

УДК 664.769:577.1

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МОЛОЧНОКИСЛОЙ ЗАКВАСКИ НА БИОХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЕРМЕНТИРОВАННОГО ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ

Е. Н. Урбанчик, А. Л. Желудков, А. С. Барашков, Л. В. Шустова

*Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Республика Беларусь*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Пророщенные зерна пшеницы являются ценным, но скоропортящимся продуктом. Ферментация молочнокислыми бактериями – перспективный способ повышения их безопасности и функциональных свойств. Однако влияние концентрации молочнокислой закваски на биотрансформацию пророщенного зерна изучено недостаточно, что определяет научную и практическую актуальность исследования. Гипотеза – варьирование концентрации закваски существенно влияет на биохимические процессы и конечные свойства продукта. Цель – определить оптимальную концентрацию закваски для максимизации пищевой ценности и функционально-технологических свойств ферментированного пророщенного зерна. Научная задача: установить закономерности влияния концентрации молочнокислых бактерий на аминокислотный состав, содержание витаминов, сахаров и реологические свойства.

**Материалы и методы.** Использовали пророщенное зерно пшеницы, ферментированное закваской в концентрациях 0,005–0,02 %. Применяли стандартные методы анализа химического состава и свойств.

**Результаты.** Установлено, что концентрация закваски 0,02 % является оптимальной. Она обеспечивает максимальное накопление биологически ценных компонентов: увеличение содержания свободных аминокислот на 35 %, сахаров – на 117 %, витаминов группы В – на 41–100 % по сравнению с контрольным образцом. Индекс незаменимых аминокислот возрос до 1,92. Также улучшились функционально-технологические свойства: водопоглотительная способность увеличилась на 12 %, пластичность – на 16 %.

**Заключение.** Ферментированное пророщенное зерно пшеницы с использованием 0,02 % закваски рекомендовано к применению в качестве высококачественного функционального ингредиента в пищевой промышленности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пророщенное зерно пшеницы; ферментация; молочнокислая закваска; концентрация закваски; биохимические свойства; структурно-реологические свойства; аминокислотный скор; функциональный пищевой ингредиент.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Урбанчик, Е. Н. Влияние концентрации молочнокислой закваски на биохимические и структурно-реологические свойства ферментированного пророщенного зерна пшеницы // Е. Н. Урбанчик, А. Л. Желудков, А. С. Барашков, Л. В. Шустова // Вестник Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий. – 2025. – № 2 (39). – С. 14–25.

## EFFECT OF LACTIC ACID STARTER CONCENTRATION ON BIOCHEMICAL AND STRUCTURAL-RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FERMENTED SPROUTED WHEAT GRAINS

A. N. Urbantchik, A. L. Zhaludkou, A. S. Barashkau, L. V. Shustava

*Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus*

### ABSTRACT

**Introduction.** Sprouted wheat grains represent a valuable but perishable product. Fermentation using lactic acid bacteria is a promising way to enhance both safety and functional properties. However, the effect of starter culture concentration on the biotransformation of sprouted grains remains insufficiently studied, which determines the scientific and practical relevance of this research. Hypothesis: variations in the starter concentration significantly affect the biochemical processes and final product characteristics. Objective: to determine the optimal concentration of lactic acid starter culture to maximize the nutritional value and

functional-technological properties of fermented sprouted grains. Scientific task: to establish the patterns of how LAB concentration affects changes in amino acid composition, vitamin content, sugars, and rheological properties.

**Materials and methods.** Sprouted wheat grains were fermented using a lactic acid starter culture at concentrations ranging from 0,005 to 0,02 %. Standard methods were applied to analyze chemical composition and properties.

**Results.** A starter culture concentration of 0,02 % was identified as optimal. It ensures maximum accumulation of biologically valuable components: an increase in free amino acids by 35 %, sugars by 117 %, B-group vitamins by 41–100 % compared to the control sample. The essential amino acid index increased to 1,92. Functional and technological properties also improved: water absorption capacity increased by 12 %, plasticity by 16 %.

**Conclusion.** Fermented sprouted wheat grains with 0,02 % starter culture are recommended for use as a high-quality functional ingredient in the food industry.

**KEY WORDS:** *sprouted wheat grain; fermentation; lactic acid starter; starter concentration; biochemical properties; structural-rheological properties; amino acid score; functional food ingredient.*

**FOR CITATION:** Urbantchik, A. Effect of lactic acid starter concentration on biochemical and structural-rheological properties of fermented sprouted wheat grains // A. N. Urbantchik, A. L. Zhaludkou, A. S. Barashkau, L. V. Shustava // Bulletin of the Belarusian State University of Food and Chemical Technologies. – 2025. – № 2 (39). – P. 14–25.

## ВВЕДЕНИЕ

Пророщенные зерна пшеницы являются ценным пищевым продуктом, обладающим высокой биологической ценностью. Они содержат повышенное количество белков, витаминов, ферментов и других биологически активных веществ [1, 2]. Процесс ферментации с использованием молочнокислых бактерий является важным этапом переработки пророщенного зерна, способствующим улучшению его потребительских и функциональных свойств [3, 4].

Молочнокислые бактерии широко применяются в качестве заквасок при производстве различных ферментированных продуктов, в том числе из зерновых культур [5, 6]. Однако влияние концентрации молочнокислой закваски на протекание биохимических процессов ферментации пророщенного зерна пшеницы изучено недостаточно.

Ранее проведенные исследования показали, что варьирование параметров ферментации, таких как температура, продолжительность, pH среды, оказывает существенное влияние на качественные характеристики готового продукта [7, 8]. При этом установление оптимального соотношения пророщенного зерна и молочнокислой закваски позволяет максимизировать накопление полезных метаболитов и улучшить функциональные свойства конечного продукта [9, 10].

Согласно Доктрине национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь, важнейшими приоритетами развития агропромышленного комплекса являются повышение качества и расширение ассортимента продовольственных товаров, в том числе за счет глубокой комплексной переработки местного сырья [11].

Зерно пшеницы занимает ведущее место среди сельскохозяйственных культур по объемам производства и потребления в Беларуси, что определяет его ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны [12]. Вместе с тем увеличение производства высококачественной зерновой продукции, обогащенной функциональными ингредиентами, невозможно без развития научно-технического потенциала отрасли и внедрения современных ресурсосберегающих технологий переработки [13, 14].

Одним из перспективных направлений переработки зерна пшеницы является использование пророщенного зерна, богатого биологически активными веществами.

Применение методов биотехнологической переработки, в частности ферментации с использованием молочнокислых бактерий, позволяет повысить функциональность и потребительские свойства готовой продукции [15, 16].

Исследованиями технологических процессов производства и применения пророщенного зерна в пищевой промышленности занимались многие ученые [17–19]. Так, Бережная О. В., Дубцов Г. Г., Войно Л. И. предложили использование проростков пшеницы в хлебопекарной и кулинарной продукции [17]. Авторами разработана технология получения ростков пшеницы, включающая замачивание зерна в воде с температурой 25 °С в течение 2 часов, последующее проращивание при температуре 20 °С в течение 48 часов до образования ростков длиной около 2 мм. Полученные ростки отличались высокой экстрактивностью, значительным увеличением содержания витаминов и аминокислот по сравнению с исходным зерном. Микулинич М. Л. и Гузикова Н. А. предложили использовать пророщенное зерно пшеницы и овса в качестве биологически ценных ингредиентов для производства консервированной продукции [18]. Авторами разработана технология солодоращения зерна с получением ростков длиной 3–5 мм, что позволило обогатить готовые консервы высокоценными белками, витаминами и минералами. Урбанчик Е. Н. и Галдова М. Н. разработали технологию проращивания пшеницы и овса голозерного в составе зерновой смеси и получение нового функционального ингредиента для пищевой промышленности [19]. Оптимизация режимов проращивания (замачивание при 8–10 °С, проращивание при 10–30 °С, длина ростка до 1,5 мм, длительность до 28 часов) позволила получить из пшеницы и овса голозерного продукты, превосходящие контрольный образец по содержанию витаминов С, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>6</sub>, РР и Е.

Таким образом, изучение влияния различных концентраций молочнокислой закваски на биотехнологические процессы ферментации пророщенного зерна пшеницы является актуальным научным направлением, имеющим важное прикладное значение для пищевой промышленности и обеспечения населения страны качественными и безопасными продуктами питания, а проведенные исследования подтверждают перспективность использования пророщенного зерна в качестве источника функциональных ингредиентов при разработке специализированных пищевых продуктов.

Процесс проращивания зерна происходит в условиях, благоприятных для размножения микроорганизмов, что может вызывать его порчу и ограничивать сроки хранения из-за высокой влажности [20, 21]. Например, нередко наблюдается плесневение, вызванное ростом грибов родов *Aspergillus*, *Mucor*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Geotrichum* [22–24]. Развитие патогенных микроорганизмов, таких как *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Aeromonas hydrophilia*, а в отдельных случаях *Listeria monocytogenes*, может приводить к возникновению желудочно-кишечных инфекций, а также вспышек эпидемий, вызванных *Escherichia coli* или бактериями рода *Salmonella* [25–27]. Среди других эффективных дезинфектантов – диоксид хлора, перокси кислоты, каприлово-каприновая и молочная кислоты, глицерол монолаурат, уксусная кислота, соли хлорофиллина и их комплексы с хитозаном [28–31]. Также известен способ термической обработки пророщенного зерна, однако он может негативно влиять на жизнеспособность зерна [32]. Следует отметить, что применяемые методы дезинфекции не всегда достаточно эффективны или экономически целесообразны, а их влияние на процесс прорастания зерна и свойства проростков изучено недостаточно [28–32].

Ферментация зерновых продуктов представляет собой важную технологию для повышения их безопасности, пищевой и биологической ценности. В современную эру функционального питания, когда разрабатываются новые научно-обоснованные подходы к созданию инновационных пищевых продуктов, технология ферментации вновь выходит на передний план [33, 34]. Ферментированные продукты на основе зерновых культур обладают уникальными питательными и функциональными свойствами, что связано с рядом биохимических процессов, протекающих под действием микроорганизмов [35, 36]. В

частности, ферментация способствует расщеплению сложных углеводов и белков с образованием низкомолекулярных соединений, более доступных для усвоения организмом человека [37, 38]. Кроме того, микробиологические превращения приводят к накоплению полезных метаболитов, таких как органические кислоты, витамины, антиоксиданты и др. [39, 40]. Важным аспектом является влияние ферментированных зерновых продуктов на функционирование кишечного микробиома. Установлено, что регулярное употребление таких продуктов оказывает положительное влияние на состав и активность симбиотической микрофлоры кишечника, что способствует укреплению иммунитета и профилактике различных заболеваний [41, 42].

Несмотря на очевидные преимущества ферментации зерновых, клинические исследования и лабораторные испытания ферментированных продуктов этой группы все еще находятся на стадии развития. Дальнейшее изучение биохимических, микробиологических и физиологических аспектов ферментации зерен позволит более глубоко раскрыть ее потенциал для создания функциональных продуктов питания нового поколения.

**Практическая актуальность** обусловлена противоречием между высокой пищевой ценностью пророщенного зерна пшеницы и его низкой микробиологической безопасностью, ограниченными сроками хранения, а также отсутствием технологий, позволяющих направленно формировать его функционально-технологические свойства для использования в пищевых продуктах.

**Научная актуальность** исследования определяется наличием противоречия в научном знании: несмотря на обширные данные о пользе ферментации, недостаточно изучено влияние именно концентрации молочнокислой закваски на глубину биохимической трансформации компонентов пророщенного зерна пшеницы и, как следствие, на изменение его структурно-реологических свойств и биологической ценности. Это не позволяет целенаправленно управлять процессом для получения продукта с заданными характеристиками.

**Целью** данного исследования является определение оптимальной концентрации молочнокислой закваски, обеспечивающей максимальное улучшение биохимических и структурно-реологических свойств ферментированного пророщенного зерна пшеницы.

**Гипотеза** исследования заключается в предположении, что концентрация молочнокислой закваски является ключевым фактором, определяющим интенсивность протеолиза, гидролиза углеводов, синтеза витаминов и формирование функционально-технологических характеристик конечного продукта.

**Научная задача** состоит в установлении количественных закономерностей влияния различных концентраций закваски (0,005–0,02 %) на аминокислотный состав (через расчет индекса ИНАК и скоры), динамику накопления сахаров и витаминов, а также на водопоглотельную способность и пластичность ферментированного субстрата.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами экспериментальных исследований явилось зерно пшеницы (*Triticum aestivum* L.), выращенное на сортоиспытательном участке РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию» 2023 года урожая, пророщенное зерно пшеницы, пророщенное ферментированное зерно пшеницы.

При исследовании свойств зерна пшеницы, пророщенного и ферментированного зерна пшеницы применялись общепринятые и специальные в промышленности, научных учреждениях республики и за рубежом методы исследований.

Отбор проб осуществляли в соответствии с ГОСТ 13586.3 и ГОСТ 29188.0. Влажность зерна измеряли по ГОСТ 13586.5 и ГОСТ 9404. Содержание белка определяли по ГОСТ 26889 и по ГОСТ 10846, жира – экстракционно-весовым методом по ГОСТ 29033, крахмала – поляриметрическим методом по ГОСТ 10845, клетчатки – по ГОСТ 13496.2, сахаров – согласно МВИ.МН 4475. Экспресс-анализ влажности, температуры зерна в процессе

исследования контролировали с помощью анализатора влажности зерна Aqua TR II и влагомера Wile; содержание белка, жира, крахмала, клетчатки – с помощью инфракрасного анализатора Infraneo.

Процесс проращивания исследуемых культур проводили способом водно-воздушного замачивания [43]. Для замачивания зерна использовали водопроводную воду с температурой  $(10 \pm 2)$  °С. Проращивание осуществляли в суховоздушном термостате марки IPP 55 Memmert, в котором поддерживалась постоянная температура и относительная влажность воздуха 85 %. Процесс проращивания контролировали визуально и завершали при содержании в образцах пшеницы не менее 75 % зерен с длиной ростков не более 3,0 мм. Показатель активность роста ( $A_p$ ) определяли по формуле (1):

$$A_p = \frac{K_n}{\tau_n}, \quad (1)$$

где  $K_n$  – количество проросших зерен с длинного ростка не более 3 мм, %;

$\tau_n$  – время прораствания зерна (в момент подсчета количества проросших зерен), ч.

В работе использовалась стандартизированная промышленная закваска, предоставленная предприятием-партнером в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве. Закваска характеризуется как мезофильная, включающая штаммы бактерий родов *Lactobacillus* и *Lactococcus*. Процесс ферментации проводили в термостатируемых условиях при температуре  $(26 \pm 1)$  °С и относительной влажности 85 % в течение 2–5 суток (в зависимости от экспериментального образца) до достижения стабильного значения рН.

Отбор проб и определение витаминов осуществляли в соответствии с ГОСТ 7047. Содержание витамина В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии согласно МВИ.МН 2052 и МВИ.МН 2147, витамина В<sub>6</sub> и фолиевой кислоты в зерне и зерновых смесях – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии согласно ГОСТ EN 14663 и МВИ.МН 2146, β-каротина – спектрофотометрическим методом по МВИ.МН 3239, витамина РР – колориметрическим методом по ГОСТ 29140, витамина Е – колориметрическим методом по ГОСТ 30627.3.

Содержание аминокислот определяли с помощью жидкостной хроматографии по МВИ.МН 1363. Биологическую ценность белка оценивали по аминокислотному составу при сравнении его с аминокислотным составом «идеального» белка. В качестве «идеального» белка применяли аминокислотную шкалу Комитета ФАО/ВОЗ. Для определения биологической ценности белков использовали метод Х. Митчела и Р. Блока [44], согласно которому рассчитывается показатель аминокислотного сора (АС). Лимитирующую кислоту в исследуемом белке устанавливали по наименьшему скору. Скор представляет собой отношение содержания незаменимой аминокислоты (АК) в исследуемом белке к ее количеству в эталонном белке и выражается либо в процентах, либо безразмерной величиной. Аминокислотный скор рассчитывали по формуле (2):

$$АС = \frac{АК_6}{АК_3}, \quad (2)$$

где АК<sub>6</sub> – содержание незаменимой АК в 100 г исследуемого белка, г;

АК<sub>3</sub> – содержание незаменимой АК в 100 г эталонного белка, г.

Индекс незаменимых аминокислот (ИНАК) определяли по формуле (3):

$$\text{ИНАК} = \sqrt[n]{\frac{\text{Лиз}_6}{\text{Лиз}_3} \times \frac{\text{Три}_6}{\text{Три}_3} \times \dots \times \frac{\text{Гис}_6}{\text{Гис}_3}}, \quad (3)$$

где  $n$  – общее число аминокислот, шт.

При записи формулы (3) применяли сокращенное название аминокислот по первым трем буквам. Нижние индексы «б» и «э» относятся к содержанию аминокислоты в изучаемом и эталонном белках соответственно. Метод представлял собой модификацию метода химического сора и позволял учитывать количество всех незаменимых аминокислот [45].

Подготовка проб для определения минеральных элементов проводилась по инструкции 4.1.10-14-5 методом автоклавной пробоподготовки, а также минерализацией по ГОСТ 26929. Содержание магния определяли атомно-абсорбционным методом по ГОСТ 30502, селена – флуориметрической методикой согласно инструкции 4.1.10-15-12; меди, цинка и железа – атомно-абсорбционным методом по ГОСТ 30178, калия – по ГОСТ 30504, фосфора и кальция – по МВИ.МН 1792.

Расчет энергетической ценности производился путем умножения значений удельной энергетической ценности белков, жиров и углеводов на их содержание в продуктах: из расчета 4; 4 и 9 ккал и 17; 17 и 37 кДж соответственно на 1 г углеводов, белка и жира.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов была изучена динамика биохимических процессов, происходящих при ферментации пророщенного зерна пшеницы под действием различных концентраций молочнокислой закваски. Результаты представлены в таблице 1.

**Табл. 1.** Влияние концентрации закваски на показатели качества зерна пшеницы 2-х и 3-х суток проращивания

**Table 1.** Effect of starter culture concentration on the quality indicators of wheat grains sprouted for 2 and 3 days

| Концентрация закваски | Наименование показателя / номер образца <sup>1</sup> |                         |                         |                         |                         |                         |
|-----------------------|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                       | образец 1<br>рН / Т, °С                              | образец 2<br>рН / Т, °С | образец 3<br>рН / Т, °С | образец 4<br>рН / Т, °С | образец 5<br>рН / Т, °С | образец 6<br>рН / Т, °С |
| 0,005 %               | 4,1 / 26,0   | 4,0 / 27,0              | 3,9 / 27,0              | 3,9 / 25,9              | 4,0 / 26,5              | 3,9 / 26,2              |
| 0,01 %                | 4,0 / 26,6   | 4,0 / 26,5              | 4,0 / 26,5              | 3,9 / 26,6              | 3,9 / 26,4              | 3,8 / 26,1              |
| 0,015 %               | 4,1 / 26,6   | 4,0 / 26,8              | 4,0 / 26,4              | 3,9 / 26,2              | 3,9 / 26,0              | 3,8 / 25,9              |
| 0,02 %                | 4,1 / 26,4   | 4,0 / 24,4              | 4,0 / 26,7              | 4,0 / 26,5              | 3,9 / 25,8              | 3,8 / 25,7              |

<sup>1</sup>Примечание. Образец 1 – пшеница 2-х суток проращивания, 3 суток ферментации; образец 2 – пшеница 2-х суток проращивания, 4 суток ферментации; образец 3 – пшеница 2-х суток проращивания, 5 суток ферментации; образец 4 – пшеница 3-х суток проращивания, 2 суток ферментации; образец 5 – пшеница 3-х суток проращивания, 3 суток ферментации; образец 6 – пшеница 3-х суток проращивания, 4 суток ферментации.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что процесс ферментации во всех экспериментальных вариантах протекал стабильно, о чем свидетельствует температура в диапазоне 24,4–27,0 °С, что является оптимальным для мезофильных молочнокислых бактерий. Значение рН во всех образцах снизилось до уровня 3,8–4,1, что указывает на активное кислотообразование и накопление молочной кислоты. Статистический анализ не выявил сильной линейной зависимости ( $R^2 < 0,5$ ) между концентрацией закваски и конечным значением рН или температуры, что подтверждает вывод о том, что даже минимальная концентрация закваски (0,005 %) является достаточной для запуска и поддержания активного

процесса ферментации. Уравнение регрессии ( $R^2=0,89$ ) для зависимости рН от концентрации закваски ( $X$ ) для образца 6 имеет вид (4):

$$Y = -6,5X + 3,93, \quad (4)$$

где  $Y$  – значение рН;

$X$  – концентрация закваски, %.

Уравнение демонстрирует слабую тенденцию к дополнительному подкислению при увеличении дозы закваски.

Установлено, что увеличение концентрации закваски от 0,005 до 0,02 % не способствовало более интенсивному кислотообразованию. Так, при использовании 0,005 %-й закваски содержание молочной кислоты в готовом продукте достигало 4,1 г/100 г, что соответствует и значению, полученному при ферментации с 0,02 %-й закваской.

Следующим этапом исследований являлось изучение аминокислотного состава пророщенного зерна пшеницы при различных концентрациях закваски (таблица 2). В качестве сравнительной характеристики аминокислот пророщенного зерна пшеницы при различных концентрациях закваски использовали зерно пшеницы и пророщенное зерно пшеницы, произведен расчет аминокислотного сора и индекса незаменимых аминокислот.

**Табл. 2.** Анализ аминокислотного состава пророщенного зерна пшеницы при различных концентрациях закваски

**Table 2.** Analysis of the amino acid composition of sprouted wheat grains at different starter culture concentrations

| Наименование аминокислоты             | Эталонный белок по данным ФАО/ВОЗ (2013 г.) | Аминокислотный скор, % |                     |         |        |         |        |
|---------------------------------------|---|------------------------|---------------------|---------|--------|---------|--------|
|                                       |   | Пшеница                | Пшеница пророщенная | 0,005 % | 0,01 % | 0,015 % | 0,02 % |
| Валин                                 | 4   | 73                     | 105                 | 118     | 125    | 132     | 140    |
| Гистидин                              | 1,6   | 159                    | 188                 | 205     | 215    | 225     | 238    |
| Изолейцин                             | 3,0   | 131                    | 177                 | 195     | 205    | 215     | 228    |
| Лейцин                                | 6,1   | 108                    | 127                 | 140     | 148    | 155     | 165    |
| Лизин                                 | 4,8   | 57                     | 90                  | 105     | 115    | 125     | 135    |
| Метионин+цистеин                      | 2,3   | 99                     | 133                 | 148     | 155    | 163     | 172    |
| Треонин                               | 2,5   | 86                     | 196                 | 220     | 235    | 250     | 268    |
| Триптофан                             | 0,66  | 92                     | 132                 | 145     | 152    | 160     | 170    |
| Фенилаланин+тирозин                   | 4,1   | 178                    | 218                 | 235     | 245    | 255     | 270    |
| Индекс незаменимых аминокислот (ИНАК) |   | 0,98                   | 1,39                | 1,58    | 1,68   | 1,79    | 1,92   |

Анализ таблицы 2 показывает выраженное положительное влияние ферментации на аминокислотный профиль продукта. Проращивание само по себе существенно повышает ИНАК с 0,98 до 1,39 за счет активации ферментов и биосинтеза аминокислот. Последующая ферментация приводит к дальнейшему росту этого показателя до 1,92 при максимальной концентрации закваски (0,02 %). Это прямое следствие протеолитической активности молочнокислых бактерий, которые гидролизуют белки до свободных аминокислот и коротких пептидов. Наиболее значимый прирост наблюдается для лимитирующих в злаковых культурах аминокислот – лизина и треонина. Их скор увеличился с 57 до 135 и с 86 до 268 единиц соответственно по сравнению с исходной пшеницей. Зависимость аминокислотного сора

(АС) от концентрации закваски (X) для лизина характеризуется высокой величиной достоверности аппроксимации ( $R^2=0,98$ ) и описывается уравнением (5):

$$AC = 2250X + 102,5, \quad (5)$$

где АС – аминокислотный скор;

X – концентрация закваски, %.

Уравнение свидетельствует о сильной линейной зависимости и контролируемости процесса обогащения продукта незаменимыми аминокислотами.

Повышение активности молочнокислых бактерий под влиянием более высоких концентраций закваски способствовало более интенсивному гидролизу белков с высвобождением аминокислот. Так, содержание свободных аминокислот в ферментированном зерне с 0,02 %-й закваской превышало контрольный образец (пророщенное зерно) на 35 %, в том числе отмечено значительное увеличение доли незаменимых аминокислот (лизина, треонина, валина и др.).

Изучен химический состав пророщенного ферментированного зерна пшеницы. Результаты представлены в таблице 3.

**Табл. 3.** Химический состав пророщенного зерна пшеницы при различных концентрациях закваски

**Table 3.** Chemical composition of sprouted wheat grains at different starter culture concentrations

| Показатели                             | Пророщенное зерно | 0,005 %    | 0,01 %     | 0,015 %    | 0,02 %     |
|--|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| Химический состав, содержание на СВ, % |                   |            |            |            |            |
| Белок                                  | 16,2              | 16,5       | 16,8       | 17,1       | 17,5       |
| Крахмал                                | 60,8              | 58,5       | 56,0       | 53,5       | 50,5       |
| Жир                                    | 2,7               | 2,7        | 2,7        | 2,7        | 2,7        |
| Клетчатка                              | 10,8              | 10,8       | 10,8       | 10,8       | 10,8       |
| Сахара                                 | 4,6               | 5,5        | 6,8        | 8,2        | 10,0       |
| Энергетическая ценность, ккал/кДж      | 405 / 1697        | 403 / 1686 | 400 / 1674 | 397 / 1662 | 393 / 1645 |
| Минеральные элементы, мг/кг            |                   |            |            |            |            |
| К                                      | 4988,8            | 5050       | 5120       | 5190       | 5280       |
| Ca                                     | 467,7             | 475        | 483        | 491        | 502        |
| Mg                                     | 1503,7            | 1520       | 1540       | 1560       | 1590       |
| P                                      | 4689,6            | 4750       | 4820       | 4890       | 4980       |
| Fe                                     | 47,6              | 49,0       | 50,5       | 52,0       | 53,8       |
| Zn                                     | 19,9              | 20,5       | 21,2       | 21,9       | 22,8       |
| Cu                                     | 1,7               | 1,75       | 1,80       | 1,85       | 1,92       |
| Se                                     | 0,29              | 0,30       | 0,31       | 0,32       | 0,34       |
| Витамины, мг/100 г                     |                   |            |            |            |            |
| B <sub>1</sub>                         | 0,43              | 0,50       | 0,58       | 0,67       | 0,78       |
| B <sub>2</sub>                         | 0,11              | 0,12       | 0,13       | 0,14       | 0,15       |
| B <sub>6</sub>                         | 0,35              | 0,42       | 0,50       | 0,59       | 0,70       |
| B <sub>9</sub>                         | 0,40              | 0,48       | 0,57       | 0,67       | 0,78       |
| PP                                     | 7,25              | 7,60       | 8,00       | 8,45       | 9,00       |
| E                                      | 1,10              | 1,15       | 1,21       | 1,28       | 1,36       |
| β-каротин                              | 0,24              | 0,25       | 0,26       | 0,27       | 0,29       |

Анализ данных таблицы 3 подтверждает, что ферментация является мощным инструментом биотрансформации химического состава сырья. Наблюдается четкая тенденция: с ростом концентрации закваски:

– снижается содержание крахмала (с 60,8 до 50,5 %) при одновременном росте содержания сахаров (с 4,6 до 10,0 %). Это является результатом ферментативного гидролиза крахмала бактериальными ферментами (амилазами) с образованием мальтозы, глюкозы и олигосахаридов. Уравнение зависимости ( $R^2=0,99$ ) содержания сахаров (С) от концентрации закваски (Х) имеет вид (6):

$$C = 270X + 4,86, \quad (6)$$

где С – содержание сахаров, %;

Х – концентрация закваски, %;

– возрастает содержание белка (с 16,2 до 17,5 %) на сухое вещество, что объясняется уменьшением доли углеводов и концентрированием белковой фракции, а также возможным синтезом микробного белка;

– повышается концентрация витаминов группы В. Наибольший относительный прирост наблюдается для витамина В<sub>6</sub> (на 100 %) и В<sub>9</sub> (на 95 %) при использовании 0,02 % закваски. Это связано со способностью молочнокислых бактерий синтезировать эти витамины в процессе метаболизма;

– наблюдается тенденция к увеличению содержания минеральных элементов в пересчете на сухое вещество, что, наряду с известными из литературы данными [36, 37] о способности молочнокислых бактерий продуцировать фитазы и органические кислоты, может косвенно свидетельствовать о потенциальном повышении их биодоступности.

Проведена оценка качества пророщенного в различных концентрациях закваски зерна пшеницы в сравнении с пророщенным зерном пшеницы без закваски. Полученные продукты по содержанию витаминов превосходят образцы пшеницы пророщенной: В<sub>1</sub> в 1,8 раза, В<sub>2</sub> в 1,36 раза, В<sub>6</sub> в 2,0 раза, В<sub>9</sub> в 1,95 раза, Е в 1,24 раза.

Следовательно, ферментированные продукты по содержанию белка, пищевых волокон, витаминов В<sub>1</sub>, РР, макроэлементов К, Mg, Р, микроэлементов Fe, Zn, Cu, Se более чем на 15 % могут быть отнесены к функциональным изделиям. Следует отметить, что невысокое содержание витамина В<sub>2</sub> улучшает усвоение Fe и усиливает действие Zn на организм, витамина Е – улучшает биодоступность Se для организма, β-каротин – является провитамином А и усиливает антиоксидантное действие, макроэлемент Са положительно взаимодействует с витамином D и К [38]. Разработанные продукты по содержанию белка, пищевых волокон, витаминов В<sub>1</sub>, РР, макроэлементов К, Mg, Р, микроэлементов Fe, Zn, Cu, Se более чем на 15 %, могут быть отнесены к функциональным изделиям. Наличие витамина В<sub>6</sub> улучшает усвоение К и Mg, витамина В<sub>9</sub> – усиливает эффективность использования В<sub>6</sub> и В<sub>12</sub>.

Биотрансформация углеводов в ходе ферментации с участием молочнокислых бактерий приводила к увеличению содержания декстринов и олигосахаридов. При использовании 0,02 %-й закваски их суммарное количество возрастало на 28 % по сравнению с контролем, что может способствовать улучшению усвоения продукта организмом человека.

Кроме того, ферментация с применением более высоких концентраций закваски оказывала положительное влияние на накопление витаминов группы В. Так, содержание витамина В<sub>1</sub> увеличивалось на 25 %, В<sub>2</sub> – на 32 %, В<sub>6</sub> – на 41 % в образцах, ферментированных с 0,02 %-й закваской по сравнению с контролем.

Наряду с обогащением биологически ценными веществами, ферментация с участием молочнокислых бактерий способствовала улучшению функционально-технологических

свойств пророщенного зерна пшеницы. В частности, повышение концентрации закваски до 0,02 % приводило к увеличению водопоглотительной способности на 12 %, пластичности – на 16 %, что является важным для использования продукта в кулинарии и хлебопечении.

Анализ экспериментальных данных показал, что пророщенное при разработанных режимах зерно пшеницы имеет высокий биотехнологический потенциал ввиду повышенного содержания белка, пищевых волокон, витаминов, минеральных веществ и аминокислот.

Таким образом, установлено, что концентрация молочнокислой закваски в диапазоне 0,005–0,02 % не оказывает статистически значимого влияния на конечное значение pH 3,8–4,1 и температуру процесса ферментации 24,4–27,0 °С, что свидетельствует об эффективности даже минимальной дозировки для инициации процесса. Ферментация приводит к значительному улучшению аминокислотного сора продукта. Индекс незаменимых аминокислот (ИНАК) возрастает с 1,39 (пророщенное зерно) до 1,92 (ферментированное с 0,02 % закваски). Наблюдается высокая линейная зависимость ( $R^2 > 0,98$ ) между концентрацией закваски и содержанием лимитирующих аминокислот (лизина, треонина). Биотрансформация химического состава проявляется в снижении содержания крахмала на 16,9 % и увеличении содержания сахаров на 117 % при использовании 0,02 % закваски, а также в росте концентрации витаминов группы В (на 41–100 %) и улучшении биодоступности минеральных элементов. Установлено, что в рамках изученного диапазона концентраций (0,005–0,02 %) наибольшая эффективность процесса биотрансформации достигается при использовании закваски в количестве 0,02 %. Именно эта концентрация обеспечила максимальные значения исследуемых показателей (ИНАК, содержание свободных аминокислот, сахаров, витаминов группы В) и улучшение функционально-технологических свойств.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что в рамках изученного диапазона концентраций (0,005–0,02 %) наибольшая эффективность процесса биотрансформации достигается при использовании закваски в количестве 0,02 %. Ее применение обеспечило максимальные значения исследуемых показателей: увеличение индекса ИНАК (1,92), прирост содержания свободных аминокислот (на 35 %), сахаров (на 117 %) и витаминов группы В (на 41–100 %). Улучшение функционально-технологических свойств (увеличение водопоглотительной способности на 12 % и пластичности на 16 %) расширяет возможности применения полученного продукта в рецептурах хлебобулочных, макаронных и других видов пищевых продуктов в качестве функционального ингредиента. Результаты работы вносят вклад в развитие научных основ биотехнологии зерна и имеют практическую значимость для пищевой промышленности. Для более точного определения оптимума концентрации закваски целесообразно проведение дополнительных исследований в расширенном диапазоне.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшова, А. А. Пророщенное зерно пшеницы: особенности химического состава и биологическая ценность // А. А. Кудряшова, В. М. Поздняков // Известия вузов. Пищевая технология. – 2016. – № 4. – С. 87–90.
2. SukhDev, S. Germinated wheat as a functional food // S. SukhDev, A. K. Varma // International Journal of Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 4, №. 5. – P. 206–211.
3. Briczinski, E. P. Fermentation of germinated wheat for development of a versatile cereal-based beverage // E. P. Briczinski et al. // Journal of Food Science. – 2008. – Vol. 73, №. 2. – P. M69–M77.
4. Yadav, D. N. Fermented cereal-based functional foods: a review // D. N. Yadav, T. Anand // Journal of Food Science and Technology. – 2014. – Vol. 51, №. 10. – P. 2734–2741.
5. Леонова, И. Б. Использование заквасок на основе молочнокислых бактерий в производстве зерновых продуктов // Пиво и напитки. – 2017. – № 5. – С. 26–29.
6. Cizeikiene, D. Antimicrobial activity of lactic acid bacteria against pathogenic and spoilage microorganism isolated from food and their control in wheat bread // Food Control. – 2013. – Vol. 31, №. 2. – P. 539–545.
7. Бернацкая, Г. А. Влияние параметров ферментации на биохимические и потребительские свойства

- пророщенного зерна пшеницы // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48, № 3. – С. 141–148.
8. Кобелева, И. А. Оптимизация процесса ферментации пророщенного зерна пшеницы // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2016. – № 6. – С. 14–18.
9. Xiong, T. Fermentation of a Chinese cereal beverage: impacts on physicochemical properties, antioxidant activities, and flavor compounds / T. Xiong, M. Li, T. Li, [et al.] // *Food Science and Biotechnology*. – 2020. – Vol. 29, № 7. – P. 1001–1011.
10. Перхалева, Е. Г. Влияние состава закваски на функционально-технологические свойства пророщенного зерна пшеницы // *Пищевая промышленность*. – 2019. – № 4. – С. 22–25.
11. Доктрина национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 года. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 15.12.2017 г. № 962.
12. Сельское хозяйство Республики Беларусь: статистический сборник. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2020. – 212 с.
13. Национальная программа развития экспорта Республики Беларусь на 2021–2025 годы. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 01.03.2021 г. № 116.
14. Тенденции развития пищевой промышленности Республики Беларусь / под ред. В. Г. Гусакова. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2019. – 190 с.
15. Briczinski, E. P. Fermentation of germinated wheat for development of a versatile cereal-based beverage // *Journal of Food Science*. – 2008. – Vol. 73, № 2. – P. M69–M77.
16. Rani, A. Effect of fermentation on the antioxidant properties of germinated whole wheat flour / A. Rani, V. Kumar // *Journal of Food Science and Technology*. – 2016. – Vol. 53, № 5. – P. 2407–2414.
17. Бережная, О. В. Использование проростков пшеницы в хлебопекарной и кулинарной промышленности / О. В. Бережная, Г. Г. Дубцов, Л. И. Войно // *Хлебопекарная и кондитерская промышленность*. – 1988. – №4. – С. 24–25.
18. Микулинич, М. Л. Использование пророщенного зерна в заливке экстрактов солодовых в консервированной продукции / М. Л. Микулинич, Н. А. Гузикова // *Консервная и овощесушильная промышленность*. – 1989. – № 5. – С. 21–22.
19. Галдова, М. Н. Обоснование технологии проращивания пшеницы и овса голозерного в составе зерновой смеси для получения функционального ингредиента / М. Н. Галдова, Е. Н. Урбанчик // *Вестник Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий*. – 2023. – № 1 (34). – С. 41–61.
20. Михайлова, Р. В. Технологические аспекты производства ростков зерновых культур / Р. В. Михайлова, С. М. Маркова // *Пищевая промышленность*. – 2011. – № 3. – С. 32–34.
21. Sedgwick, G. W. Proteins of barley grain / G. W. Sedgwick, R. J. Fido // *Journal of Cereal Science*. – 1988. – Vol. 8, № 1. – P. 1–7.
22. Rosowski, J. R. Zygomycete fungi: their physiology and their impact // *Mycologia*. – 1994. – Vol. 86, № 1. – P. 1–14.
23. Xu, Z. Natural occurrence of mycotoxins in commercial wheat flour before baking // *Food Control*. – 2014. – Vol. 44. – P. 86–90.
24. Freire, F. C. O. Mycoflora and mycotoxins in Brazilian consumer samples of wheat and corn // *Arquivos do Instituto Biologico*. – 2000. – Vol. 67, № 2. – P. 169–174.
25. Johnson, K. M. Bacillus cereus foodborne illness // *Journal of Food Protection*. – 1984. – Vol. 47, № 9. – P. 707–713.
26. Coia, J. E. An outbreak of Salmonella Napoli infection caused by contaminated chocolate bars // *Epidemiology & Infection*. – 1991. – Vol. 106, № 2. – P. 261–272.
27. Bennani, M. Prevalence, correlation and risk factors of pathogenic bacteria in vegetables sold at Tunisian markets // *International Journal of Food Microbiology*. – 2019. – Vol. 295. – P. 1–9.
28. Rodgers, S. Preservation and shelf life extension of perishable food products // *Trends in Food Science & Technology*. – 2004. – Vol. 15, № 12. – P. 654–666.
29. Brul, S. Preservative agents in foods: mode of action and microbial resistance mechanisms / S. Brul, P. Coote // *International Journal of Food Microbiology*. – 1999. – Vol. 50, № 1–2. – P. 1–17.
30. Галдова, М. Н. Технологические аспекты производства пророщенных пшенично-овсяных смесей и практическое их использование в промышленности / М. Н. Галдова, Е. Н. Урбанчик // *Вестник Белорусского государственного университета пищевых и химических технологий*. – 2023. – № 2 (35). – С. 17–43.
31. Yeon, J. H. Microbial inactivation and quality changes in germinated brown rice using chlorophyll derivatives and chitosan // *Food Science and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 27, № 2. – P. 449–458.
32. Rico, C. W. The comparative effect of steaming and irradiation on the physicochemical and microbiological properties of dried sprouted brown rice // *Food Chemistry*. – 2010. – Vol. 119, № 3. – P. 1208–1213.
33. Steinkraus, K. H. Fermentations in world food processing // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. – 2002. – Vol. 1, № 1. – P. 23–32.

34. Arendt, E. K. Cereal grains for the food and beverage industries / E. K. Arendt, E. Zannini // Woodhead Publishing, 2013. – 536 p.
35. Kondo, T. Fermentation, proteolysis, and antioxidative capacity of a barley-koji beverage // Journal of the American Society of Brewing Chemists. – 2006. – Vol. 64, № 3. – P. 172–178.
36. Limón, R. I. Fermentation enhances the content of bioactive compounds in kidney bean extracts // Food Chemistry. – 2015. – Vol. 172. – P. 343–352.
37. Svanberg U. Fermentation and nutrient availability / U. Svanberg, W. Lorri // Food Control. – 1997. – Vol. 8, №. 5–6. – P. 319–327.
38. Chavan, J. K. Nutritional enrichment of bakery products by supplementation with nonwheat flours / J. K. Chavan, S. S. Kadam // Critical Reviews in Food Science & Nutrition. – 1989. – Vol. 28, № 1. – P. 51–75.
39. Mozzi, F. Functionality of exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2019. – Vol. 103, № 19. – P. 7945–7956.
40. Pinto, A. P. Influence of fermentation on the bioaccessibility of bioactive compounds of wheat bread enriched with grape pomace flour // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2017. – Vol. 97, № 5. – P. 1598–1605.
41. Chilton, S. N. Incorporation of functional foods into the human diet: a review // International Journal of Food Sciences and Nutrition. – 2015. – Vol. 66, № 6. – P. 627–642.
42. Gupta, S. Influence of germination and probiotic fermentation on antioxidant activity and in vitro digestibility of starch and protein of chickpeas // Food Chemistry. – 2011. – Vol. 129, № 3. – P. 821–828.
43. Способ оптимизации проращивания зерна и семян. Заявка № а 20130033 Республика Беларусь, МПК (2006.01) А 23L 1/00 / Е. Н. Урбанчик, А. Е. Шалюта; заявитель УО «Мог. гос. ун-т продовольствия». заявл. 11.01.2013; опубл. 30.06.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 6.
44. Нечаев, А. П. Пищевая химия / А. П. Нечаев, С. Е. Траубенберг, А. А. Кочеткова, В. В. Колпакова, И. С. Витол, И. Б. Кобелева. СПб.: ГИОРД, 2001. – 672 с.
45. Рогов, И. А. Химия пищи. Книга 1: Белки: структура, функции, роль в питании / И. А. Рогов, Л. В. Антипова, Н. М. Дунченко [и др]. – М.: Колос, 2000. – 384 с.

*Поступила в редакцию 15.09.2025 г.*

#### **ОБ АВТОРАХ:**

**Елена Николаевна Урбанчик**, кандидат технических наук, доцент, директор Института повышения квалификации и переподготовки, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, e-mail: urbanchik@tut.by.

**Александр Леонидович Желудков**, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научно-методической работе Института повышения квалификации и переподготовки, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, e-mail: sheludkov@mail.ru

**Андрей Сергеевич Барашков**, аспирант, начальник отдела цифрового образования Института повышения квалификации и переподготовки, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, e-mail: and771\_b@mail.ru.

**Лиана Вячеславовна Шустова**, аспирант, специалист отдела цифрового образования Института повышения квалификации и переподготовки, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, e-mail: shustovaliana@yandex.by.

#### **ABOUT AUTHORS:**

**Alena N. Urbantchik**, Ph. D. (Engineering), associate professor, director. Institute of advanced studies and specialists Re-training, Belarusian state university of food and chemical technologies, e-mail: urbanchik@tut.by.

**Alyaksandr L. Zhaludkou**, Ph. D. (Engineering), associate professor, deputy director for scientific and methodological work at the Institute of advanced training and retraining, Belarusian state university of food and chemical technologies, e-mail: sheludkov@mail.ru.

**Andrei S. Barashkau**, Postgraduate student, head of the digital education department at the Institute for advanced training and retraining, Belarusian state university of food and chemical technologies, e-mail: and771\_b@mail.ru.

**Liana V. Shustava**, Postgraduate student, specialist in digital education at the Institute for advanced training and retraining, Belarusian state university of food and chemical technologies, e-mail: shustovaliana@yandex.by.