

Вадим Игоревич Полонский

Красноярский государственный аграрный университет, профессор кафедры ландшафтной архитектуры, ботаники, агроэкологии; Сибирский федеральный университет, Институт фундаментальной биологии и биотехнологии, профессор кафедры биофизики, доктор биологических наук, профессор, Россия, Красноярск

E-mail: vadim.polonskiy@mail.ru

Алена Владимировна Сумина

Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, доцент кафедры химии и геоэкологии, кандидат сельскохозяйственных наук, Абакан, Республика Хакасия, Россия

E-mail: alenasumina@list.ru

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ НА ПИЩЕВУЮ И ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ ЦЕННОСТЬ ПРОДУКТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ НА ЕГО ОСНОВЕ (ОБЗОР)

Цель работы – краткий анализ англоязычной научной литературы по влиянию размера частиц зернового сырья на пищевую и функциональную ценность получаемых на его основе продуктов. Установлено, что размер зерновых частиц является одним из основных параметров, который следует учитывать при рассмотрении пищевой и функциональной ценности получаемых из них продуктов. Он оказывает непосредственное влияние на распределение в зерновом сырье фенольных кислот, белков, углеводов, сырой клетчатки, золы, сырого жира. Найдено, что по мере уменьшения размера частиц зерна в нем достоверно увеличивалось содержание углеводов и жира, а также активность амилазы. Показана положительная корреляционная связь между размером зерновых частиц и содержанием в них фенольных кислот и белка. Известно, что сухое фракционирование зерна ячменя и овса дает обогащенный ценными веществами продукт, содержащий пищевые волокна, β -глюканы и токолы. Размер зерновых частиц способен влиять на эффективность процесса ферментации пищевых волокон, а также на доступность связанных полифенолов, действующих как антиоксиданты. Найдено, что с уменьшением размера частиц отрубей наблюдалось перераспределение компонентов пищевых волокон из нерастворимых в растворимые фракции, значительное увеличение экстрагируемых из них фенольных кислот, флавоноидов, антоцианов и каротиноидов, а также повышение антиоксидантной активности. При этом уменьшение размера частиц пищевых волокон может негативно влиять на биологическую доступность тиамина, рибофлавина и пиридоксина. Продемонстрировано, что использование фракционирования пшеничных отрубей и включение только некоторых частей отрубей в пищевые продукты может способствовать существенному повышению функционального потенциала последних.

Ключевые слова: зерно, отруби, измельчение, размер частиц, белок, антиоксиданты, пищевые волокна, функциональные пищевые продукты.

Vadim I. Polonskiy

Krasnoyarsk State Agrarian University, Professor at the Department of Landscape Architecture, Botany, Agroecology; Siberian Federal University, Institute of Fundamental Biology and Biotechnology, Professor at the Department of Biophysics, Doctor of Biological Sciences, Professor, Russia, Krasnoyarsk

E-mail: vadim.polonskiy@mail.ru

Alena V. Sumina

Khakass State University named after N.F. Katanov, Associate Professor at the Department of Chemistry and Geoecology, Candidate of Agricultural Sciences, Abakan, Republic of Khakassia, Russia

E-mail: alenasumina@list.ru

INFLUENCE OF GRAIN RAW MATERIAL PARTICLE SIZE ON THE FUNCTIONAL VALUE OF FOOD PRODUCTS OBTAINED ON ITS BASIS (REVIEW)

The aim of the work is a brief analysis of the English-language scientific literature on the effect of grain size on the nutritional and functional value of products obtained on its basis. It is established that the size of grain particles is one of the main parameters that should be taken into account when considering the nutritional and functional value of the products obtained from them. It has a direct effect on the distribution of phenolic acids, proteins, carbohydrates, crude fiber, ash, and crude fat in grain raw materials. It is found that as the grain size decreased, the content of carbohydrates and fat, as well as the activity of amylase, increased significantly. A positive correlation between the size of grain particles and the content of phenolic acids and protein in them is shown. It is known that dry fractionation of barley and oat grains gives a product enriched with valuable substances, containing dietary fiber, β -glucans and tokols. The grain size can affect the efficiency of the fiber fermentation process as well as the availability of bound polyphenols that act as antioxidants. It is found that with a decrease in the size of bran particles, there is a redistribution of dietary fiber components from insoluble to soluble fractions, a significant increase in phenolic acids, flavonoids, anthocyanins and carotenoids extracted from them, as well as an increase in antioxidant activity. At the same time, a decrease in the particle size of dietary fiber can negatively affect the bioavailability of thiamine, riboflavin and pyridoxine. The research demonstrates that the use of fractionation of wheat bran and the inclusion of only some parts of the bran in food products can significantly increase the functional potential of the latter.

Keywords: grain, bran, grinding, particle size, protein, antioxidants, dietary fiber, functional food products.

Введение. Как известно, продукты, изготовленные на основе зерновых культур, имеют высокую питательную ценность и характеризуются наличием разнообразных биологически активных веществ, в том числе витаминов, антиоксидантов, бета-глюканов, бетаинов и минеральных элементов [1–3]. Доказано, что пищевая и функциональная ценность таких продуктов находится в тесной зависимости, по крайней мере, от трех факторов: 1) генотипа (вид, сорт); 2) условий выращивания растений; 3) технологии получения продуктов. Первые два фактора могут поддаваться прямому или косвенному контролю на этапах выращивания растений. Третий фактор целиком находится в руках специалиста-технолога.

В последние годы наряду с выведением новых сортов и оптимизацией приемов выращивания сельскохозяйственных культур интенсивно ведутся научные исследования влияния обработки зернового сырья на физико-химические характеристики пищевых продуктов, получаемых на его основе. Анализируя публикации, представленные в мировой литературе, можно отметить, что с помощью различных технологических приемов воздействия на зерно, например формирования в образце определенного

распределения зерновых частиц по размеру, можно как увеличить, так и уменьшить содержание тех или иных биологически активных веществ в конечном пищевом продукте, а также их биодоступность [4].

Необходимо подчеркнуть недостаточное количество проведенных в мире исследований, посвященных обоснованию оптимального режима обработки зернового сырья, в частности получения нужного размера частиц в различных пищевых продуктах, производимых на основе зерна по критерию «максимальное содержание определенного ценного вещества».

Цель работы. Краткий анализ англоязычной научной литературы по влиянию размера частиц зернового сырья на пищевую и функциональную ценность получаемых на его основе продуктов. Настоящий обзор предназначен главным образом для отечественных ученых и специалистов: диетологов, технологов пищевых производств и биотехнологов.

Результаты исследования и их обсуждение. Влияние размера частиц зернового сырья на содержание в нем биологически активных веществ. Сегодня при исследовании различных технологических приемов обработки зерна, например его помола, результат оцени-

вают, как правило, по выходу муки, показателю зольности и потреблению энергии [5]. При этом содержанию в получаемых продуктах биологически активных соединений внимания уделяется недостаточно. Понимание влияния обработки зернового сырья на изменение присутствия в нем таких веществ позволяет оптимизировать технологические процессы по критерию «повышение/сохранение пищевой и функциональной ценности конечных продуктов».

Исследовали влияние ультрадисперсного измельчения на микроструктуру и физико-химические свойства пшеничной муки. Для получения трех фракций пшеничной муки с различным размером частиц: 62, 23, 11 мкм (127 мкм в контроле) применялись различные режимы измельчения зерна. В результате было установлено, что с повышением интенсивности этого процесса скорость гидролиза крахмала демонстрировала более высокие значения [6]. Показано, что распад (гидролиз) крахмала у твердой пшеницы зависел от размера зерновых частиц. После измельчения зерна наблюдавшиеся структурные изменения крахмала и его распад были значительно большими у частиц с размером менее 53 мкм по сравнению с грубыми фракциями зерна [7]. В другом исследовании измельчали кукурузную крупу в течение различного времени (от 3,5 до 14 мин) и оценивали ее характеристики с помощью различных физических и химических методов. Установлено, что по мере уменьшения размера частиц достоверно увеличивалось содержание гидролизованного крахмала. При этом на содержание белка измельчение влияния не оказывало [8].

Найдено, что размер зерновых частиц по-разному влияет на содержание в них различных биологически активных соединений. В опытах определяли влияние размера частиц цельнозерновой пшеничной муки на содержание в ней фенольных кислот, белка, общего жира, сырой клетчатки, общих углеводов и золы. Для выполнения исследования были использованы пять различных фракций частиц зерна трех коммерческих сортов пшеницы размером от 80 до 1180 мкм. Максимальные количества фенольных кислот, золы и белка были найдены во фракциях цельнозерновой муки с размерами частиц от 430 до 1180 мкм. Содержание общего жира и сырой клетчатки было самым высоким в

зерновой фракции – 300–430 мкм. Анализ показал положительную корреляционную связь между размером частиц и содержанием в них фенольных кислот и отрицательную корреляцию с содержанием углеводов [9].

В другой работе пшеничную муку обогащали цельной ячменной мукой, имеющей различные средние размеры частиц: 237 мкм (обычная), 131 мкм (промежуточная) и 68 мкм (микрогранулы). Исследовали микроструктурные изображения муки, теста и лепешек, анализировали влажность, содержание золы, белка, крахмала и β -глюкана. В результате было установлено, что по мере уменьшения размера частиц ячменной муки концентрация белка, влажность и стабильность теста снижались, содержание золы, крахмала, водопоглощение увеличивались, а содержание β -глюкана оставалось постоянным [10]. Показано, что в национальном хакасском зерновом продукте талгане, изготовленном из овса, увеличение относительной доли фракций размером менее 1 мм способствовало повышению величины суммарного содержания антиоксидантов в продукте. По предположению авторов, причиной найденного эффекта является более эффективная экстракция антиоксидантов из зерновых частиц меньшего размера, а также более высокая относительная доля в продукте таких частиц, характеризующихся повышенным содержанием антиоксидантов [11].

Влияние размера частиц отрубей на содержание и доступность в них биологически активных веществ. Пищевые волокна относятся к важным биологически активным соединениям, которые необходимо включать в диету. Среди различных продуктов питания хлеб является практически идеальным объектом для введения пищевых волокон в диету человека. Зерновые отруби (главным образом пшеничные, ячменные, овсяные, ржаные) представляют собой побочные продукты при производстве муки и обладают большим функциональным потенциалом благодаря высокому содержанию в них пищевых волокон, антиоксидантов, микроэлементов и других биологически активных соединений [12, 13]. Поэтому отруби могут быть использованы в качестве пищевого ингредиента для повышения функциональной ценности зерновых продуктов или как исходный

материал в технологических процессах дальнейшей переработки сырья.

О влиянии размера частиц отрубей на пищевую и функциональную ценность продуктов в литературе имеются противоположные мнения. Так, показан положительный эффект грубой обработки отрубей на их антиоксидантные свойства. В проведенных экспериментах пшеничные немолотые отруби (грубая обработка) сравнивались с отрубями, измельченными в режимах среднего и тонкого помола. В образцах измеряли антиоксидантные свойства, содержание каротиноидов и фенольных соединений. В результате было обнаружено, что образцы грубо обработанных отрубей почти по всем параметрам проявляли значительно более высокие антиоксидантные свойства по сравнению с тонко обработанными, за исключением значения поглощающей способности кислородных радикалов, которое у образцов, подвергнутых грубой обработке, было на 80 % ниже [14]. В другой работе изучали влияние размера частиц препаратов пищевых волокон на биологическую доступность в хлебе витаминов группы В. Авторы использовали три различных фракции препаратов с размерами частиц 100, 190 и 280 мкм, в которых содержание пищевых волокон было 2,1; 7,2 и 12,3 % соответственно. Результаты показали, что уменьшение размера частиц пищевых волокон может негативно влиять на биологическую доступность тиамина, рибофлавина и пиридоксина. Установленная в работе оптимальная величина размера частиц пищевых волокон (124 мкм) может быть использована для обогащения пшеничного хлеба без существенного влияния на уровень и биологическую доступность витаминов группы В [15]. Исследовали влияние размера частиц овсяных отрубей и их содержания в хлебе на молекулярную массу, растворимость и вязкость экстракта β -глюкана. Было обнаружено, что получение более мелких частиц сопровождается снижением молекулярной массы β -глюкана и увеличением его экстрагируемости, что приводило к общему увеличению вязкости экстракта по сравнению с крупными частицами. Найдено, что хлеб с включением 30 % тонкоизмельченных, но не грубых овсяных отрубей индуцирует уровень вязкости экстракта, проявляющий потенциальный эффект снижения уровня холестерина [16].

В других работах зарегистрированный эффект размера частиц отрубей был противоположным. Так, с помощью высокоэнергетического измельчения получали 10 фракций отрубей с различной физической структурой. В результате было показано, что при уменьшении среднего размера частиц со 172 до 30 мкм и соответственно увеличении их удельной поверхности с 0,09 до 0,26–0,30 м²/г антиоксидантная способность отрубей возросла в полтора раза. Установлено, что антиоксидантная способность фракций отрубей линейно коррелировала с удельной поверхностью и долей частиц размером менее 50 мкм, связанных с долей разрушенных алейроновых клеток. Этот положительный эффект сохранялся и в условиях модельного желудка *in vitro*, доказывая, что измельчение можно использовать для получения фракций пшеничных отрубей с более высокой функциональной ценностью [17]. В литературе этот результат удалось подтвердить, установив, что антиоксидантная активность пшеничных отрубей обратно пропорциональна размеру их частиц. Авторы изучали влияние ультрадисперсного измельчения пшеничных отрубей на повышение биологической доступности п-кумаровой, синаповой и феруловой кислот. В экспериментах использовались фракции отрубей для выпечки белого, цельнозернового хлеба и семи различных видов хлеба, богатых отрубями. Исследование проводили с помощью модели желудочно-кишечного тракта *in vitro*. Найдено, что количество биологически доступных фенольных кислот было выше в цельнозерновом хлебе и хлебе, богатом отрубями, по сравнению с белым хлебом. При этом чем мельче были частицы отрубей в хлебе, тем более биологически доступны были фенольные кислоты [18]. Согласно данным других авторов, с уменьшением размера частиц отрубей наблюдалось значительное увеличение экстрагируемых из них фенольных кислот, флавоноидов, антоцианов и каротиноидов [14].

Овсяные отруби измельчали на мельнице с тремя различными скоростями – 9000, 14000 и 42000 об/мин. Анализ показал, что наибольшее содержание β -глюканов было зарегистрировано во фракциях отрубей с размером частиц более 90 мкм, полученных в условиях наибольшего измельчения, при 42000 об/мин [19]. Найдено, что

фракция, представленная мелкозернистой крупкой, имела самое высокое содержание общего количества пищевых волокон, β -глюканов, золы и белка [20]. Авторы другого исследования проводили сравнение физико-химических свойств пяти различных измельченных фракций рисовой муки, обработанной методом сверхтонкого измельчения и шлифования. В итоге было установлено, что с уменьшением размера частиц муки активность амилазы увеличивалась [21]. О положительном влиянии уменьшения размера частиц

пшеничных отрубей сообщалось в работе [22]. В ней с помощью метода ультрадисперсного измельчения было показано, что по мере снижения размера частиц наблюдалось перераспределение компонентов пищевых волокон из нерастворимых в растворимые фракции.

Сводные результаты влияния размера зерновых частиц на пищевую и функциональную ценность получаемого на их основе продукта представлены в таблице.

Влияние размера зерновых частиц на пищевую и функциональную ценность получаемого на их основе продукта

Зерновая культура	Объект	Размер зерновых частиц, мкм	Функциональный показатель	Источник
Пшеница	Зерно	300-430	Максимальное содержание жира, клетчатки	9
Пшеница	Зерно	430-1180	Максимальное содержание фенольных кислот	9
Ячмень	Зерно	152-177	Максимальное содержание белка	23
Пшеница	Отруби	< 50	Увеличение антиоксидантной способности	17
Пшеница	Пищевые волокна	124	Оптимальная доступность витаминов группы В	15
Пшеница	Отруби	50	Максимальная антиоксидантная способность	24
Овес	Талган	< 1000	Увеличение суммарного содержания антиоксидантов	11
Овес	Отруби	> 90	Увеличение содержания β -глюканов	19
Пшеница	Зерно	160	Оптимальное качество клейковины	25
Пшеница	Зерно	195	Снижение качества клейковины	26
Пшеница	Отруби	> 280	Снижение качества хлеба	27
Ячмень	Зерно	< 45	Снижение эффективности сухого фракционирования	28
Пшеница	Отруби	150	Уменьшение дисбактериоза кишечника	29

Заключение. Таким образом, установлено, что размер зерновых частиц является одним из основных параметров, который следует учитывать при рассмотрении пищевой и функциональной ценности получаемых из них продуктов питания. Найдено, что размер частиц измельченного зерна оказывает непосредственное влияние на распределение в нем фенольных кислот, белков, углеводов, сырой клетчатки, золы, сырого жира. Размер зерновых частиц способен влиять на эффективность процесса ферментации пищевых волокон, а также на доступность связанных полифенолов, которые высвобождаются под действием кишечных микробных

сообществ и действуют как антиоксиданты. Известно, что сухое фракционирование зерна ячменя и овса дает обогащенный ценными веществами продукт, содержащий пищевые волокна, β -глюканы и токолы. При этом обогащенная β -глюканами фракция отрубей может иметь коммерческий выход или в качестве пищевого ингредиента, и/или в качестве сырья для дальнейшей переработки. Продемонстрировано, что использование фракционирования пшеничных отрубей и включение только некоторых частей отрубей в пищевые продукты может способствовать существенному повышению функционального потенциала последних.

Литература

1. *Vissers A., Adams M., Tucker G.* Wheat Pre-processing Methods to Improve Nutritional and Technological Functionality // *Cereal Foods World*. 2019. Vol. 64. No 4. DOI: 10.1094/CFW-64-4-0040.
2. *Luthria D.L., Lu Y., John K.M.M.* Bioactive phytochemicals in wheat: Extraction, analysis, processing, and functional properties // *Journal of functional foods*. 2015. Vol. 18. P. 910–925. DOI: 10.1016/j.jff.2015.01.001.
3. *Polonskiy V.I., Loskutov I.G., Sumina A.V.* Biological role and health benefits of antioxidant compounds in cereals // *Biological Communications*. 2020. Vol. 65 No 1. P. 53–67. DOI: 10.21638/spbu03.2020.105.
4. *Onipe O.O., Jideani A.I.O., Beswa D.* Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products // *International Journal of Food Science and Technology*. 2015. Vol. 50. No 12. P. 2509–2518.
5. *Bojanić N., Fišteš A., Rakić D., Kolar S., Ćurić B., Petrović J.* Study on the effects of smooth roll grinding conditions on reduction of wheat middlings using response surface methodology // *Journal of Food Science and Technology*. 2020. Vol. 55. No 2. P. 243–249. DOI: 10.1007/s13197-020-04654-5.
6. *Angelidis G., Protonotariou S., Mandala I., Cristina M.* Rosell Jet milling effect on wheat flour characteristics and starch hydrolysis // *Journal of Food Science and Technology*. 2016. Vol. 53. P. 784–791. DOI: 10.1007/s13197-015-1990-1.
7. *Scanlon M.G., Dexter J.E., Biliaderis C.G.* Particle-size related physical properties of flour produced by smooth roll reduction of hard red spring wheat farina // *Cereal Chemistry*. 1988. Vol. 65. P. 486–492.
8. *Shi L., Li W., Sun J., Qiu Y., Wei X., Luan G., Hu Y., Tatsumi E.* Grinding of maize: The effects of fine grinding on compositional, functional and physicochemical properties of maize flour // *Journal of Cereal Science*. 2016. Vol. 68. No 3. P. 25–30. DOI: 10.1016/j.jcs.2015.11.004.
9. *Memon A.A., Mahar I., Memon R., Soomro S., Harnly J., Memon N., Bhangar M.I., Luthria D.L.* Impact of flour particle size on nutrient and phenolic acid composition of commercial wheat varieties // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020. Vol. 86. No 3. P. 103–108. DOI: 10.1016/j.jfca.2019.103358.
10. *Prasopsunwattana N., Omary M.B., Arndt E.A., Cooke P.H., Flores R.A., Yokoyama W., Toma A., Chongcham S., Lee S.P.* Particle Size Effects on the Quality of Flour Tortillas Enriched with Whole Grain Waxy Barley // *Cereal Chemistry*. 2009. Vol. 86, No 4. P. 439–451. DOI: 10.1094/CCHEM-86-4-0439.
11. *Sumina A.V., Polonskiy V.I.* Particle size distribution of barley Talgan, prepared according to traditional and innovative technologies // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. No. 640. P. 2064.
12. *Sidhu J., NAI-Hooti S., Al-Saqer J.M.* Effect of adding wheat bran and germ fractions on the chemical composition of high-fiber toast bread // *Food Chemistry*. 1999. Vol. 67. No 4. P. 365–371. DOI: 10.1016/S0308-8146(99)00123-5.
13. *Guttieri M.J., Seabourn B.W., Liu C., Baenziger P.S., Waters B.M.* Distribution of Cadmium, Iron, and Zinc in millstreams of hard winter wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2015. Vol. 63. No 10. P. 681–688. DOI: 10.1021/acs.jafc.5b04337.
14. *Brewer L.R., Kubola J., Siriamornpun S., Herald T.J., Shi Y-C.* Wheat bran particle size influence on phytochemical extractability and antioxidant properties // *Food Chemistry*. 2014. Vol. 152. No 3. P. 483–490. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.11.128.
15. *Kurek M.A., Wyrwicz J., Karp S., Wierzbicka A.* Particle size of dietary fiber preparation affects the bioaccessibility of selected vitamin B in fortified wheat bread // *Journal of Cereal Science*. 2017. Vol. 77. P. 166–171. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.07.016.
16. *Johansson D.P., Andersson R., Alminger M., Landberg R., Langton M.* Larger particle size of oat bran inhibits degradation and lowers extractability of β -glucan in sourdough bread – Potential implications for cholesterol-lowering properties *in vivo* // *Food Hydrocolloids*. 2018. Vol. 77. No 4. P. 49–56. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.09.016.

17. Rosa N.N., Barron C., Gaiani C., Dufour C., Micard V. Ultra-fine grinding increases the antioxidant capacity of wheat bran // *Journal of Cereal Science*. 2013. Vol. 57. No 1. P. 84–90. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.10.002.
18. Hemery Y.M., Anson-N.M., Havenaar R., Guido R.M.M., Martijn H., Noort W.J., Rouau X. Dry-fractionation of wheat bran increases the bioaccessibility of phenolic acids in breads made from processed bran fractions // *Food Research International*. 2010. Vol. 43. No 5. P. 1429–1438. DOI: 10.1016/j.foodres.2010.04.013.
19. Wu Y.V., Doehlert D.C. Enrichment of β -glucan in Oat Bran by Fine Grinding and Air Classification // *LWT – Food Science and Technology*. 2002. Vol. 35. No 1. P. 30–33. DOI: 10.1006/fstl.2001.0806.
20. Koryluk J., Kawka A., Gasiorowski H., Chalcarz A., Aniola J. Milling of barley to obtain β -glucan enriched products // *Molecular Nutrition and Food Research*. 2000. Vol. 44. No 4. P. 238–241.
21. Xu Q., Lü Q., Chang J., Chen X. Study on physicochemical properties of different grain size millet powder // *Cereals and Oils*. 2018. No 9. P. 213–219.
22. Xue K., Sheng Z., Wei H., Hai P., Hui F.Q., Zhou M. Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber // *Food Research International*. 2010. Vol. 43. No 4. P. 943–948. DOI: 10.1016/j.foodres.2010.01.005.
23. Sharma P. Processing and Utilization of Barley (*Hordeum vulgare* L.) in Human Foods for its β -Glucan Content // Thesis Doctor of Philosophy in Food Technology. Guru Nanak Dev University. Amritsar, 2012. 276 p.
24. Coda R., Rizzello C.G., Curiel J.A., Poutanen K., Katina K. Effect of bioprocessing and particle size on the nutritional properties of wheat bran fractions // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2014. Vol. 25. P. 19–27. DOI: 10.1016/j.ifset.2013.11.012.
25. Xiong L., Zhang B., Niu M., Zhao S. Protein polymerization and water mobility in whole-wheat dough influenced by bran particle size distribution // *LWT – Food Science and Technology*. 2017. Vol. 82. No 9. P. 396–403. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.04.064.
26. Bressiani J., Oro T., Santetti G.S., Almeida J.L., Bertolin T.E., Gómez M., Gutkoski L.C. Properties of whole grain wheat flour and performance in bakery products as a function of particle size // *Journal of Cereal Science*. 2017. Vol. 75. No 5. P. 269–277. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.05.001.
27. Majzoobi M., Farahnaky A., Nematollahi Z., Hashemi M.T., Ardakani M.J. Effect of different levels and particle sizes of wheat bran on the quality of flat bread // *Journal of Agricultural Science and Technology (JAST)*. 2013. Vol. 15. No 1. P. 115–123.
28. Knuckles B.E., Chiu M.M. β -Glucan Enrichment of Barley Fractions by Air Classification and Sieving // *Journal of Food Science*. 1995. Vol. 60. No 5. P. 1070-1074. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1995.tb06294.x.
29. Suriano F., Neyrinck A.M., Verspreet J., Olivares M., Leclercq S., Van de Wielec T., Courtin C.M., Cania P.D., Bindels L.B., Delzenne N.M. Particle size determines the anti-inflammatory effect of wheat bran in a model of fructose over-consumption: Implication of the gut microbiota // *Journal of Functional Foods*. 2018. Vol. 41. P. 155–162. DOI: 10.1016/j.jff.2017.12.035.

References

1. Vissers A., Adams M., Tucker G. Wheat Pre-processing Methods to Improve Nutritional and Technological Functionality // *Cereal Foods World*. 2019. Vol. 64. No 4. DOI: 10.1094/CFW-64-4-0040.
2. Luthria D.L., Lu Y., John K.M.M. Bioactive phytochemicals in wheat: Extraction, analysis, processing, and functional properties // *Journal of functional foods*. 2015. Vol. 18. P. 910–925. DOI: 10.1016/j.jff.2015.01.001.
3. Polonskiy V.I., Loskutov I.G., Sumina A.V. Biological role and health benefits of antioxidant compounds in cereals // *Biological Communications*. 2020. Vol. 65 No 1. P. 53–67. DOI: 10.21638/spbu03.2020.105.
4. Onipe O.O., Jideani A.I.O., Beswa D. Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products // *In-*

- ternational Journal of Food Science and Technology. 2015. Vol. 50. No 12. P. 2509–2518.
5. *Bojanić N., Fišteš A., Rakić D., Kolar S., Čurić B., Petrović J.* Study on the effects of smooth roll grinding conditions on reduction of wheat middlings using response surface methodology // *Journal of Food Science and Technology*. 2020. Vol. 55. No 2. P. 243–249. DOI: 10.1007/s13197-020-04654-5.
 6. *Angelidis G., Protonotariou S., Mandala I., Cristina M.* Rosell Jet milling effect on wheat flour characteristics and starch hydrolysis // *Journal of Food Science and Technology*. 2016. Vol. 53. P. 784–791. DOI: 10.1007/s13197-015-1990-1.
 7. *Scanlon M.G., Dexter J.E., Biliaderis C.G.* Particle-size related physical properties of flour produced by smooth roll reduction of hard red spring wheat farina // *Cereal Chemistry*. 1988. Vol. 65. P. 486–492.
 8. *Shi L., Li W., Sun J., Qiu Y., Wei X., Luan G., Hu Y., Tatsumi E.* Grinding of maize: The effects of fine grinding on compositional, functional and physicochemical properties of maize flour // *Journal of Cereal Science*. 2016. Vol. 68. No 3. P. 25–30. DOI: 10.1016/j.jcs.2015.11.004.
 9. *Memon A.A., Mahar I., Memon R., Soomro S., Harnly J., Memon N., Bhangar M.I., Luthria D.L.* Impact of flour particle size on nutrient and phenolic acid composition of commercial wheat varieties // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020. Vol. 86. No 3. P. 103–108. DOI: 10.1016/j.jfca.2019.103358.
 10. *Prasopsunwattana N., Omary M.B., Arndt E.A., Cooke P.H., Flores R.A., Yokoyama W., Toma A., Chongcham S., Lee S.P.* Particle Size Effects on the Quality of Flour Tortillas Enriched with Whole Grain Waxy Barley // *Cereal Chemistry*. 2009. Vol. 86, No 4. P. 439–451. DOI: 10.1094/CCHEM-86-4-0439.
 11. *Sumina A.V., Polonskiy V.I.* Particle size distribution of barley Talgan, prepared according to traditional and innovative technologies // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. No. 640. P. 2064.
 12. *Sidhu J., NAI-Hooti S., Al-Saqer J.M.* Effect of adding wheat bran and germ fractions on the chemical composition of high-fiber toast bread // *Food Chemistry*. 1999. Vol. 67. No 4. P. 365–371. DOI: 10.1016/S0308-8146(99)00123-5.
 13. *Guttieri M.J., Seabourn B.W., Liu C., Baenziger P.S., Waters B.M.* Distribution of Cadmium, Iron, and Zinc in millstreams of hard winter wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2015. Vol. 63. No 10. P. 681–688. DOI: 10.1021/acs.jafc.5b04337.
 14. *Brewer L.R., Kubola J., Siriamornpun S., Herald T.J., Shi Y-C.* Wheat bran particle size influence on phytochemical extractability and antioxidant properties // *Food Chemistry*. 2014. Vol. 152. No 3. P. 483–490. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.11.128.
 15. *Kurek M.A., Wyrwicz J., Karp S., Wierzbicka A.* Particle size of dietary fiber preparation affects the bioaccessibility of selected vitamin B in fortified wheat bread // *Journal of Cereal Science*. 2017. Vol. 77. P. 166–171. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.07.016.
 16. *Johansson D.P., Andersson R., Alming M., Landberg R., Langton M.* Larger particle size of oat bran inhibits degradation and lowers extractability of β -glucan in sourdough bread – Potential implications for cholesterol-lowering properties *in vivo* // *Food Hydrocolloids*. 2018. Vol. 77. No 4. P. 49–56. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.09.016.
 17. *Rosa N.N., Barron C., Gaiani C., Dufour C., Micard V.* Ultra-fine grinding increases the antioxidant capacity of wheat bran // *Journal of Cereal Science*. 2013. Vol. 57. No 1. P. 84–90. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.10.002.
 18. *Hemery Y.M., Anson N.M., Havenaar R., Guido R.M.M., Martijn H., Noort W.J., Rouau X.* Dry-fractionation of wheat bran increases the bioaccessibility of phenolic acids in breads made from processed bran fractions // *Food Research International*. 2010. Vol. 43. No 5. P. 1429–1438. DOI: 10.1016/j.foodres.2010.04.013.
 19. *Wu Y.V., Doehlert D.C.* Enrichment of β -glucan in Oat Bran by Fine Grinding and Air Classification // *LWT – Food Science and Technology*. 2002. Vol. 35. No 1. P. 30–33. DOI: 10.1006/fstl.2001.0806.
 20. *Kirylyuk J., Kawka A., Gasiowski H., Chalcarz A., Anioła J.* Milling of barley to obtain

- β -glucan enriched products // *Molecular Nutrition and Food Research*. 2000. Vol. 44. No 4. P. 238–241.
21. Xu Q., Lü Q., Chang J., Chen X. Study on physicochemical properties of different grain size millet powder // *Cereals and Oils*. 2018. No 9. P. 213–219.
22. Xue K., Sheng Z., Wei H., Hai P., Hui F.Q., Zhou M. Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber // *Food Research International*. 2010. Vol. 43. No 4. P. 943–948. DOI: 10.1016/j.foodres.2010.01.005.
23. Sharma P. Processing and Utilization of Barley (*Hordeum vulgare* L.) in Human Foods for its β -Glucan Content // Thesis Doctor of Philosophy in Food Technology. Guru Nanak Dev University. Amritsar, 2012. 276 p.
24. Coda R., Rizzello C.G., Curiel J.A., Poutanen K., Katina K. Effect of bioprocessing and particle size on the nutritional properties of wheat bran fractions // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2014. Vol. 25. P. 19–27. DOI: 10.1016/j.ifset.2013.11.012.
25. Xiong L., Zhang B., Niu M., Zhao S. Protein polymerization and water mobility in whole-wheat dough influenced by bran particle size distribution // *LWT – Food Science and Technology*. 2017. Vol. 82. No 9. P. 396–403. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.04.064.
26. Bressiani J., Oro T., Santetti G.S., Almeida J.L., Bertolin T.E., Gómez M., Gutkoski L.C. Properties of whole grain wheat flour and performance in bakery products as a function of particle size // *Journal of Cereal Science*. 2017. Vol. 75. No 5. P. 269–277. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.05.001.
27. Majzoobi M., Farahnaky A., Nematollahi Z., Hashemi M.T., Ardakani M.J. Effect of different levels and particle sizes of wheat bran on the quality of flat bread // *Journal of Agricultural Science and Technology (JAST)*. 2013. Vol. 15. No 1. P. 115–123.
28. Knuckles B.E., Chiu M.M. β -Glucan Enrichment of Barley Fractions by Air Classification and Sieving // *Journal of Food Science*. 1995. Vol. 60. No 5. P. 1070-1074. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1995.tb06294.x.
29. Suriano F., Neyrinck A.M., Verspreet J., Olivares M., Leclercq S., Van de Wielec T., Courtin C.M., Cania P.D., Bindels L.B., Delzenne N.M. Particle size determines the anti-inflammatory effect of wheat bran in a model of fructose over-consumption: Implication of the gut microbiota // *Journal of Functional Foods*. 2018. Vol. 41. P. 155–162. DOI: 10.1016/j.jff.2017.12.035.

