. Увеличение коэффициентов трения происходит при повышении влажности.

Зависимость пластической прочности от влагосодержания смеси для гранулированного завтрака представлена на рисунке 8.

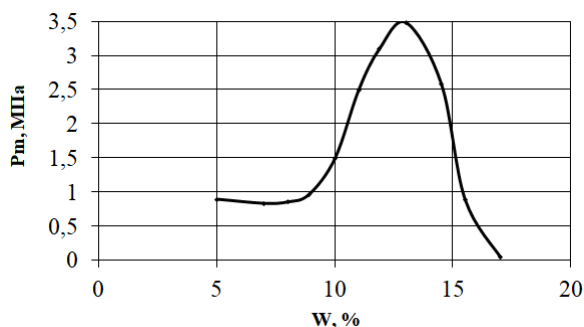


Рисунок 8 – Зависимость пластической прочности дисперсной смеси для гранулирования завтрака от влажности

Из приведенной закономерности видно, что данная зависимость является типичной кривой изменения пластической прочности в зависимости от влажности материала при увлажнении. Пластические свойства материала определяются не только содержанием в нем жидкой фазы (влаги), но и характером связи влаги с твердой фазой.

**Закключение.** От размера гранул при влажности: 1 – для сухих гранул ( $W = 5\%$ ); 2 – для влажных гранул ( $W = 12\%$ ) изучена зависимость механической прочности быстрорастворимого завтрака. Механическая прочность повышается с увеличением размера гранул завтрака. Наблюдается уменьшение пористости с увеличением диаметра гранул. Большая часть гранул находится в интервале 1,0–2,0 мм. Активатор способствует в 3-5 раз снижать время гранулирования в тарельчатом грануляторе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Витюгин, В.М. Исследование процесса гранулирования скатыванием с учетом свойств комкуемых дисперсий: дис. ... д-ра техн. наук: Витюгин В.М. – Томск. – 1975. – 312 с.
2. Евдокимова, О.В. Требования к этапам жизненного цикла функциональных продуктов питания / О.В. Евдокимова // Пищевая промышленность. – 2009. – № 1. – С. 14-15.
3. Кравченко, С.М. Формирование потребительского поведения на рынке продуктов функционального назначения / С.М. Кравченко, Г.С. Драпкина, М.А. Постолова // Пищевая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 42-43.
4. Попов А.М. Моделирование мехатронных систем производства инстантированных напитков с добавлением амарантовой муки / А.М. Попов А.М., П.П. Иванов, К.Б. Плотников, Д.В. Доня, С.Г. Пачкин, И.О. Плотникова // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – № 2. – С. 273-281.
5. Постолова М.А. Исследование пластической прочности гранулированного черничного киселя / М.А. Постолова, А.М. Попов, Г.С. Драпкина // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 4. – С. 94-95.
6. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур: кн / П.А. Ребиндер. – М.: Наука. – 1966. – 284 с.
7. Плотников К.Б. Совершенствование технологического потока линии производства инстантированного киселя / К.Б. Плотников, А.М. Попов, И.Б. Плотников, Р.В. Крюк, С.Д. Руднев // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – №1. – С. 96-105.
8. Шишков, Ю.И. Некоторые аспекты продуктов функционального питания / Ю.И. Шишков // Пищевая промышленность. – 2007. – №1. – С. 10-11.
9. Pathare, Pankaj & Byrne, Edmond. Application of Wet Granulation Processes for Granola Breakfast Cereal Production. Food Engineering Reviews. – 2011. – 189-201. 10.1007/s12393-011-9043-7.
10. H. S. Tan, A. D. Salman, M. J. Kinetics of melt granulation in fluidized bed I: The influence of process variables. Chem. Eng. Sci. – 2006. – 61. – PP. 1585-1601.
11. I. Sotami, T. Inoue, T. Katagiri, H. Takeuchi, M. Tsuda, H. Academe, S. Isobe; Reduction of the addition of water to the granulation of the fluidized bed by a steam-water two-phase binder. Jpn. J. Food Eng. – 2004 – 15, PP. 25-35.
12. Otsuka, T., Vaio, Y., Miyagishima, A., Italy, S. The use of principal component analysis makes it possible to efficiently find important physical variables for optimizing granular fluidized bed conditions. Int J Pharm – 2011 – 409:81–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2011.02.044>.
13. Srinivasa k annan, K., Balasubramanian, N. Analysis on modeling the drying of granular material in a fluidized bed. Adv Powder Technol – 2008; 19:73-82. <https://doi.org/10.1163/156855208X291774>.
14. Pitch, V. Agglomeration in industry: emergence and application. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA; – 2005. – Search.
15. Fries, L., S. Antonyuk, S. Heinrich, D. Dopfer, and S.



Panzer (2013) Collision dynamics in a fluidized bed granulator: a study of DEMCFD. Chem. Eng. Sciences'. 86: 108-123.

16. Baumann, A., M. J. Good son, M. Craft and P. R. Mart (2007) Modeling and validation of granulation with heterogeneous binder dispersion and chemical reaction. Chem. Eng. Sciences'. 62: 4717-4728.

17. Phung K. Le, Paul Avontuur, Michael J. Hounslow, Agba D. Salman. A microscopic study of granulation mechanisms and their effect on granule. Powder Technology. 2011; 206: 18-24.

18. Ansari M. A., Stepanek F. The Evolution of Microstructure in Three-Component Granulation and Its Effect on Dissolution. Particulate Science and Technology. 2008; 26: 55-66.

19. Gianfrancesco A., Turchiulie C., Dumoulin E., Palzer S. Prediction of Powder Stickiness along Spray Drying Process in Relation to Agglomeration. Particulate Science and Technology. 2009; 27, 415-427.

20. Infante J. A., Ivorra B., Ramos A. M., Rey J. M. On the modelling and simulation of high-pressure processes and inactivation of enzymes in food engineering. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2009; 19: 2203 – 2229.

21. Классен, П. В. Основы техники гранулирования / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. М.: Химия, – 1982. – 272 с.

*Статья поступила в редакцию 22.01.2022*

*Статья принята к публикации 10.03.2022*