



Научная статья  
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)  
УДК 664.762:664.785.3:544.77

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.010



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ОВСЯНЫХ ХЛОПЬЕВ

Чащилов Дмитрий Викторович<sup>1</sup>, Абророва Анастасия Алексеевна<sup>2</sup>,  
Симкин Сергей Александрович<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, Россия

<sup>2, 3</sup> Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), г. Бийск, Россия

<sup>1</sup> dmitry.chashchilov@mail.ru

<sup>2, 3</sup> mahipp@bti.secna.ru

**Аннотация.** При использовании предприятиями-посредниками овсяных хлопьев «Геркулес», изготовленных на крупозаводах, для расфасовки в потребительскую упаковку происходит частичное крошение продукта. При этом изменяются дисперсный состав хлопьев и их насыпная плотность. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью учёта насыпной плотности при выборе размера потребительской упаковки, а также при подборе бункерного, транспортирующего оборудования, питателей объёмного типа для комплектации производства. Предметом исследования выступили механические смеси цельных и частично разрушенных овсяных хлопьев, изготовленных в промышленных условиях. Цель экспериментального исследования – определение зависимости насыпной плотности овсяных хлопьев от их дисперсного состава. Для определения насыпной плотности использован метод денсиметрии путём свободной засыпки. Проанализированы образцы овсяных хлопьев «Геркулес» различных производителей, закупленные в торговой сети г. Бийска. Определены средние геометрические размеры цельных частиц: длина 9,2 мм, ширина 5,6 мм, толщина 0,89 мм. Высота свода изогнутых хлопьев составляет 1,14 мм. Предположено, что деформация свода хлопьев обусловлена условиями плющения зерна и сушки хлопьев. Вновь установлено, что гранулометрический состав овсяных хлопьев может быть представлен тремя основными фракциями: 1) крупные цельные или с частичными отколами расплющенные частицы; 2) среднего размера частицы – это сравнительно крупные обломки частиц – концевые части расплющенного зерна; 3) мелкая крошка и пыль. Содержание (масс.) этих фракций варьируется – для крупных частиц,  $X$ , от 53 до 94 %, средних частиц – от 3 до 42 %, мелких частиц – до 5 %. Вновь предложен механизм формирования частиц среднего размера – они образуются при отколе концевых частей расплющенного зерна при механической обработке. Проведено физическое моделирование – составлены композиции из крупных и средних частиц переменного состава от 0:100 до 100:0 при постоянном содержании мелких частиц на уровне 5 % и определена их насыпная плотность. Установлено, что насыпная плотность  $\rho$  испытанных механических смесей снижается с 448 до 387 кг/м<sup>3</sup> с ростом содержания крупных частиц  $X$  от 0 до 100 %. Предложено аппроксимировать полученную зависимость двумя прямыми. При содержании крупной фракции до 70 % и выше насыпная плотность определяется по выражениям  $\rho = -0,50X + 447,8$  и  $\rho = -0,85X + 471,8$  соответственно. Полученные зависимости могут быть использованы при расчёте оборудования для производства и переработки овсяных хлопьев: бункеров, транспортёров, питателей объёмного типа. Также возможно применить полученные данные для расчёта размеров потребительской и транспортной тары и упаковки овсяных хлопьев «Геркулес».

**Ключевые слова:** овсяные хлопья «Геркулес», гранулометрический состав, плющение

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ОВСЯНЫХ ХЛОПЬЕВ

зерна, механическая смесь, денсиметрия, экспериментальное исследование, моделирование, упаковка.

**Благодарности:** Исследование выполнено при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

**Для цитирования:** Чашилов Д. В., Абросова А. А., Симкин С. А. Исследование зависимости насыпной плотности от дисперсного состава овсяных хлопьев // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 76–85. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.010. EDN: <https://elibrary.ru/LZANEH>.

Original article

## INVESTIGATION THE DEPENDENCE OF BULK DENSITY ON THE DISPERSED COMPOSITION OAT FLAKES

Dmitry V. Chashchilov <sup>1</sup>, Anastasia A. Abrosova <sup>2</sup>, Sergey A. Simkin <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution of Science "Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies" of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPHET SB RAS), Biysk, Russia

<sup>2, 3</sup> Biysk Technological Institute (branch) of the Federal state budgetary educational institution of Higher Education "Polzunov Altai State Technical University" (BTI AltSTU), Biysk

<sup>1</sup> dmitry.chashchilov@mail.ru

<sup>2, 3</sup> mahipp@bti.secna.ru

**Abstract.** When oat flakes "Hercules" made at grain factories are used by intermediary enterprises for packaging in consumer packaging, partial crumbling of the product occurs. At the same time, the dispersed composition of the flakes and their bulk density change. The urgency of the problem is due to the need to take into account the bulk density when choosing the size of consumer packaging, as well as when selecting bunker, transporting equipment, feeders and volumetric dispensers for the complete set of production. The subject of the study was mechanical mixtures of whole and partially destroyed oat flakes manufactured in industrial conditions. The purpose of the experimental study is to determine the dependence of the bulk density of oat flakes on their composition. To determine the bulk density, the well-known method of densimetry by free filling was used. Samples of oat flakes "Hercules" from various manufacturers purchased in the Biysk retail chain are analyzed. The average geometric dimensions of solid particles are determined: length 9.2 mm, width 5.6 mm, thickness 0.89 mm. The height of the arch of the curved flakes is 1.14 mm. It is assumed that the deformation of the flake arch is caused by the conditions of grain flattening and flake drying. It is again established that the granulometric composition of oat flakes can be represented by three main fractions: 1) large whole or partially splintered flattened particles; 2) medium-sized particles are relatively large fragments of particles – the upper and lower parts of the flattened core; 3) fine crumbs and dust. Content (mass.) these fractions vary – for large particles  $X$  from 53 to 94%, medium particles - from 3 to 42%, small particles - up to 5%. The mechanism of formation of medium-sized particles is proposed again – they are formed when the upper and lower parts of the flattened grain are split off during mechanical processing. Physical modeling was carried out - compositions of large and medium particles of variable composition from 0:100 to 100:0 were compiled with a constant content of small particles at the level of 5% and their bulk density was determined. It was found that the bulk density  $\rho$  of the tested mechanical mixtures decreases from 448 to 387 kg/m<sup>3</sup> with an increase in the content of large particles from 0 to 100 %. It is proposed to approximate the obtained dependence by two straight lines. When the content of a large fraction is up to 70% and above, respectively, the bulk density is determined by the expressions  $\rho = -0.50 X + 447.8$  and  $\rho = -0.85X + 471.8$ , respectively. The obtained dependences can be used in the calculation of equipment for the production and processing of oat flakes - bunkers, conveyors, bulk feeders. It is also possible to apply the data obtained to calculate the size of consumer and transport containers and packaging of oat flakes "Hercules".

**Keywords:** oat flakes "Hercules", granulometric composition, grain flattening, mechanical mixture, densimetry, experimental study, modeling, packaging.

**Acknowledgements:** The study was carried out using the equipment of the Biysk Regional Center for Collective Use of SB RAS (IPHET SB RAS, Biysk).

**For citation:** Chashchilov, D.V., Abrosova, A.A. & Simkin, S.A. (2023). Investigation the dependence of bulk density on the dispersed composition oat flakes. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 76-85. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.010. EDN: <https://elibrary.ru/LZAHEF>.

## ВВЕДЕНИЕ

Овсяные хлопья являются одним из распространённых видов круп быстрого приготовления. Они богаты белками и углеводами. Также овсяные хлопья – один из видов полупродуктов для приготовления блюд диетического питания [1, 2]. Блюда из овсяных хлопьев имеют сравнительно невысокий гликемический индекс – при переваривании глюкоза медленно высвобождается из пищи и всасывается организмом. Это обстоятельство важно при питании людей, страдающих сахарным диабетом [3].

Овсяные хлопья изготавливают из зерна овса (*Avenasativa*). Россия является мировым лидером по его производству. Зерно овса также используют для производства овсяной муки и овсяного печенья [4]. Некоторое количество овсяного зерна используют как фураж.

Овсяные хлопья могут быть использованы самостоятельно, для варки овсяных каш. Также они могут входить в состав мультизлаковых смесей, мюсли, композиций для готовых завтраков. Во всём мире набирает популярность принцип здорового питания, одной из основ которого являются блюда из цельнозерновых продуктов, к которым относятся и овсяные хлопья [5].

При обработке овсяного зерна важную роль играют процесс первичной очистки и последующей тепловой обработки [6]. При гидротермической обработке – пропаривании – происходит изменение химического состава зерна, дополнительно образуются полифенолы [7]. Известно, что они являются инициатором повышения антиоксидантной активности пищевых продуктов в целом и овсяных хлопьев в частности [8]. Также при пропаривании происходит частичная деструкция белков [9]. В частности, при пропаривании изменяется содержания глютена [10].

Для получения овсяных хлопьев зёрна овса механически очищают от примесей, первично пропаривают, затем отделяют ядра от плодовой оболочки – обрушивают, вновь пропаривают, некоторое время отволаживают и затем расплющивают [11]. При этом получают хлопья, в России известные также под названием «Геркулес», «Экстра» и лепестковые. Хлопья подсушивают, взвешивают и упаковывают в транспортную и (или) потребительскую упаковку и направляют на реализацию или на хранение.

Плющение зерна ведётся, как правило, при повышенной температуре. Затем увлажнённое зерно дополнительно подвергается сжатию в плющильном станке. Соответственно, плющение также является одним из этапов гидротермической обработки.

Гидротермическая обработка зерна является одной из ключевых технологических операций [12]. Первичное пропаривание зерна выполняет технологическую функцию – оно служит для облегчения отделения оболочки и исключения разрушения ядра зерновки при обрушивании [13]. Вторичное пропаривание необходимо для пластификации ядра зерновки [14] перед расплющиванием – для того, чтобы предотвратить его хрупкое разрушение при плющении. Также пропаривание облегчает последующее приготовление готового блюда – пропаренные хлопья быстро развариваются, что сокращает время варки. Пропаренная крупа лучше хранится [15].

При плющении вследствие недостаточного или неравномерного вторичного пропаривания, недостаточного по длительности отволаживания (выдерживания перед плющением для перераспределения влаги по толще зерновки [16–17]), может происходить хрупкое разрушение ядра. При этом получают частично раскрошенные хлопья. С одной стороны, это ухудшает внешний вид продукта – для потребителя привычным показателем качества хлопьев может служить именно их цельность. С другой стороны, разрушенные хлопья ещё быстрее развариваются в воде. Также есть сведения, что мелкие разваренные хлопья лучше и полнее усваиваются организмом при переваривании пищи [3]. Пропаривание играет важную роль также и при обработке зёрен других крупяных и злаковых культур [18–20].

Овсяные хлопья могут быть упакованы в потребительскую упаковку в условиях завода-изготовителя. Также возможен вариант, что упаковывание выполняется вне завода-изготовителя. Предприятие-посредник в цепочке распределения товаров, предприятие оптовой или розничной торговли может закупать овсяные хлопья в транспортной упаковке и в своих условиях выполнять расфасовывание на потребительские порции и выполнять упаковывание в потребительскую упаковку [12].

При такой дополнительной переработке – растаривании, промежуточном транспортиро-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ОВСЯНЫХ ХЛОПЬЕВ

вании, многократной пересыпке и т.п. может происходить дополнительное крошение продукта с образованием большого количества мелких частиц. Некоторое количество хлопьев при этом сохраняют свою целостность. Таким образом, в образующейся механической смеси присутствуют частицы различной крупности.

Одной из особенностей механических смесей является то обстоятельство, что частицы различного дисперсного состава могут формировать сыпучие тела различной насыпной плотности. Таким образом, например, для упаковывания определённой навески овсяных хлопьев (по массе) различного дисперсного состава может требоваться различный объём потребительской упаковки [21].

Также при технологической обработке овсяные хлопья могут располагаться навалом, например, в питающем или приёмном бункере, на несущем элементе транспортера [22], в рабочей камере питателя или дозатора. При этом масса хлопьев в объёмной насыпи будет определяться их насыпной плотностью.

Таким образом, для ряда практических применений необходимо знать величину насыпной плотности овсяных хлопьев различного дисперсного состава. В то же время подобные сведения в справочной литературе отсутствуют. Проблема актуальна в связи с необходимостью учёта насыпной плотности при расчёте или выборе технологического или вспомогательного оборудования: бункеров транспортеров, питателей, а также при определении необходимых размеров потребительской упаковки для овсяных хлопьев.

Целью данного исследования является определение зависимости насыпной плотности механических смесей овсяных хлопьев от их дисперсного состава. Задачами исследования выступили:

- анализ дисперсного состава изготовленных в промышленных условиях овсяных хлопьев различных производителей;
- установление особенностей формирования основных фракций овсяных хлопьев по крупности;
- приготовление механических смесей овсяных хлопьев различного фракционного состава и экспериментальное определение их насыпной плотности, анализ полученных закономерностей.

### МЕТОДЫ

В качестве исходного материала использовали овсяные хлопья различных произво-

дителей. Товар был закуплен в магазинах розничной сети г. Бийска. Все образцы продукта изготовлены в промышленных условиях.

Для определения границ основных фракций проводили анализ крупности частиц. Для этого выполняли отбор проб. Содержимое пакетов каждого из производителей высыпали на стол и производили его ручное смешивание. Далее испытуемый материал разравнивали на столе равномерным слоем, условно размечали на поверхности насыпи линии разметки, деля её на квадраты размером примерно 5 x 5 см. Из каждого квадрата произвольно отбирали частицу и измеряли её геометрию. В частности, определяли длину, ширину и толщину частицы. Также для целых частиц определяли высоту изогнутого свода. Для измерений использовали штангенциркуль ШЦ-1-150, класс точности 2, погрешность  $\pm 0,1$  мм.

Схема определяемых размеров приведена на рисунке 1. Для каждого образца анализировалось не менее 20 частиц.

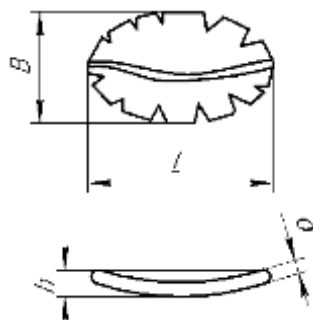


Рисунок 1 – Схема измерения геометрических размеров расплюснутых овсяных хлопьев  
L – длина, B – ширина,  $\delta$  – толщина,  
h – высота свода

Figure 1 – Diagram of measuring the geometric dimensions of flattened oat flakes  
L – length, B – width,  $\delta$  – thickness,  
h – height of the arch

Затем испытуемый материал подвергали фракционированию. Для этого его вручную просеивали на металлических ситах с крупностью отверстий 3,5 и 1 мм. Получали три фракции. Первая фракция +3,5 – это сход с сита 3,5 мм (условно – крупные частицы). Вторая фракция –1 + 3,5 – это проход через сито 3,5 и остаток на сите 1,0 (средние частицы). Третья фракция –1 – проход через сито 1 мм (мелкие частицы). Длительность просеивания составляла три минуты.

Выделенные фракции хранили до эксперимента в закрытых полиэтиленовых мешоч-

ках, не допуская уплотнения и крошения приготовленных материалов. Хлопья использовали в состоянии стандартной влажности. Температура в помещении составляла 20 °С, влажность воздуха была от 40 до 60 %.

Для определения насыпной плотности использовали цилиндрический стаканчик. Предварительно определили его внутренний объём. Для этого стаканчик предварительно взвешивали, затем аккуратно в него наливали дистиллированную воду, до краёв, визуально совмещая уровень жидкости с кромкой стаканчика. Стаканчик вновь взвешивали. По разности веса делали заключение о массе воды, вмещаемой стаканчиком, и, соответственно, о внутреннем объёме стаканчика.

Также дополнительно выполняли проверку объема стаканчика посредством использования пшённой крупы по ускоренному методу ВНИИКП – филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» [23]. В стаканчик через воронку насыпали пшённую крупу, горку поверх кромки стаканчика сдвигали. Далее содержимое стаканчика высыпали, также – через воронку – в мерный цилиндр и определяли объём навески крупы. Получили, что величины объёма стаканчика, определённые по обоим способам, отличаются друг от друга не более чем на 1 %.

Далее производили приготовление механических смесей из различных фракций овсяных хлопьев. Поскольку содержание мелкой фракции, как показали предварительные эксперименты, невелико, не превышая 5% (масс.) [24], то мелкие и средние частицы предварительно смешивали вместе, условно называя их далее «средняя фракция». Крупные частицы, соответственно, называли «крупная фракция». Для экспериментов использовали смеси крупной и средней фракций, взятых в соотношении от 0:100 до 100:0 (крупная фракция:средняя фракция, масс.). Фактически использовали соотношения 0:100, 15:85, 30:70, 50:50, 70:30, 85:15, 100:0. Содержание мелких частиц всегда составляло 5 % во всех случаях, кроме последнего.

Брали требуемое количество каждой из фракций, взвешивали их на технических весах с погрешностью 0,1 г и поочередно насыпали навески в чистую и сухую стеклянную банку внутренним объёмом 0,95 дм<sup>3</sup> с горловиной «твист-офф». После засыпки всех фракций банку закрывали металлической крышкой. Смешивание фракций выполняли, воспроизводя работу смесителя типа «пьяная бочка». Визуально через прозрачную стенку банки контролировали внешний вид приго-

товляемой смеси. Смешивание выполняли в течение одной минуты.

Затем проводили эксперименты по определению насыпной плотности приготовленной механической смеси. Для этого через широкую воронку производили свободную засыпку смеси в предварительно взвешенный стаканчик, без удара от падающих частиц и без разрыва потока, чтобы исключить уплотнение материала. Горку, образованную поверх кромки стаканчика, сдвигали металлической линейкой, поставленной на ребро, перемещая её по кромке стаканчика. Стаканчик с навеской взвешивали. Опыт повторяли не менее, чем три раза. За результат измерений брали среднеарифметическое выполненных измерений. Также вычисляли величину среднеквадратического отклонения. Насыпную плотность пересчитывали на стандартную влажность испытуемых материалов.

Влажность исходного сырья, выделенных фракций и их механических смесей определяли весовым способом путём высушивания при температуре 105 °С до постоянного веса. Испытывали два параллельных образца, за влажность принимали среднеарифметическое значение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Частицы овсяных хлопьев представляют собой плоские или слабоизогнутые пластинчатые частицы. В плане частицы имеют форму эллипса с множественными краевыми радиальными трещинами, как это показано на рисунке 1. Типичные размеры исследованных зёрен таковы: длина составляет 9,2±1,7 мм, ширина – 5,6±1,1 мм, толщина – 0,89±0,02 мм. Высота свода изогнутых хлопьев составила 1,14±0,42 мм.

Влажность исходного сырья перед фракционированием составляла 11,0±0,4 %, влажность полученных фракций 11,5±0,5 % соответственно. Влажность приготовленных механических смесей составляла 11,5±0,5 %. Таким образом, было решено, что влажность материала в ходе эксперимента существенно не изменялась.

Выяснили, что для разных производителей различно и содержание крупной, средней и мелкой фракций. Содержание крупной фракции X, для крупы различных производителей, варьируется от 53 до 94 %, средней фракции – от 3 до 42 %, мелкой фракции во всех случаях не более 5 %.

Результаты экспериментов по определению насыпной плотности приведены на рисунке 2 в форме точек.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ОВСЯНЫХ ХЛОПЬЕВ

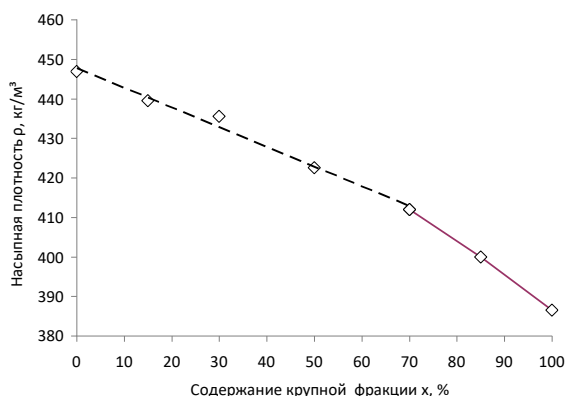


Рисунок 2 – График зависимости насыпной плотности механических смесей овсяных хлопьев от содержания крупной фракции

Figure 2 – Graph of the dependence of the bulk density of mechanical mixtures of oat flakes on the content of a large fraction

На рисунке 2 видно, что насыпная плотность  $\rho$ , в целом, нелинейно, снижается от 448 до 387 кг/м<sup>3</sup> при увеличении содержания крупной фракции от 0 до 100 %. То есть, насыпная плотность при этом уменьшается на 13,6 %.

Также на графике, вблизи области содержания крупной фракции 70 %, можно отметить некоторый «перелом», где происходит изменение угла наклона аппроксимирующей прямой. Поэтому условно можно выделить две области. Первая область охватывает содержание крупной фракции от 0 до 70 %, вторая – от 70 до 100 %. Для каждой из областей можно использовать аппроксимирующие прямые, соответственно,

$$\rho = -0,50X + 447,8; R^2 = 0,9877;$$

$$\rho = -0,85X + 471,8; R^2 = 0,9988.$$

На рисунке 2 линиями проведены эти аппроксимирующие зависимости.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Хлопья в плане имеют развитый контур периметра и изгиб в плоскости. Трещины, очевидно, возникают при плющении ядра зерна. Изогнутость хлопьев может возникнуть при плющении ядра зерна и (или) последующей сушке, в условиях неравномерного контакта с сушильным агентом.

Толщина в пределах измерений была практически постоянной. Это обуславливается технологией производства, как было сказано ранее, хлопья получают плющением ядра зерна в межвалковом зазоре плющильного станка, и поэтому хлопья оказываются практически одинаковой толщины.

По результатам определения геометрических размеров судили о фракционном составе крупы. Выяснили, что в составе овсяных хлопьев можно выделить три основных фракции. Условно – крупные частицы, средние частицы и мелкие частицы.

Во-первых, это цельные зёрна. В некоторых случаях у этих частиц есть небольшие отколы углов. Кроме того, в этой фракции присутствует некоторое количество разрушенных частиц, состоящих из центральной части расплющенного зерна.

Во-вторых, это крупные обломки частиц. Выяснили, что преимущественно частицы разрушаются на три части – концевые части зерна и центральная часть зерна. Очевидно, крошение происходит при пересыпании хлопьев во время технологической обработки. При плющении зерно испытывает сложное напряжённо-деформированное состояние. Это проявляется как в пластической деформации – зерно расплющивается, так и в хрупкой деформации – на кромке образуются радиальные трещины, как было отмечено выше. При механической нагрузке расплющенной зерновки во время последующей обработки может происходить отламывание одной или обеих концевых частей расплющенного зерна. При этом центральная часть расплющенного зерна имеет крупность свыше 3,5 мм, имея длину от 4,0 до 6,5 мм и попадает в крупную фракцию. Соответственно, типичный размер частиц отколовшихся концевых частей зерна порядка от 2,5 до 3,5 мм. Толщина при этом – как у крупных частиц. Схема разрушения показана на рисунке 3.

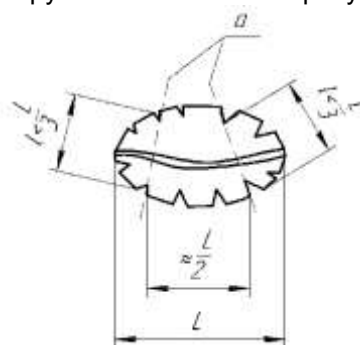


Рисунок 3 – Предполагаемая схема образования частиц средней фракции a – места разламывания расплющенной частицы, L – длина целой частицы, l – длина частицы средней фракции

Figure 3 – The proposed scheme of the formation of particles of the average fraction a - the places of breaking of the flattened particle, L - the length of the whole particle, l - the length of the particle of the average fraction

В-третьих, это мелкие частицы. Очевидно, они образуются при отколе отдельных фрагментов кромок от цельных частиц. Их типичный размер составляет, как правило, меньше одного миллиметра. Это мелкие крошки и пыль, в т.ч. мучка.

Таким образом, для анализа дисперсного состава овсяных хлопьев оказались целесообразны сита с крупностью ячеек 1,0 и 3,5 мм. Они позволяют сравнительно чётко выделить цельные хлопья, а также их обломки различной крупности.

Что касается возможного влияния влажности, то в соответствии с ГОСТ 21149-93 для овсяных хлопьев она должна быть не выше определённой величины, в зависимости от их вида, 12,0 или 12,5 %. В то же время сильное снижение влажности экономически не выгодно производителю, так как уменьшается выход продукции и увеличиваются затраты энергии на удаление влаги. Также при чрезмерной сухости хлопья становятся более хрупкими и сильнее крошатся. Поэтому, как правило, влажность овсяных хлопьев преимущественно находится в узком диапазоне величин вблизи стандартного значения. Также при фасовке овсяных хлопьев в потребительскую упаковку вне предприятия-изготовителя, как правило, используют продукт стандартной влажности. Отметим, что насыпная плотность с учётом влажности и температуры может быть также определена по известным выражениям [12].

Опубликованные прежде сведения об исследованиях зависимости насыпной плотности от дисперсного состава овсяных хлопьев авторам неизвестны. В литературе [25] приводятся сведения о величине насыпной плотности отдельных фракций – овсяной муки на уровне от 300 до 460 кг/м<sup>3</sup> и овса, измельчённого от 300 до 360 кг/м<sup>3</sup>. Полученные в настоящем исследовании результаты по насыпной плотности от 387 до 448 кг/м<sup>3</sup>, во-первых, не противоречат известным данным, во-вторых, уточняют диапазон варьирования значений насыпной плотности. Как следует из характера зависимости, выявленной в настоящем исследовании, насыпная плотность при увеличении содержания мелких частиц имеет более высокое значение.

Возможная причина нелинейного уменьшения насыпной плотности при росте содержания крупной фракции состоит в том, что крупные частицы пластинчатой формы при свободной засыпке располагаются более неупорядоченно, образуя насыпь более рыхлую, с меньшей насыпной плотностью, в отличие от частиц средней крупности. Соответственно, чем больше в смеси крупных частиц, тем менее плотной

является укладка, упаковка частиц и насыпная плотность являются более низкими.

Как видно из уравнений, а также из рисунка 2, при содержании частиц крупной фракции ниже 70 % зависимость насыпной плотности от этого содержания выражена слабее. Одной из возможных причин этого эффекта является то, что при преобладании в смеси частиц средней крупности они располагаются сравнительно равномерно вокруг отдельных крупных частиц, тем самым формируют более плотную упаковку, соответственно, с большей плотностью. Очевидно, что этот эффект проявляется вплоть до содержания частиц крупной фракции 70 %. При содержании более 70 % этот эффект выражен заметно слабее и, в конце концов, исчезает ввиду малого количества самих частиц средней крупности.

Выражения для определения насыпной плотности могут быть использованы при стандартной влажности хлопьев. При иных значениях влажности (большей или меньшей) потребуется пропорциональное изменение расчётного результата, соответственно количеству влаги [26].

Результаты настоящего исследования могут быть применены для определения насыпной плотности овсяных хлопьев при конструкторском расчёте или проектном выборе бункерного, питающе-дозировочного и транспортирующего технологического и вспомогательного оборудования. Также возможно использование полученных в данной работе зависимостей для расчёта размеров потребительской и транспортной мягкой или полужёсткой упаковки, например, пакетов, коробок и т.п.

Возможные направления последующих исследований – исследование условий и интенсивности образования частиц средней крупности в зависимости от уровня внешнего механического воздействия. Также представляет интерес аналитическое моделирование поведения и свойств механических смесей овсяных хлопьев различного дисперсного состава. Возможно также исследование влияния содержания разрушенных частиц на условия и качество приготовления блюд из овсяных хлопьев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что произведённые в промышленных условиях овсяные хлопья представляют собой в разных случаях механические смеси, состоящие из цельных и частично разрушенных расплюснутых частиц. Установлено, что разрушенные частицы представляют собой: 1) сравнительно крупные отколы концевых ча-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ОВСЯНЫХ ХЛОПЬЕВ

стей зерна поперечником порядком до трети длины исходного зерна; 2) среднюю часть расплющенного зерна, а также цельные расплющенные зёрна; 3) мелкие крошки и пыль размером меньше одного миллиметра.

Вновь предложен оригинальный механизм образования частиц средней крупности. Для целей анализа качества овсяных хлопьев предложено дополнительно выделять частицы средней крупности, используя сито с крупностью отверстий 3,5 мм. Выявлено, что содержание частиц средней крупности в образцах овсяных хлопьев, выработанных в промышленных условиях, может достигать почти половины всей массы хлопьев. При этом содержание мелких частиц в реальных смесях сравнительно невелико, не превышает 5 % и существенно на насыпную плотность не влияет.

Показано, что реальные композиции овсяных хлопьев могут быть смоделированы механическими смесями цельных расплющенных зёрен и их крупных обломков, фракциями +3,5 и –3,5 соответственно. Установлено, что механические смеси хлопьев различного дисперсного состава имеют различную насыпную плотность. При увеличении содержания крупных (цельных) частиц овсяных хлопьев насыпная плотность уменьшается. При содержании крупных частиц меньше 70 % насыпная плотность снижается слабее, при росте содержания крупных частиц, чем при их содержании свыше 70 %. Предложено объяснить этот эффект более плотной укладкой (упаковкой) механических смесей крупных (цельных) и их обломков, и менее плотной упаковкой композиций при подавляющем преобладании крупных частиц.

В целом, установлены зависимости насыпной плотности овсяных хлопьев от дисперсного состава при стандартной влажности. Предложены аппроксимирующие выражения для расчёта насыпной плотности при различном содержании частиц фракции +3,5.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sá A.G.A., Moreno Y.M.F., Carciofi B.A.M. Food processing for the improvement of plant proteins digestibility // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. V. 60. № (20). Pp. 3367–3386. DOI: 10.1080/10408398.2019.1688249.
2. Wu W., Qiu J., Wang A. & Li Z. Impact of whole cereals and processing on type 2 diabetes mellitus: a review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. V. 60. № 9. Pp. 1447–1474. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1574708>.
3. Oatmeal particle size alters glycemic index but not as a function of gastric emptying rate. Mackie A.R. [et al.] // *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*. 2017. V. 313. № 3. Pp. 239–246. DOI: 10.1152/ajpgi.00005.2017.
4. Изучение влияния продуктов переработки овса на изменение качественных характеристик мучных кондитерских изделий / Н. А. Щербакова [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51. № 4. С. 832–848. – DOI 10.21603/2074-9414-2021-4-832-848. EDN JWMEWC.
5. Adherence to the healthy Nordic food index, dietary composition, and lifestyle among Swedish women / Roswall N. [et al.] // *Food & Nutrition Research*. 2015. V. 59. R. 26336. DOI: 10.3402/fnr.v59.26336.
6. Oghbaei M., Prakash J., Yildiz F. (Reviewing Editor). Effect of primary processing of cereals and legumes on its nutritional quality: A comprehensive review // *Cogent Food & Agriculture*, 2016. V. 2. № 1. DOI: 10.1080/23311932.2015.1136015.
7. Ragaei S., Seetharaman K., Abdel-Aal E.-S.M. The Impact of Milling and Thermal Processing on Phenolic Compounds in Cereal Grains // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2014. V. 54. № 7. Pp. 837–849, DOI: 10.1080/10408398.2011.610906.
8. Kadiri O. A review on the status of the phenolic compounds and antioxidant capacity of the flour: Effects of cereal processing // *International Journal of Food Properties*, 2017. V. 20: sup 1. Pp. 798–809. DOI: 10.1080/10942912.2017.1315130.
9. Анисимова Л.В. Влияние гидротермической обработки зерна на белковый комплекс крупяных продуктов // *Ползуновский вестник*. 2012. № 2/2. С. 158–162.
10. Evaluation of sampling plans for measurement of gluten in oat groats / Sharma G.M. [et al.] // *Food Control*. 2020. V. 114. 107241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107241>.
11. Оборудование для производства муки и крупы / Сост. А.Б. Демский [и др.] : справочник / ред. : М. А. Борискин, В. Ф. Веденьев. С-Пб. : Профессия, 2000. 624 с.
12. Валентас К.Дж., Ротштейн Э., Сингх Р.П. Пищевая инженерия. Справочник с примерами расчётов. Пер. с англ. под общ. науч. ред. А. Л. Ишевского. СПб. : Профессия, 2004. 848 с.
13. Чащилов Д.В. Контроль расхода пара для управления процессом пропаривания гречневого зерна в производстве гречневой крупы // *Южно-сибирский научный вестник*. 2019. № 4/2. С. 192–198. DOI: <https://doi.org/10.25699/SSSB.2019.28.49830>.
14. Константинов М.М., Румянцев А.А., Борзов Н.А. Способ определения равномерности гидротермической обработки зерна крупяных культур // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2012. № 3. С. 79–82.
15. Приезжева Л.Г. Изменение биохимических и органолептических показателей крупы при хранении в условиях переменной температуры // *Хлебопродукты*. 2016. № 4. С. 47–49.
16. Румянцев, А.А. Математическая модель кинетики увлажнения зерна крупяных культур при гидротермической обработке // *Ползуновский вестник*. 2018. № 2. С. 56–59.
17. Угрозов В.В., Филиппов А.Н., Сидоренко Ю.И. О математическом описании изотермы



сорбции паров воды в зёрнах различных злаковых культур // Журнал физической химии. 2007. № 3. С. 458–461

18. Влияние параметров температурной обработки на физико-химический состав зерна гречихи / Марьин В.А. [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2015. № 4. С. 56–59.

19. Влияние гидротермической обработки зерна пшеницы на его физико-химический состав / Марьин В.А. [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2017. № 4. С. 163–166.

20. Mar'in V.A., Vereshchagin A.L. Physical principles of processing off-grade buckwheat // Foods and raw materials. 2016. V. 4. № 1. Pp. 51–60. doi: 10.21179/2308-4057-2016-1-51-60.

21. Чернов М.Е. Упаковка сыпучих продуктов. Москва : ДеЛи, 2000. 163 с. EDN RLOTWL.

22. Ромакин Н.Е. Конструкция и расчет конвейеров: Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии (ТНТ). 2011. 503 с. EDN QNXSVD.

23. Щербакова Н.А. Развитие технологической системы сахарного печенья : автореф. дисс... канд. техн. наук. М. 2011. 26 с.

24. Абросова А.А., Симкин С.А., Чащилов Д.В. Исследование дисперсного состава и насыпной плотности овсяных хлопьев «Геркулес» // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (с международным участием), посвященной 90-летию академика Саковича Г.В. Бийск : АлтГТУ. 2021. С. 432–435.

25. Правила организации и ведения технологического процесса производства продукции комбикормовой промышленности. Ч.1. М. : ВНПО «Зернопродукт», 1991. 116 с.

26. Марьин В.А., Верещагин А.Л., Бычин Н.В. Влияние влажности на технологические свойства зерна овса // Техника и технология пищевых производств. 2015. № 4(39). С. 50–56. EDN VBIUOP.

#### Информация об авторах

Д. В. Чащилов – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории «Материаловедение минерального сырья» Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН;

А. А. Абросова – студент инженерного специального факультета Бийского технологического института (филиала) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова;

С. А. Симкин – студент инженерного специального факультета Бийского технологического института (филиала) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

#### REFERENCES

1. Sá, A.G.A., Moreno, Y.M.F. & Carciofi, B.A.M. (2020). Food processing for the improvement of plant proteins digestibility, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(20): 3367-3386 DOI: 10.1080/10408398.2019.1688249.

2. Wu, W., Qiu, J., Wang, A. & Li, Z. (2020). Impact of whole cereals and processing on type 2 diabetes mellitus: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* Volume 60, (9) Pages 1447-1474. DOI : <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1574708>.

3. Mackie, A.R., Bajka, B.H., Rigby, N.M., Wilde, P.J., Alves-Pereira, F., Mosleth, E.F., Rieder, A., Kirkhus, B. & Salt, L.J. (2017). Oatmeal particle size alters glycemic index but not as a function of gastric emptying rate. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*. 313, (3). 239-246 DOI: 10.1152/ajpgi.00005.2017.

4. Shcherbakova, N.A., Misteneva, S.Yu. & Rudenko, O.S. (2021). The study of the influence of oat processing products on the change in the qualitative characteristics of flour confectionery products *Technique and technology of food production*. 51 (4). 832-848. DOI 10.21603/2074-9414-2021-4-832-848. EDN JWMEWC. (In Russ.).

5. Roswall, N., Eriksson, U., Sandin, S., Lof, M., Olsen, A., Skeie, G., Adami, H. & Weiderpass, E. (2015). Adherence to the healthy Nordic food index, dietary composition, and lifestyle among Swedish women *Food & nutrition research*, 59, 26336. doi: 10.3402/fnr.v59.26336.

6. Oghbaei, M. & Prakash J., Yildiz, F. (Reviewing Editor) (2016). Effect of primary processing of cereals and legumes on its nutritional quality: A comprehensive review, *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), DOI: 10.1080/23311932.2015.1136015.

7. Ragaei, S., Seetharaman, K. & Abdel-Aal, E.-S.M. (2014). The Impact of Milling and Thermal Processing on Phenolic Compounds in Cereal Grains, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54:7, 837-849, DOI: 10.1080/10408398.2011.610906.

8. Kadiri, O. (2017). A review on the status of the phenolic compounds and antioxidant capacity of the flour: Effects of cereal processing, *International Journal of Food Properties*, 20: sup 1, 798-809, DOI: 10.1080/10942912.2017.131513.

9. Anisimova, L.V. (2012). The effect of hydrothermal grain processing on the protein complex of cereals products. *Polzunovskiy vestnik*. 2(2). 158-162. (In Russ.).

10. Sharma, G.M., Pereira, M., Wang, Sh.S., Chirtel, S.J., Whitaker, T., Wehling, P., Arlinghaus, M., Canida, T., Jackson, L.S. & Williams, K.M. (2020). Evaluation of sampling plans for measurement of gluten in oat groats. *Food Control*. V. 114, 107241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107241>.

11. Demsky, A.B., Boriskin, M.A., Vedenyev, V.F. & Tamarov, E.V. (2000). Equipment for the production of flour and cereals: handbook. ed. : M.A. Boriskin, V.F. Vedenyev. S-Pb. : Profession. (In Russ.).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ОТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ОВСЯНЫХ ХЛОПЬЕВ

12. Valentas, K.J., Rothstein, E. & Singh, R.P. (2004). Food engineering. Reference book with examples of calculations. St. Petersburg : Profession.
13. Chashchilov, D.V. (2019). Control of steam consumption for controlling the process of steaming buckwheat grain in the production of buckwheat groats *South Siberian Scientific Bulletin*. 4/2. 192-198. DOI: <https://doi.org/10.25699/SSSB.2019.28.49830>. (In Russ.).
14. Konstantinov, M.M., Rumyantsev, A.A. & Borzov, N.A. (2012). A method for determining the uniformity of hydrothermal processing of grain of cereals. *Izvestiya Orenburg State Agrarian University*. 3. 79-82. (In Russ.).
15. Priezzheva, L.G. (2016). Change of biochemical and organoleptic parameters of cereals during storage under variable temperature conditions. *Hleboпродукты*. 4. 47-49. (In Russ.).
16. Rumyantsev, A.A. (2018). Mathematical model of the kinetics of grain wetting of cereals during hydrothermal treatment. *Polzunovskiy vestnik*. 2. 56-59. (In Russ.).
17. Ugrozov, V.V., Filippov, A.N. & Sidorenko, Yu.I. (2007). On the mathematical description of the isotherm of water vapor sorption in grains of various cereal crops. *Journal of Physical Chemistry*. 3. 458-461.
18. Maryin, V.A., Blaznov, A.N., Ermakov, R.B. & Pavlov, I.N. (2015). Influence of temperature treatment parameters on the physico-chemical composition of buckwheat grain. *South Siberian Scientific Bulletin*. 4. 56-59. (In Russ.).
19. Maryin, V.A., Blaznov, A.N., Ermakov, R.B. & Pavlov, I.N. (2017). The influence of hydrothermal treatment of wheat grain on its physico-chemical composition. *South Siberian Scientific Bulletin*. 4. 163-166. (In Russ.).
20. Mar'in, V.A. & Vereshchagin, A.L. (2016). Physical principles of processing off-grade buckwheat. *Foods and raw materials*. 4(1), 51-60. doi: 10.21179/2308-4057-2016-1-51-60.
21. Chernov, M.E. (2000). Packaging of bulk products. Moscow : Delhi. EDN RLOTWL. (In Russ.).
22. Romakin, N.E. (2012). Design and calculation of conveyors: handbook. Stary Oskol : Thin Science-intensive Technologies (TNT). EDN QNXSVD. (In Russ.).
23. Shcherbakova, N.A. (2011). Development of the technological system of sugar cookies: Extended abstract of candidate's thesis. M. (In Russ.).
24. Abrosova, A.A., Simkin, S.A. & Chashchilov, D.V. (2021). Investigation of the dispersed composition and bulk density of oat flakes "Hercules" *Technologies and equipment of chemical, biotechnological and food industry. Materials of the XIV All-Russian scientific and Practical conference of students, postgraduates and young scientists with international participation, dedicated to the 90th anniversary of Academician G.V. Sakovich*. Biysk : AltSTU. 432-435. (In Russ.).
25. Rules of organization and management of the technological process of the production of feed industry. Part 1. (1991). M. : VNPO "Zernoprodukt", 1991. (In Russ.).
26. Maryin, V.A., Vereshchagin, A.L. & Bychin, N.V. (2015). The influence of humidity on the technological properties of oat grain *Technique and technology of food production facilities*. 4(39). 50-56. EDN: VBIUOP. (In Russ.).

### Information about the authors

*D. V. Chashchilov - Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of the Laboratory of Materials Science of Mineral Raw Materials of the Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies SB RAS;*

*A. A. Abrosova - student of the Engineering special faculty of the Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University;*

*S. A. Simkin - student of the engineering special faculty of the Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 22.09.2022; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.*

*The article was received by the editorial board on 22 Sep 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.*