

## Влияние водной активности на структуру и характеристики хлебцев

Симаков Д.Г., Фролов Д.И.

**Аннотация.** В статье исследуется влияние активности воды на структуру и механические свойства ржаных хрустящих хлебцев и хлебцев с клетчаткой, содержащих цельнозерновую ржаную муку, пшеничные отруби, овсяную муку и семена кунжута. Хлебцы хранились при активности воды в диапазоне 0-0,75. Механические свойства измерялись с помощью испытаний на трехточечный изгиб. Активность воды существенно влияла на механические свойства хрустящих хлебцев. Увеличение активности воды вызывало увеличение напряжения разрушения при активности воды в диапазоне от 0,030 до 0,255 для ржаных хлебцев и при 0,039-0,319 для хлебцев с клетчаткой. Увеличение активности воды выше этих значений вызывало размягчение и резкое снижение модуля деформации и напряжения разрушения. Ржаные хлебцы имели меньшую устойчивость к деформации, чем хлебцы с клетчаткой, вероятно, из-за различий в составе, а добавленные зерновые ингредиенты давали более неоднородную структуру.

**Ключевые слова:** хлебцы, механические свойства, активность воды, структура.

**Для цитирования:** Симаков Д.Г., Фролов Д.И. Влияние водной активности на структуру и характеристики хлебцев // Инновационная техника и технология. 2024. Т. 11. № 4. С. 25–30.

## Effect of water activity on the structure and characteristics of rye and fibrous crispbreads

Simakov D.G., Frolov D.I.

**Abstract.** The paper investigates the effect of water activity on the structure and mechanical properties of rye crispbreads and fiber crispbreads containing whole grain rye flour, wheat bran, oat flour and sesame seeds. The crispbreads were stored at water activities in the range of 0-0.75. The mechanical properties were measured using three-point bending tests. Water activity significantly affected the mechanical properties of the crispbreads. An increase in water activity caused an increase in the failure stress at water activities in the range of 0.030 to 0.255 for rye crispbreads and at 0.039-0.319 for fiber crispbreads. An increase in water activity above these values caused softening and a sharp decrease in the deformation modulus and failure stress. Rye crispbreads had lower deformation resistance than fiber crispbreads, probably due to differences in composition, and the added grain ingredients produced a more heterogeneous structure.

**Keywords:** crispbreads, mechanical properties, water activity, structure.

**For citation:** Simakov D.G., Frolov D.I. Effect of water activity on the structure and characteristics of rye and fibrous crispbreads. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2024. Vol. 11. No. 4. pp. 25–30. (In Russ.).

### Введение

Цельнозерновые продукты, такие как цельнозерновой хлеб, хрустящие хлебцы, хлопья для завтрака и воздушные цельнозерновые продукты, являются важными источниками питательных веществ, которых не хватает в рационе, включая пищевые волокна, резистентный крахмал, микроэлементы, некоторые витамины и другие компоненты. Цельнозерновые волокна считаются значимым

фактором, способствующим снижению риска таких заболеваний, как диабет, сердечно-сосудистые заболевания и некоторые виды рака [2, 3, 4]. Несмотря на растущий интерес к цельнозерновым продуктам, текстура как наиболее важный сенсорный атрибут остается приоритетным критерием выбора потребителя.

Текстура в основном связана с физическими и особенно механическими свойствами пищевых продуктов [5, 6]. Большинство сухих хрустящих/

хрустящих пищевых продуктов имеют пористую структуру, состоящую из ячеек, окружённых тонкими стенками твердого материала, окружающих воздушные ячейки. Механические и конечные свойства этих ячеистых твердых тел зависят от состава и однородности материалов, а также от количества и структуры пор. Неоднородность внутренней структуры и поверхностных характеристик хрупких и хрустящих пищевых продуктов приводит к очень сложному механизму разрушения, который включает повторяющуюся деформацию и разрушение последующих слоев в ячеистой структуре. Механические свойства и структура ячеистых твердых пищевых продуктов приводят к нерегулярной и нестабильной зависимости между усилием и деформацией. Сухие хлебобулочные и экструдированные продукты на основе злаков, такие как хрустящие хлебцы, вафли, крекеры, гигроскопичны из-за своего химического состава, пористости и наличия крахмала в аморфном состоянии. Если влажность этих хрустящих продуктов увеличивается из-за сорбции воды из атмосферы или переноса массы из соседних компонентов, это приводит к сырой, мягкой текстуре. Хрусткость связана с приятным текстурным контактом и со свежестью и хорошим качеством зернового продукта с низким содержанием влаги. Ее потеря, вызванная повышенной влажностью материала, является основной причиной неудовлетворительного вкуса для потребителя.

Вода является компонентом пищи, который влияет на стабильность, качество и физические свойства пищи [7]. В твердых продуктах вода влияет на их реакцию на силу. Увеличение содержания воды может привести к пластифицирующим или антипластифицирующим эффектам. Пластификация полимерных цепей облегчает деформацию, и хрупкий материал становится пластичным и теряет хрусткость.

Влияние активности воды на хрусткость клеточных продуктов изучалось многими авторами. Так соленые крекеры, попкорн и жареные картофельные чипсы теряли хрусткость, когда их активность воды превышала 0,35–0,50 в зависимости от продукта. Небольшое снижение хрусткости сухих завтраков происходило при активности воды меньше 0,5. После этого наблюдалось быстрое снижение хрусткости до 0,8, при котором продукт полностью терял свою хрупкость.

Адсорбированная вода вызывает увеличение механического сопротивления материала и снижает его хрупкость. Напряжение разрушения плоского пшеничного и ржаного хлеба увеличивалось по мере адсорбции влаги и достигало пика при активности воды 0,5–0,6. Выпеченные и экструдированные зерновые продукты, как правило, находятся в стеклообразном состоянии, поскольку приготовление пищи сопровождается исчезновением большинства кристаллических структур нативного крахмала. Зерновые продукты, хранящиеся выше температуры стеклования, претерпевают измене-

ния, которые проявляются, среди прочего, в изменении их механических свойств. Клеточные продукты могут загустевать, а их механическая прочность может увеличиваться.

Механические свойства и поведение при разрушении хрустящих пищевых продуктов сильно зависят от их структуры. Микроскопия может предоставить информацию о структуре клеточного материала. Наиболее часто используемый метод определения структуры хлеба основан на световой микроскопии. Форма и размер газовых ячеек являются важным показателем качества клеточных структур хлебного мякиша.

На текстуру клеточных пищевых продуктов влияет множество факторов. Более того, знание этих параметров важно для определения реальных свойств материала, а также для прогнозирования поведения продуктов во время хранения. Экструдированные и выпеченные зерновые продукты очень популярны. Их главная привлекательность для потребителей, помимо их питательных преимуществ, заключается в их хрустящей текстуре. Потеря хрусткости в пищевых продуктах может быть вызвана увеличением влажности из-за сорбции воды во время хранения сухого хрустящего хлеба.

Целью данной работы было получение лучшего понимания взаимосвязи между активностью воды хрустящего хлеба и его механическими свойствами и структурой. Характеристики влияния активности воды на механические параметры и структуру могут быть использованы для прогнозирования срока годности и качества хрустящих хлебцев.

### Объекты и методы исследования

Цельнозерновые ржаные хрустящие хлебцы и хрустящие хлебцы с волокнами из цельнозерновой ржаной муки, пшеничных отрубей и семенами кунжута были куплены в магазине. Типичные хрустящие хлебцы прямоугольной формы имели размер 111 x 60 мм и толщину 4 мм. Образцы были уравновешены над насыщенными растворами солей в эксикаторах до активности воды в диапазоне от 0 до 0,75 при 25°C. Активность воды измерялась с точностью  $\pm 0,001$  после 49 дней хранения, в то время как содержание воды в образцах измерялось путем высушивания.

Механические свойства исследуемых хлебов измерялись с помощью испытания на изгиб при трехточечной нагрузке. Образцы помещались на два поддерживающих параллельных стержня, расположенных на расстоянии 50 мм друг от друга. Данные о силе и деформации регистрировались, анализировались и рассчитывались некоторые механические показатели.

Напряжение разрушения при рассчитывалось по уравнению:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bt^2} \quad (1)$$

где: L - расстояние между опорами;

F - разрушающее усилие;  
b - ширина образца;  
t - толщина образца.

Модуль деформации  $E_B$  рассчитывался следующим образом:

$$E_B = \left( \frac{dF}{d\delta} \right) \cdot \left( \frac{L^3}{4bt^3} \right) \quad (2)$$

где  $\frac{dF}{d\delta}$  - начальный наклон кривой сила-деформация.

Деформация разрушения  $\varepsilon_f$  рассчитывалась по следующему уравнению:

$$\varepsilon_f = \frac{6\delta_{\max}t}{L^2} \quad (3)$$

где:  $\delta_{\max}$  - деформация при разрушении.

Работа разрушения рассчитывалась как площадь под кривой изгиба: сила - деформация.

### Результаты и их обсуждение

В большинстве литературных источников, описывающих влияние активности воды на текстурные свойства, было замечено, что образцы, хранящиеся над растворами солей, которые обеспечивают относительную влажность воздуха, достигают равновесия влажности в течение определенного периода времени, обычно от 1 до 3 недель. Ржаные и хрустящие хлебцы с клетчаткой, помещенные в эксикаторы, имели активность воды в диапазоне от 0,03 до 0,61. Однако образцы не достигли своей конкретной предполагаемой активности воды после 49 дней хранения. Значительная разница в активности воды между значениями, полученными для продукта и окружающей среды в эксикаторах, была очевидна при высокой относительной влажности. Активность воды и содержание влаги в образцах измерялись сразу после извлечения их из упаковки. Как указано в Таблице 2, активность воды ржаного и волокнистого хлеба были очень похожи, но образцы показали различия в содержании воды. Это вероятно было связано с химическим составом хлеба. Хлебцы с клетчаткой содержали цельные семена кунжута и овсяную муку, особенно в поверхностном слое хлеба. Более неоднородная структура волокнистого хрустящего хлеба, чем у ржаного хрустящего хлеба, могла повлиять на его механические свойства. Более высокие значения напряжения разрушения и модуль деформации наблюдались для хрустящего хлеба с волокнами, но различия не были статистически значимыми.

Влияние активности воды на изгиб-ломкость ржаного хрустящего хлеба показано на рисунке 1. Он показывает силу в зависимости от деформации

для активности воды 0,03, 0,255, 0,453 и 0,61. Из кривых видно, что хрупкое поведение, наблюдаемое для хрустящего хлеба при низкой активности воды, характеризовалось несколькими пиками. В ржаном хрустящем хлебе увеличение активности воды с 0,030 до 0,453 привело к 2-кратному увеличению деформации, при которой образец сломался. Увеличение активности воды сгладило кривые изгиба, что указывало на то, что произошло меньше событий микроразрыва. Увеличение активности воды выше 0,4 уменьшило разрывное усилие и увеличило деформацию при разрыве.

Механические свойства хрустящего хлеба с волокнами были аналогичны свойствам ржаного хрустящего хлеба. Увеличение силы и деформации, при которых произошел разрыв, было результатом увеличения активности воды. Хотя форма кривых и общая тенденция к сглаживанию кривых были аналогичны ранее описанным для ржаного хлеба, пластическое поведение хрустящего хлеба с волокнами происходило при более высокой активности воды, чем у ржаного хлеба. Уменьшение силы разрыва с ростом активности воды наблюдалось выше активности воды 0,3 для хрустящего хлеба с волокнами.

Напряжение разрушения как функция активности воды для ржаного и волокнистого хрустящего хлеба показано на рисунке 2. Напряжение разрушения волокнистого и ржаного хрустящего хлеба было тесно связано с активностью воды. При низкой активности воды увеличение активности воды приводило к более высокому напряжению разрушения. Напряжение разрушения в целом описывает

Таблица 1 - Характеристики хрустящего хлеба, уравновешенного по различной активности воды

Вид хлеба	Активность воды в эксикаторе	Активность воды в хрустящих хлебцах	Содержание воды в хрустящих хлебцах	Работа разрушения хрустящего хлеба
	0	0,03	1,62	3,54
	0,225	0,255	5,69	5,54
	0,328	0,312	6,03	5,78
Ржаной	0,432	0,38	7,32	6,01
	0,529	0,453	8,53	5,51
	0,648	0,531	10,44	5,44
	0,753	0,612	11,94	5,6
	0	0,039	2,14	4,04
	0,225	0,237	5,22	4,67
	0,328	0,319	6,16	8,5
С клетчаткой	0,432	0,399	6,7	6,48
	0,529	0,389	8,03	5,8
	0,648	0,525	10,05	6,11
	0,753	0,56	10,85	8

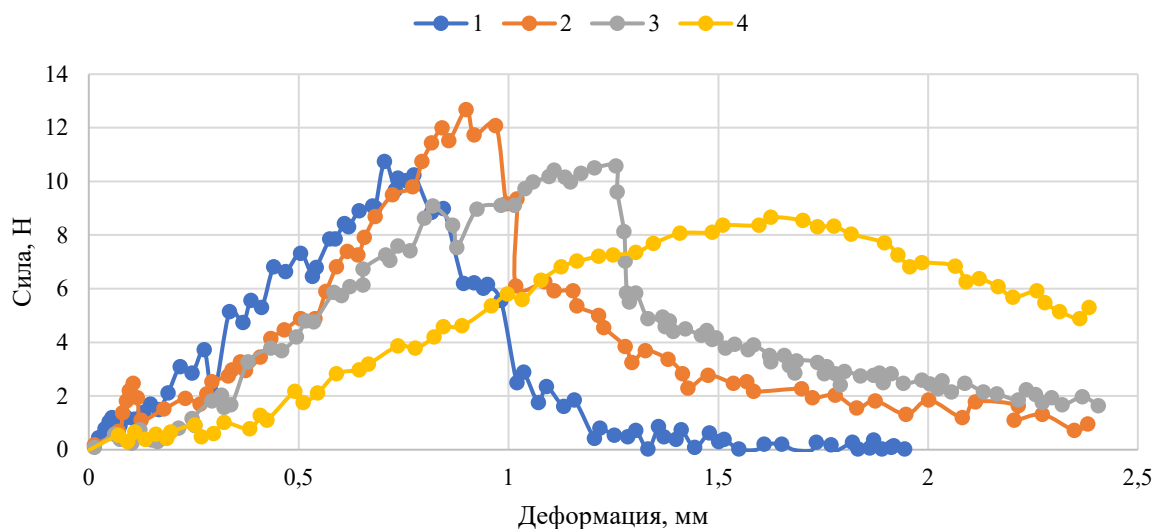


Рис. 1. Кривые разрушения ржаного хрустящего хлеба при различной активности воды

прочность на разрыв продуктов. Таким образом, прочность на разрыв была наибольшей при критической активности воды, т. е. 0,255 для ржаного хлеба и при 0,319 для волокнистого хлеба. После этих значений образцы становились более деформируемыми и пластичными, и чем выше содержание воды, тем ниже наблюдались значения напряжения разрушения.

Адсорбция воды привела к упрочнению исследуемых материалов и снижению их хрупкости. Увеличение прочности вместе с увеличением активности воды было объяснено другими исследованиями как результат частичной пластификации материала стенки воздушной ячейки, что увеличивает сцепление структуры, а следовательно, и твердость. Упрочнение экструдированного хрустящего хлеба в диапазоне содержания воды от 9 до 11% также наблюдалось в исследованиях ученых [1]. Эти авторы предположили, что механическое поведение экструдированного хлеба зависит от ближней струк-

турной реорганизации, вызванной повышенной молекулярной подвижностью. Изменения крахмала и механическое поведение плоского хрустящего хлеба были результатом процесса экструзии. В нашей работе исследуемые хрустящие хлебцы были получены путем выпечки теста, состоящего из смеси муки и воды с небольшим количеством соли, и некоторых других ингредиентов. Поэтому уровень критической активности воды, после которого продукты теряют прочность, был установлен на уровне 0,255 для ржаного и 0,319 для хрустящего хлеба с волокнами. Активность воды выше этих значений влияла на текстуру хрустящего хлеба, размягчая матрицу крахмала/белка. Хлеб с волокнами также изготавливался из ржаной муки, но добавленные семена кунжута и овсяная мука изменяли прочность материала. Напряжение разрушения при критической активности воды для хрустящего хлеба с волокнами было примерно на 12% выше, чем для ржаного продукта.

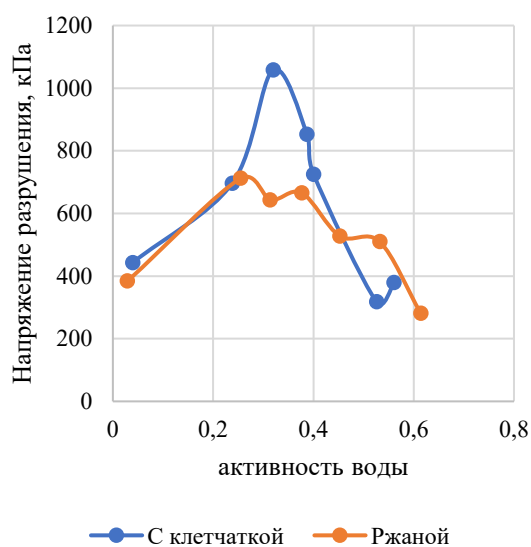


Рис. 2. Напряжение разрушения как функция активности воды в хрустящем хлебе

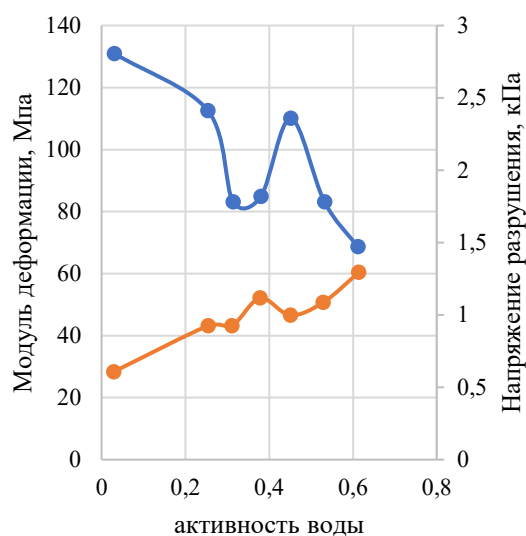


Рис. 3. Влияние активности воды на модуль деформации и деформацию разрушения ржаных хлебцев

Таблица 2 - Механические свойства хрустящих хлебцев, определенные непосредственно на образце

Вид хлеба	Водная активность	Содержание воды	Напряжение разрушения	Работа разрушения	Модуль деформации	Деформация разрушения
Ржаной	0,274	6,36	1032,8	7,51	95,5	1,04
С клетчаткой	0,28	8,03	1069,5	7,21	100,6	0,92

Влияние активности воды на модуль деформации и деформацию разрушения ржаного и волокнистого хлеба представлено на рисунках 3 и 4. Рисунок 3 показывает, что для ржаного хлеба зависимости между модулем деформации, деформацией разрушения и активностью воды были линейными. Модуль деформации ржаного хлеба уменьшался по мере увеличения активности воды. Адсорбированная вода влияла на потерю жесткости и хрупкости образцов.

Небольшие деформации разрушения образцов при низкой активности воды характеризовались начальным упругим поведением при разрушении. Увеличение деформации разрушения отражало пластификацию хрустящего хлеба водой. Чем выше активность воды, тем более пластичным был материал. От активности воды 0,039 модуль деформации и деформация разрушения волокнистого хлеба оставались постоянными до активности воды 0,237. Выше этой активности воды наблюдалось уменьшение значений модуля деформации и постепенное увеличение деформации разрушения в результате увеличения активности воды. Материал, имеющий активность воды в диапазоне от 0 до 0,65, был подвергнут количественному описательному анализу. Связь между большинством кинестетических атрибутов и активностью воды оставалась постоянной в диапазоне активности воды 0,198-0,308. Увеличение активности воды выше 0,31 вызывало постепенное снижение общего качества и увеличение

пластичности, которая описывала уровень пластичности при первом укусе.

Общая тенденция изменения работы при изменении активности воды не была последовательной. Увеличение активности воды хрустящих хлебцев вызывало увеличение работы разрушения, и работа достигала максимального значения при активности воды 0,432 для ржаных хрустящих хлебцев и при 0,328 для волокнистого хлеба, а затем значения работы менялись.

Активность воды является важным фактором, влияющим на механическое поведение хрупких пищевых продуктов. Предполагается, что адсорбированная вода действует как смазка при высокой активности воды и снижает трение между поверхностями, что приводит к низкой прочности. Это можно объяснить различиями в микроструктуре исследуемых продуктов и составе хлеба.

## Выводы

Изменения активности воды были ответственны за механические свойства ржаных и волокнистых хрустящих хлебцев. Повышение активности воды вызвало увеличение напряжения разрушения при активности воды в диапазоне от 0,030 до 0,255 для ржаного хлеба и от 0,039 до 0,319 для волокнистого хлеба. Упрочнение образцов, вероятно, было связано со структурными перестройками биополимеров, и адсорбированная вода, по-видимому, индуцировала новую матрицу белков и углеводов. Кажется, что различия в структуре хрустящих хлебцев могут играть важную роль в формировании более твердой текстуры. Увеличение активности воды выше этих критических значений вызывало размягчение и текучесть хрустящих хлебцев. Уменьшение модуля деформируемости, сопровождающееся увеличением деформации разрушения, объяснялось увеличением влажности, вызывающим структурную деградацию. Высокая активность воды повлияла на более пластичное поведение образцов и потерю хрупкости. При высоком содержании воды текстура становилась мягкой и резиновой. Ржаной хлеб имел меньшую устойчивость к деформации, чем волокнистый хлеб, вероятно, из-за различий в составе, поскольку добавленные зерновые ингредиенты давали более неоднородную структуру.

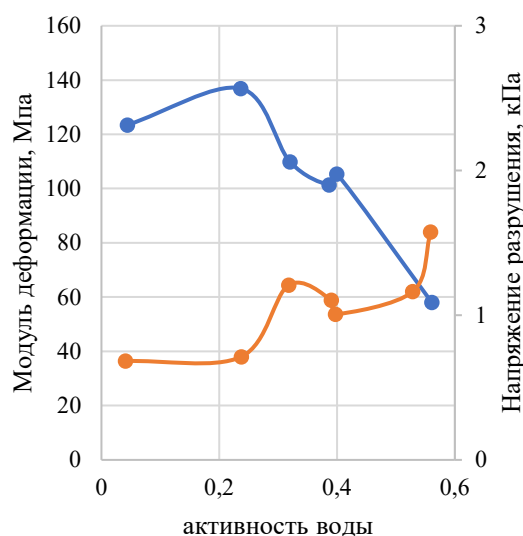


Рис. 4. Влияние активности воды на модуль деформации и деформацию разрушения хлебцев с клетчаткой

## Литература

- [1] Marzec A., Lewicki P. P. Antiplasticization of cereal-based products by water. Part I. Extruded flat bread // Journal of Food Engineering. – 2006. – Т. 73. – №. 1. – С. 1-8.
- [2] Ладик Е. А., Шипилов И. В., Воронин В. Н. Хронические неинфекционные заболевания и факторы их развития // Вопросы диетологии. – 2019. – Т. 9. – №. 4. – С. 24-36.
- [3] Пырьева Е. А., Сафронова А. И. Роль и место пищевых волокон в структуре питания населения // Вопросы питания. – 2019. – Т. 88. – №. 6. – С. 5-11.
- [4] Драпкина О. М. и др. Алиментарно-зависимые факторы риска хронических неинфекционных заболеваний и привычки питания: диетологическая коррекция в рамках профилактического консультирования. Методические рекомендации // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2021. – Т. 20. – №. 5. – С. 273-334.
- [5] Лазарев А. А., Кузнецова Т. Г. Отечественные и зарубежные подходы при описании и оценке консистенции и текстуры мясной продукции // Все о мясе. – 2019. – №. 5. – С. 19-23.
- [6] Барсукова Н. В., Решетников Д. А., Красильников В. Н. Пищевая инженерия: технологии безглютеновых мучных изделий // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2011. – №. 1. – С. 51-60.
- [7] Тарасова В. В. Применение физиологически функциональных ингредиентов в производстве хлебобулочных изделий // Пищевая промышленность. – 2014. – №. 3. – С. 34-40.

## References

- [1] Marzec A., Lewicki P. P. Antiplasticization of cereal-based products by water. Part I. Extruded flat bread // Journal of Food Engineering. - 2006. - Vol. 73. - No. 1. - P. 1-8.
- [2] Ladik E. A., Shipilov I. V., Voronin V. N. Chronic non-infectious diseases and factors of their development // Questions of Dietology. - 2019. - Vol. 9. - No. 4. - P. 24-36.
- [3] Pyryeva E. A., Safronova A. I. The role and place of dietary fiber in the structure of population nutrition // Questions of Nutrition. - 2019. - Vol. 88. - No. 6. - P. 5-11.
- [4] Drapkina O. M. et al. Alimentary-dependent risk factors for chronic non-communicable diseases and eating habits: dietary correction as part of preventive counseling. Guidelines // Cardiovascular therapy and prevention. - 2021. - Vol. 20. - No. 5. - P. 273-334.
- [5] Lazarev A. A., Kuznetsova T. G. Domestic and foreign approaches to the description and assessment of the consistency and texture of meat products // All about meat. - 2019. - No. 5. - P. 19-23.
- [6] Barsukova N. V., Reshetnikov D. A., Krasilnikov V. N. Food engineering: technologies of gluten-free flour products // Scientific journal of NRU ITMO. Series «Processes and equipment of food production». – 2011. – No. 1. – P. 51-60.
- [7] Tarasova V. V. Application of physiologically functional ingredients in the production of bakery products // Food industry. – 2014. – No. 3. – P. 34-40.

## Сведения об авторах

## Information about the authors

<p><b>Симаков Данил Геннадьевич</b> аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 914-73-00 E-mail: ms.varlos@mail.ru</p>	<p><b>Simakov Danil Gennadievich</b> upostgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University <b>Phone:</b> +7(937) 914-73-00 <b>E-mail:</b> ms.varlos@mail.ru</p>
<p><b>Фролов Дмитрий Иванович</b> кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p><b>Frolov Dmitriy Ivanovich</b> PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University <b>Phone:</b> +7(937) 408-35-28 <b>E-mail:</b> surr@bk.ru</p>