

УДК 664.641.4

БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ЗАКВАСОК (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Науменко О. В., д.т.н., с.н.с., зав. відділу
технологій хліба та біотрансформації зернових продуктів
<https://orcid.org/0000-0002-1691-1381>

Чиж В. М., аспірантка
<https://orcid.org/0000-0001-9488-4385>
Інститут продовольчих ресурсів НААН, м. Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2022-19-12>

Предмет дослідження. Біотехнологічні властивості мікробіоти хлібопекарської закваски.
Мета. Проаналізувати дані літературних джерел, одержані науковими дослідженнями хлібопекарських мікроорганізмів. **Методи.** Використовували аналітичні Методи. **Результати.** Загально прийняте технічне визначення описує хлібопекарську закваску як суміш борошна та води, що ферментується молочнокислими бактеріями та дріжджами, має здатність до підкислення та розпушування тіста. Зазвичай співвідношення між молочнокислими бактеріями та дріжджами у заквасці становить 100:1. На склад мікробіоти закваски впливає низка внутрішніх і зовнішніх факторів: вид та якість борошна, параметри технологічного процесу (температура, рН, вихід тіста, способи виробництва тощо). Завдяки унікальному мікробному складу та функціональності закваска вважається незамінною для поліпшення сенсорних, реологічних властивостей і подовження термінів зберігання хлібобулочних виробів. Окрім цього чисельними науковими дослідженнями доведено, що застосування хлібопекарської закваски для виробництва хліба збільшує біодоступність мінералів, дозволяє збагатити продукт харчовими волокнами, знижує глікемічний індекс, поліпшує засвоюваність білка та зменшує вміст антихарчових факторів. Критерії відбору штамів для створення хлібопекарської закваски доволі різноманітні, включають технологічні (рівень підкислення тіста, темпи росту, реологічні, сенсорні параметри), біохімічні (синтез легких компонентів, протеоліз, утворення екзополісахаридів) та харчові властивості (протигрибкова, антимікробна активність, біодоступність мінералів, антиоксидантна активність, зниження глікемічного індексу, деградація антихарчових факторів: фітинової кислоти, рафінози). **Сфера застосування результатів.** Використання закваски у технології хліба позитивно впливає на всі аспекти якості продукції, тому дослідження мікробіоти хлібопекарських заквасок, виділення з них активних штамів молочнокислих бактерій та дріжджів є перспективним напрямом у хлібопекарській промисловості.

Ключові слова: закваска, молочнокислі бактерії, дріжджі, мікробіота, біотехнологічні показники, хліб на заквасці

BIOTECHNOLOGICAL INDICATORS OF BAKERY SOURDOUGH STARTERS (LITERATURE REVIEW)

Oksana Naumenko, D-r of Sc., Engineering, Senior Research,
Head of Department of Bread Technologies and Biotransformation of Grain Products,
<http://orcid.org/0000-0002-1691-1381>

Valentina Chizh, Postgraduate
<https://orcid.org/0000-0001-9488-4385>
Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

<https://doi.org/10.31073/foodresources2022-19-12>

Subject of research. The biotechnological properties of the microbiota of baking sourdough.
Purpose. Analyze data from literary sources devoted to the scientific research of baking microorganisms.
Methods. Analytical research methods were used. **Results.** The generally accepted technical definition describes baking sourdough as a mixture of flour and water, fermented by lactic acid bacteria and yeast, having the ability to acidify and loosen the dough. Usually, the ratio between lactic acid bacteria and

yeast in a starter is 100:1. The composition of the sourdough microbiota is influenced by a number of internal and external factors: the type and quality of flour, technological process parameters (temperature, pH, dough yield, production methods, etc.). Due to its unique microbial composition and functionality, sourdough is considered indispensable for improving sensory and rheological properties and extending the shelf life of bakery products. In addition, numerous scientific studies have proven that the use of baker's sourdough for the production of bread increases the bioavailability of minerals, allows you to enrich the product with dietary fibers, lowers the glycemic index, improves the digestibility of protein and reduces the content of anti-nutritional factors. The criteria for selecting strains for the creation of bakery sourdough are quite diverse, including technological (level of acidification of dough, growth rates, rheological, sensory parameters), biochemical (synthesis of volatile components, proteolysis, formation of exopolysaccharides) and nutritional properties (antifungal, antimicrobial activity, bioavailability of minerals, antioxidant activity, lowering the glycemic index, degradation of anti-nutritional factors: phytic acid, raffinose). **Scope of research results.** The use of sourdough in bread technology has a positive effect on all aspects of product quality, therefore the study of the microbiota of baking sourdoughs and the selection of active strains of lactic acid bacteria and yeast from them is a promising direction in the baking industry.

Key words: sourdough, lactic acid bacteria, yeast, microbiota, biotechnological indicators, sourdough bread

Постановка проблеми. Хлібопекарська закваска – одна з найдавніших природних заквасок, яка використовується для приготування випічки, як альтернатива пекарським дріжджам і хімічним закваскам. Єгипет, ймовірно, є батьківщиною хліба на заквасці [1]. У більшій частині наукових досліджень наводиться характеристика солоної продукції (хліб і замінники), решта – описує солодку випічку або обидві категорії. Італія – провідна країна, де використовують понад 30 традиційних різновидів солоної та солодкої закваски. В наукових оглядах [2, 3] показано відмітні складові та функціональні особливості заквасок, які використовуються для виготовлення 19 видів хліба та 18 солодких хлібобулочних виробів. Майже той самий підхід вирізняв закваски, які використовуються для виробництва традиційного французького хліба (багетів), булочок [4]. Ученими з Німеччини, Бельгії, Скандинавії та Балтійського регіону досліджено технології «класичного» житнього хліба на заквасці [5]. В азіатських країнах були досліджені хлібобулочні вироби на заквасках, такі як: іранський барбарі, китайський паровий та індійський хліб на заквасці Bhatura [6]. В Африці одними з найпопулярніших були єгипетська баладі, суданська кісра та ефіопська інджера [7]. Основними продуктами на заквасці в Південній Америці були мексиканські коржі, тоді як промислове виробництво хліба на заквасці, булочки, крекери та печиво викликали інтерес у Сполучених Штатах. Майже всі науковці світу зробили висновок про унікальність мікробного складу та функціональності закваски для кожної випічки.

На сьогодні хлібобулочні вироби і, зокрема, хліб на заквасці є основними харчовими продуктами на планеті. ЮНЕСКО включило хліб до переліку нематеріальної спадщини людства. Незважаючи на таку історичну простежуваність і центральну роль випічки на заквасці майже в усіх харчових традиціях і звичках, бродіння на заквасці привернуло увагу науковців не більше 30 років тому. Перший опис *Lactobacillus sanfranciscensis* з'явився в 1971 році [8]. Приблизно з 1990 року почалася систематична дослідницька діяльність, спрямована на те, щоб детальніше з'ясувати потенціал ферментації за допомогою закваски, її вплив на смак, реологію та термін зберігання (до прикладу, затримка черствіння, запобігання псуванню), а також на взаємодію мікроорганізмів у такій складній екосистемі. Спонтанна мікробіота, тип борошна, додаткові сировинні інгредієнти та вода були основними мікробними джерелами та/або стимулами для визначення потенціалу натуральної закваски вітчизняними вченими [9, 10]. Зовсім недавно фокус перемістився на харчові переваги, які пропонує хлібопекарська закваска відносно до інших розпушувачів. Досліджено конкретні аспекти щодо технологічних та харчових питань, які однозначно підтверджують вагомий потенціал закваски [11, 12].

Мета. Виконати аналітичний огляд наукової літератури щодо деяких біотехнологічних властивостей заквасок у технології хліба та хлібобулочних виробів.

Результати та їх обговорення. Закваска вважається незамінною для поліпшення сенсорних, реологічних властивостей і термінів зберігання хлібобулочних виробів завдяки унікальному мікробному складу та функціональності. На сьогодні низкою наукових досліджень доведено, що застосування хлібопекарської закваски збільшує біодоступність мінералів, дозволяє збагатити продукт харчовими волокнами, знижує глікемічний індекс, поліпшує засвоюваність білка та зменшує вміст антихарчових факторів. Широко прийняте технічне визначення описує закваску як суміш борошна і води, що спонтанно ферментується молочнокислими бактеріями (МКБ) і дріжджами, має здатність до підкислення та розпушування [1].

Умови розведення заквасок. Використання зрілої закваски після приготування залежить від традицій та типу випічки. Науково прийнята класифікація поділяє закваски на три типи. Тип I характеризується майже щоденною підкормкою для підтримування мікроорганізмів в активному метаболічному стані; II тип – розмноження ведеться за відносно високих температур ($>30^{\circ}\text{C}$) і тривалому часі бродіння (до 5 діб), в основному використовується як підкислювач і носій аромату; і тип III, що відповідає висушеній заквасці, яка використовується як ароматизатор [12]. Більшість статей присвячені дослідженню закваски I типу, хоча два інших типи нещодавно також набули промислової актуальності.

До отримання зрілої закваски перед випіканням може пройти певна кількість (до 10) підкормок, але найпоширенішою практикою є одно-двоетапний процес. Середній час, що використовується для бродіння закваски становить 4 год, з екстремальними значеннями (1–8) год, що відповідає змішаному використанню з пекарськими дріжджами або давнім традиційним протоколам виготовлення конкретних хлібобулочних виробів. Зазвичай час бродіння закваски встановлюється за умови досягнення відповідного підкислення та кількості клітин МКБ і дріжджів. Для побічних продуктів агропродовольчого виробництва (до прикладу, зародків пшениці, відходів пивоваріння) необхідний триваліший час ферментації заквасок (до 24 год), щоб зробити їх придатними, як інгредієнти для приготування хліба [13]. Найпоширеніша температура, що використовується для ферментації закваски, становить 30°C , з варіаціями в діапазоні від 22 до 40°C , що, безсумнівно, впливає на загальні біохімічні та сенсорні характеристики. Відсоток посіву закваски здебільшого коливається від 10 до 25%, інколи – менше 5 або більше до 50%. Середнє значення дози внесення закваски становить 20% [14].

Доведено, що відсоток посівного матеріалу в заквасці впливає не тільки на швидкість бродіння, а й на синтез екзополісахаридів (ЕПС) [15], вміст вітамінів [16] і реологічні властивості [17]. Незалежно від використовуваного протоколу, середня кількість клітин після ферментації закваски становить 8,5 і 6,5 $\log$ КУО/г для МКБ і дріжджів, відповідно. Ці значення дозволяють оцінити співвідношення між ними, як 100:1. Для деяких заквасок воно зростає до 10:1. Ці два співвідношення знаходяться в основі оптимальної продуктивності закваски, якщо вміст клітин МКБ і дріжджів не нижче 8,0 і 6,0 $\log$ КУО/г, відповідно. У виняткових випадках МКБ можна виявити у кількості нижче 3,0 $\log$ КУО/г або вище 9,0 $\log$ КУО/г (у разі використання комерційних висушених заквасок [18] або заквасок (стартерів), які безпосередньо додаються в тісто) [19]. Якщо кількість дріжджів була менше 5,0 $\log$ КУО/г – сила розпушування погіршувалась. Залежно від типу процесу та продуктів закваски можуть використовуватися у різних формах: як густих, так і напіврідких. Більша частина густих заквасок має вихід тіста (ВТ) 150-160, тоді як напіврідкі – в інтервалі 200-300. Як виняток, ВТ 500 використовувався, щоб зробити борошно з твердих сортів пшениці безглютеновим обробкою сумішшю відібраних МКБ та грибкових протеаз [20].

Мікробіологічні та біохімічні характеристики заквасок. Головний секрет продуктивності закваски полягає в її мікробному різноманітті, проте інколи закваска може містити лише кілька видів. У більшості випадків цю екосистему колонізували складні мікробні консорціуми. У заквасках було виявлено близько 59 родів бактерій: з них 10 належали до МКБ та 49 – до інших бактерій. Більшість цих інших бактерій поводяться в спільноті як члени-супутники (субдомінантні популяції), їх екофізіологічну роль варто вивчити ретельніше. Рід *Lactobacillus* найпоширеніший у хлібопекарських заквасках. У більше ніж 15 світових заквасках було ідентифіковано 16 видів МКБ, із них види *Lactobacillus plantarum*, *L. brevis*, *L. sanfranciscensis* і *L. fermentum* зустрічались найчастіше [21].

У заквасках також було ідентифіковано майже 80 видів дріжджів. Вони належали до родів *Saccharomyces*, *Candida*, *Kazachstania*, *Torulopsis*, *Yarrowia* та *Pichia*. Стійкі асоціації з МКБ для виготовлення солодких хлібобулочних виробів включали дріжджі видів *Kazachstania exigua* або *Kazachstania humilis*, та найчастіше ідентифікували вид *Saccharomyces cerevisiae* [1].

Конкурентні види *Lactobacillus*, які вже присутні в житньому борошні (до прикладу, *L. sanfranciscensis* і *L. fermentum*), ставали домінуючими під час ферментації закваски [22]. Автохтонні *Enterococcus faecium* та *Pediococcus pentosaceus* з твердої пшениці швидко підкислювали тісто, перетворюючи екосистему на придатну для дозрівання закваски за допомогою інших видів лактобацил [23]. Змінна мікробна динаміка кількох заквасок із спелити відображала автохтонну мікробіоту борошна, яка, у свою чергу, залежала від походження борошна, методів вирощування та умов зберігання [24]. Оцінка мікробіологічного профілю зерен пшениці після збору врожаю та під час зберігання показала, що *E. faecium*, *E. durans*, *L. brevis*, *L. pentosus* та *L. paracasei* продемонстрували високу здатність долати ці стресові умови [25].

Для встановлення ефективності закваски використовують відносно прості для визначення біохімічні параметри. Показано, що середнє значення рН закваски становить 4,1; з найбільш поширеним діапазоном від 3,4 до 4,9 од. рН. Надзвичайно низькі значення рН ($\leq 3,0$) виявлено лише для окремих інгредієнтів (до прикладу, відпрацьованих зерен пивоваріння) та за тривалої ферментації (48 год). У поєднанні з наведеними вище значеннями рН найбільш поширений інтервал для загальної титрованої кислотності (ТК) становить (4,0-25,0) см³ 0,1 М NaOH/10 г тіста, із середнім значенням – 11,0 см³ 0,1 М NaOH/10 г тіста. Надзвичайно високі значення ТК (40,1 см³ 0,1 М NaOH/10 г тіста) спостерігали під час тривалого (7 днів) бродіння конопляної закваски [26].

Хоча ТК дає певну непряму інформацію про співвідношення між молочною та оцтовою кислотами, їх пряме визначення також є достатньо розповсюдженим. Встановлено, що концентрація молочної кислоти коливалась від 15 до 150 mM, з медіанним значенням 75 mM. Концентрація оцтової кислоти знаходилась в межах 1-50 mM, з медіанним значенням 20 mM. Вважається, що чим вищий рівень оцтової кислоти, тим кращий смак закваски. Таким чином, заходи для сприяння шляху ацетаткінази (до прикладу, використання зовнішніх акцепторів електронів і пентоз цукру та інших метаболітів, здатних повторно окислювати NADH) стали звичайними в технології закваски. Найбільш рекомендований коефіцієнт бродіння (КФ, молярне співвідношення між молочною та оцтовою кислотами) - нижче 5,0; середнє значення 4,4 [27].

Продукти, що утворюються в результаті первинного та вторинного протеолізу під дією борошняних і мікробних ферментів, а саме вільні амінокислоти (ВА) є важливим біохімічним показником активності закваски. Через помітний вплив типу борошна, параметрів бродіння та використовуваних штамів концентрація ВА після ферментації закваски значною мірою коливалась від 390 до 5000 мг/кг, із середнім значенням 1360 мг/кг. Послідовне збільшення по відношенню до початкової концентрації борошна

гарантує накопичення достатньої кількості ВА, що діють як попередники смаку та синтезуються, в основному, шляхом спиртового бродіння [28].

Використання стартерів і критерії селекції. Використання щойно приготованих заквасок із виділеними МКБ та дріжджами стало звичайною практикою для підвищення продуктивності та/або для набуття певних властивостей готовою харчовою продукцією. Багато наукових статей стосуються цієї практики, автори використовували автохтонні бактеріальні ізоляти, також отримували штами з інших харчових екосистем. Селекція охоплювала досить великий спектр родів, до прикладу: *Bifidobacterium*, *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc* та *Pediococcus*. Однак більшість селекціонованих штамів належала до роду *Lactobacillus*, а саме: *L. plantarum*, *L. brevis* та *L. sanfranciscensis*, що узгоджується з домінуванням цих видів у мікробіоті хлібопекарської закваски. Нещодавно повідомлено, що нетрадиційні стартери родів *Leuconostoc* і *Weissella* продемонстрували також здатність до адаптації та високу продуктивність [29].

Комбінація кількох відібраних штамів є поширеною практикою з метою відтворення природного бродіння закваски. Для автохтонних штамів звичайна процедура стосується виділення з борошна або традиційної спонтанної закваски, відбору, розмноження з використанням кількох циклів розведення і повторного використання у вигляді відібраної закваски. Основними джерелами виділення, які майже збігалися з матрицями, підданими ферментації на заквасці, були злаки (м'яка пшениця), псевдозлаки, бобові та побічні продукти розмелювання (до прикладу, зародки пшениці) [30].

Критерії відбору штамів застосовуються найрізноманітніші, включаючи технологічні, біохімічні та харчові властивості. Тим не менше, підкислення та темпи росту це найбільш перевірені показниками, які намагаються прискорити ферментацію закваски, щоб зробити її придатною на кустарному та, особливо, на промисловому рівнях. Інші широко використовувані критерії включають вивчення протигрибкової активності, утворення ЕРС, синтез летких компонентів і протеоліз. Зосередження уваги на харчових властивостях, синтезі γ -аміномасляної кислоти [31], інгібіторних і антиоксидантних пептидів ангіотензин І-перетворюючого ферменту (АПФ) [32], деградації фітинової кислоти [33] та акриламідів [34], засвоюваності [35] є тими критеріями, які, здебільшого, оцінюються під час селекції.

У меншій кількості дослідницьких статей відбір також стосувався дріжджів. *Saccharomyces*, *Candida* і *Kazachstania* були головними родами, з найбільшою кількістю наукових статей, присвячених виду *S. cerevisiae* [36, 37].

Безсумнівно, створення та значне поширення, впровадження активних хлібопекарських заквасок сприятиме виробництву хлібобулочних виробів високої споживчої цінності.

Висновки. Хлібопекарська закваска – це специфічна та доволі стресова екосистема, населена, в основному, дріжджами та МКБ. Тої як специфічність регіону заявляється у випадку виготовлення хліба на заквасках (особливо на невеликих підприємствах), чіткого зв'язку між типом закваски та пов'язаною з нею мікробіотою не має, оскільки це в значній мірі залежить від процедур відбору проб, ізоляції та ідентифікації. Можуть існувати як прості, так і дуже складні консорціїми хлібопекарської мікробіоти. Типовими мікроорганізмами, які зустрічаються як у традиційних спонтанних, так і селекціонованих заквасках на чистих культурах, є види МКБ – *Lactobacillus sanfranciscensis*; *L. plantarum*, *L. brevis*, *L. fermentum* та дріжджі *S. cerevisiae*. На склад хлібопекарської закваски може впливати низка внутрішніх і зовнішніх факторів. До прикладу, має місце вплив борошна (тип, рівень якості) та параметри процесу (температура, рН, вихід тіста, способи приготування). Таким чином, наявність тих чи інших мікроорганізмів під час бродіння хлібопекарської закваски залежить від конкретних екологічних та технологічних факторів.

Бібліографія

1. Poutanen K., Flander L., Katina K. Sourdough and cereal fermentation in a nutritional perspective. *Food Microbiology*. 2009. 26. P. 693-699. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.07.011>.
2. Lattanzi A., Minervini F., Di Cagno R., Diviccaro A., Antonielli L., Cardinali G., et al. The lactic acid bacteria and yeast microbiota of eighteen sourdoughs used for the manufacture of traditional Italian sweet leavened baked goods. *International Journal of Food Microbiology*. 2013. Vol. 163. P. 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.02.010>.
3. Minervini F., Di Cagno R., Lattanzi A., De Angelis M., Antonielli L., Cardinali G., et al. Lactic acid bacterium and yeast microbiotas of 19 sourdoughs used for traditional/typical Italian breads: Interactions between ingredients and microbial species diversity. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. Vol. 78. P. 1251-1264. <https://doi.org/10.1128/AEM.07721-11>.
4. Lhomme E., Lattanzi A., Dousset X., Minervini F., De Angelis M., Lacaze G., et al. Lactic acid bacterium and yeast microbiotas of sixteen French traditional sourdoughs. *International Journal of Food Microbiology*. 2015. Vol. 215. P. 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.09.015>.
5. Ua-Arak T., Jakob F., Vogel R. F. Influence of levan-producing acetic acid bacteria on buckwheat-sourdough breads. *Food Microbiology*. 2017. Vol. 65. P. 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.02.002>.
6. Zhang G., Zhang W., Sadiq F. A., Arbab S. H., He G. Microbiota succession and metabolite changes during the traditional sourdough fermentation of Chinese steamed bread. *CyTA – Journal of Food*. 2019. Vol. 17. P. 172-179. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1569166>.
7. Baye K., Mouquet-Rivier C., Icard-Vernière C., Rochette I., Guyot J. P. Influence of flour blend composition on fermentation kinetics and phytate hydrolysis of sourdough used to make injera. *Food Chemistry*. 2013. Vol. 138. P. 430-436. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.075>.
8. Sugihara T. F., Kline L., Miller M. W. Microorganisms of the San Francisco sour dough bread process. I. Yeasts responsible for the leavening action. *Applied Microbiology*. 1971. Vol. 21. P. 456-458. <https://doi.org/10.1128/AEM.21.3.456-458.1971>.
9. Дробот В.І., Сильчук Т.А. Використання закваски спонтанного бродіння при виробництві житньо-пшеничного хліба. *Наукові праці НУХТ*. 2016. 1 (22). С. 180-184.
10. Пшеничнюк Г.Ф., Демченко А.Б., Ковпак Ю.С. Поліпшення якості житньо-пшеничних виробів на житніх заквасках спонтанного бродіння. *Харчова наука і технологія*. 2012. 1 (18). С. 82-84.
11. De Vuyst L., Van Kerrebroeck S., Leroy F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation. *Advances in Applied Microbiology*. 2017. Vol. 100. P. 49-160. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2017.02.003>.
12. De Vuyst L., Neysens P. The sourdough microflora: Biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science & Technology*. 2005. Vol. 16. P. 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012>.
13. Rizzello C. G., Nionelli L., Coda R., De Angelis M., Gobbetti M. Effect of sourdough fermentation on stabilisation, and chemical and nutritional characteristics of wheat germ. *Food Chemistry*. 2010. Vol. 119. P. 1079-1089. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.016>.
14. Vrancken G., Rimau X. T., Weckx S., Leroy F., De Vuyst, L. Influence of temperature and backslopping time on the microbiota of a type I propagated laboratory wheat sourdough fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011. Vol. 77. P. 2716-2726. <https://doi.org/10.1128/AEM.02470-10>.
15. Kaditzky S., Vogel R. F. Optimization of exopolysaccharide yields in sourdoughs fermented by lactobacilli. *European Food Research and Technology*. 2008. Vol. 228. P. 291-299. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0934-7>.
16. Batifoulouier F., Verny M. A., Chanliaud E., Remesy C., Demigne, C. Effect of different breadmaking methods on thiamine, riboflavin and pyridoxine contents of wheat bread. *Journal of Cereal Science*. 2005. Vol. 42. P. 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.03.003>.
17. Katina K., Heinio R.-L., Autio K., Poutanen K. Optimization of sourdough process for improved sensory profile and texture of wheat bread. *Lebensmittel Wissenschaft and Technologie. Food Science and Technology*. 2006. Vol. 39. P. 1189-1202. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.08.001>.
18. Principato L., Garrido G. D., Massari M., Dordoni R., Spigno G. Effect of commercial dried sourdoughs on structural characteristics of wheat bread. *Chemical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 75. P. 349-354. <https://doi.org/10.3303/CET1975059>.
19. Pontonio E., Nionelli L., Curiel J. A., Sadeghi A., Di Cagno R., Gobbetti M., et al. Iranian wheat flours from rural and industrial mills: Exploitation of the chemical and technology features, and selection of autochthonous sourdough starters for making breads. *Food Microbiology*. 2015. Vol. 47. P. 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.10.011>.
20. Rizzello C. G., De Angelis M., Di Cagno R., Camarca A., Silano M., Losito I., et al. Highly efficient gluten degradation by lactobacilli and fungal proteases during food processing: New perspectives for celiac disease. *Applied and Environmental Microbiology*. 2007. Vol. 73. P. 4499-4507. <https://doi.org/10.1128/AEM.00260-07>.
21. Zheng J., Wittouck S., Salvetti E., Franz C. M. A. P., Harris H. M. B., Mattarelli P., et al. A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*. *International Journal of Systematic and*

Evolutionary Microbiology. 2020. Vol. 70. P. 2782-2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>.

22. Meroth C. B., Walter J., Hertel C., Brandt M. J., Hammes W. P. Monitoring the bacterial population dynamics in sourdough fermentation processes by PCR- denaturing gradient gel electrophoresis. *Applied and Environmental Microbiology*. 2003. Vol. 69. P. 7453-7461. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.12.7453-7461.2003>.

23. Corsetti A., Settanni L., Chaves Lopez C., Felis G. E., Mastrangelo M., Suzzi, G. A taxonomic survey of lactic acid bacteria isolated from wheat (*Triticum durum*) kernels and non-conventional flours. *Systematic & Applied Microbiology*. 2003. Vol. 30. P. 561-571. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2007.07.001>.

24. Korcari D., Ricci G., Quattrini M., Fortina M. G. Microbial consortia involved in fermented spelt sourdoughs: Dynamics and characterization of yeasts and lactic acid bacteria. *Letters in Applied Microbiology*. 2020. Vol. 70. P.48-54. <https://doi.org/10.1111/lam.13241>.

25. Gaglio R., Cirilione F., Di Miceli G., Franciosi E., Di Gerlando R., Francesca N., et al. Microbial dynamics in durum wheat kernels during aging. *International Journal of Food Microbiology*. 2020. Vol. 324, 2. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108631>.

26. Waters D. M., Jacob F., Titze J., Arendt E. K., Zannini E. Fibre, protein and mineral fortification of wheat bread through milled and fermented brewer's spent grain enrichment. *European Food Research and Technology*. 2012. Vol. 235. P. 767-778. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1805-9>.

27. De Vuyst L., Schrijvers V., Paramithiotis S., Hoste B., Vancanneyt M., Swings J., et al. The biodiversity of lactic acid bacteria in Greek traditional wheat sourdoughs is reflected in both composition and metabolite formation. *Applied and Environmental Microbiology*. 2002. Vol. 68. P. 6059-6069. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.12.6059-6069.2002>.

28. Gobbetti M., Lavermicocca P., Minervini F., De Angelis M., Corsetti A. Arabinose fermentation by *Lactobacillus plantarum* in sourdough with added pentosans and α -L-arabinofuranosidase: A tool to increase the production of acetic acid. *Journal of Applied Microbiology*. 2000. Vol. 88. P. 317-324. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.00962.X>.

29. Montemurro M., Celano G., De Angelis M., Gobbetti M., Rizzello C. G., Pontonio E. Selection of non-*Lactobacillus* strains to be used as starters for sourdough fermentation. *Food Microbiology*. 2000. Vol. 90. P. 103491. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103491>.

30. Mamhoud A., Nionelli L., Bouzaine T., Hamdi M., Gobbetti M., Rizzello C. G. Selection of lactic acid bacteria isolated from Tunisian cereals and exploitation of the use as starters for sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*. 2016. Vol. 225. P. 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.03.004>.

31. Coda R., Rizzello C. G., Gobbetti M. Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread enriched of γ -aminobutyric acid (GABA). *International Journal of Food Microbiology*. 2010. Vol. 137. P. 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.12.010>.

32. Coda R., Rizzello C. G., Pinto D., Gobbetti M. Selected lactic acid bacteria synthesize antioxidant peptides during sourdough fermentation of cereal flours. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011. Vol. 78. P. 1087-1096. <https://doi.org/10.1128/AEM.06837-11>.

33. Lopez H. W., Ouvry A., Bervas E., Guy C., Messenger A., Demigne C., et al. Strains of lactic acid bacteria isolated from sour doughs degrade phytic acid and improve calcium and magnesium solubility from whole wheat flour. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2000. Vol. 48. P. 2281-2285. <https://doi.org/10.1021/jf000061g>.

34. Bartkiene E., Bartkevics V., Krungleviciute V., Pugajeva I., Zadeike D., Juodeikiene G. Lactic acid bacteria combinations for wheat sourdough preparation and their influence on wheat bread quality and acrylamide formation. *Journal of Food Science*. 2017. Vol. 82. P. 2371-2378. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13858>.

35. Montemurro M., Pontonio E., Gobbetti M., Rizzello C. G. Investigation of the nutritional, functional and technological effects of the sourdough fermentation of sprouted flours. *International Journal of Food Microbiology*. 2019. Vol. 302. P. 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.005>.

36. Liu T., Li Y., Sadiq F. A., Yang H., Gu J., Yuan L., He G. Predominant yeasts in Chinese traditional sourdough and their influence on aroma formation in Chinese steamed bread. *Food Chemistry*. 2018. Vol. 242. P. 404-411. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.081>.

37. Palla M., Blandino M., Grassi A. Characterization and selection of functional yeast strains during sourdough fermentation of different cereal wholegrain flours. *Sci Rep*. 2020. Vol. 10. P. 128-156. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69774-6>.

References

1. Poutanen, K., Flander, L., Katina, K. (2009). Sourdough and cereal fermentation in a nutritional perspective. *Food Microbiology*. 26. P.693-699. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.07.011>.

2. Lattanzi, A., Minervini, F., Di Cagno, R., Diviccaro, A., Antonielli, L., Cardinali, G. (2013). The lactic acid bacteria and yeast microbiota of eighteen sourdoughs used for the manufacture of traditional Italian sweet leavened baked goods. *International Journal of Food Microbiology*. Vol. 163. P. 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.02.010>.

3. Minervini, F., Di Cagno, R., Lattanzi, A., De Angelis, M., Antonielli, L., Cardinali, G. (2012). Lactic acid

bacterium and yeast microbiotas of 19 sourdoughs used for traditional/typical Italian breads: Interactions between ingredients and microbial species diversity. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 78. P. 1251-1264. <https://doi.org/10.1128/AEM.07721-11>.

4. Lhomme, E., Lattanzi, A., Dousset, X., Minervini, F., De Angelis, M., Lacaze, G. (2015). Lactic acid bacterium and yeast microbiotas of sixteen French traditional sourdoughs. *International Journal of Food Microbiology*. Vol. 215. P. 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.09.015>.

5. Ua-Arak, T., Jakob, F., Vogel, R. F. (2017). Influence of levan-producing acetic acid bacteria on buckwheat-sourdough breads. *Food Microbiology*. Vol. 65. P. 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.02.002>.

6. Zhang, G., Zhang, W., Sadiq, F. A., Arbab, S. H., He, G. (2019). Microbiota succession and metabolite changes during the traditional sourdough fermentation of Chinese steamed bread. *CyTA – Journal of Food*. Vol. 17. P. 172-179. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1569166>.

7. Baye, K., Mouquet-Rivier, C., Icard-Vernière, C., Rochette, I., Guyot, J. P. (2013). Influence of flour blend composition on fermentation kinetics and phytate hydrolysis of sourdough used to make injera. *Food Chemistry*. Vol. 138. P. 430-436. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.075>.

8. Sugihara, T. F., Kline, L., Miller, M. W. (1971). Microorganisms of the San Francisco sour dough bread process. I. Yeasts responsible for the leavening action. *Applied Microbiology*. Vol. 21. P. 456-458. <https://doi.org/10.1128/AEM.21.3.456-458.1971>.

9. Drobot, V. I., Sylchuk, T. A. (2016). Vykorystannia zakvasky spontannoho brodinna pry vyrobnytstvi zhytno-pshenychnoho khliba [Using spontaneous fermentation sourdough in the production of rye-wheat bread]. *Naukovi pratsi NUXT – Scientific works of NUFT*. 1 (22), 180-184 [in Ukrainian].

10. Pshenychniuk, H. F., Demchenko, A. B., Kovpak, Yu. S. (2011). Pokrashchennia yakosti zhytno-pshenychnykh vyrobiv na zhytnikh zakvaskakh spontannoho brodinna. [Improving the quality of rye-wheat products on rye leavens of spontaneous fermentation] *Kharchova nauka i tekhnolohiia – Food science and technology*. 1 (18). 141-145 [in Ukrainian].

11. De Vuyst, L., Van Kerrebroeck, S., Leroy, F. (2017). Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation. *Advances in Applied Microbiology*. Vol. 100. P. 49-160. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2017.02.003>.

12. De Vuyst, L., Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: Biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science & Technology*. Vol. 16. P. 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012>.

13. Rizzello, C. G., Nionelli, L., Coda, R., De Angelis, M., Gobbetti, M. (2010). Effect of sourdough fermentation on stabilisation, and chemical and nutritional characteristics of wheat germ. *Food Chemistry*. Vol. 119. P. 1079-1089. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.016>.

14. Vrancken, G., Rimau, X. T., Weckx, S., Leroy, F., De Vuyst, L. (2011). Influence of temperature and backslipping time on the microbiota of a type I propagated laboratory wheat sourdough fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 77. P. 2716-2726. <https://doi.org/10.1128/AEM.02470-10>.

15. Kaditzky, S., Vogel, R. F. (2008). Optimization of exopolysaccharide yields in sourdoughs fermented by lactobacilli. *European Food Research and Technology*. Vol. 228. P. 291-299. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0934-7>.

16. Batifoulrier, F., Verny, M. A., Chanliaud, E., Remesy, C., Demigne, C. (2005). Effect of different breadmaking methods on thiamine, riboflavin and pyridoxine contents of wheat bread. *Journal of Cereal Science*. Vol. 42. P. 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.03.003>.

17. Katina, K., Heinio, R.-L., Autio, K., Poutanen, K. (2006). Optimization of sourdough process for improved sensory profile and texture of wheat bread. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie. Food Science and Technology*. Vol. 39. P. 1189-1202. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.08.001>.

18. Principato, L., Garrido, G. D., Massari, M., Dordoni, R., Spigno, G. (2019). Effect of commercial dried sourdoughs on structural characteristics of wheat bread. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 75. P. 349-354. <https://doi.org/10.3303/CET1975059>.

19. Pontonio, E., Nionelli, L., Curiel, J. A., Sadeghi, A., Di Cagno, R., Gobbetti, M. (2015). Iranian wheat flours from rural and industrial mills: Exploitation of the chemical and technology features, and selection of autochthonous sourdough starters for making breads. *Food Microbiology*. Vol. 47. P. 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.10.011>.

20. Rizzello, C. G., De Angelis, M., Di Cagno, R., Camarca, A., Silano, M., Losito, I. (2007). Highly efficient gluten degradation by lactobacilli and fungal proteases during food processing: New perspectives for celiac disease. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 73. P. 4499-4507. <https://doi.org/10.1128/AEM.00260-07>.

21. Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C. M. A. P., Harris, H. M. B., Mattarelli, P. (2020). A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. Vol. 70. P. 2782-2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>.

22. Meroth, C. B., Walter, J., Hertel, C., Brandt, M. J., Hammes, W. P. (2003). Monitoring the bacterial population dynamics in sourdough fermentation processes by PCR-denaturing gradient gel electrophoresis. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 69. P. 7453-7461. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.12.7453-7461.2003>.

23. Corsetti, A., Settanni, L., Chaves Lopez, C., Felis, G. E., Mastrangelo, M., Suzzi, G. (2003). A taxonomic survey of lactic acid bacteria isolated from wheat (*Triticum durum*) kernels and non-conventional flours. *Systematic & Applied Microbiology*. Vol. 30. P. 561-571. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2007.07.001>.
24. Korcari, D., Ricci, G., Quattrini, M., Fortina, M. G. (2020). Microbial consortia involved in fermented spelt sourdoughs: Dynamics and characterization of yeasts and lactic acid bacteria. *Letters in Applied Microbiology*. Vol. 70. P.48-54. <https://doi.org/10.1111/lam.13241>.
25. Gaglio, R., Cirlincione, F., Di Miceli, G., Franciosi, E., Di Gerlando, R., Francesca, N. (2020). Microbial dynamics in durum wheat kernels during aging. *International Journal of Food Microbiology*. Vol. 324, 2. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108631>.
26. Waters, D. M., Jacob, F., Titze, J., Arendt, E. K., Zannini, E. (2012). Fibre, protein and mineral fortification of wheat bread through milled and fermented brewer's spent grain enrichment. *European Food Research and Technology*. Vol. 235. P. 767-778. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1805-9>.
27. De Vuyst, L., Schrijvers, V., Paramithiotis, S., Hoste, B., Vancanneyt, M., Swings, J. (2002). The biodiversity of lactic acid bacteria in Greek traditional wheat sourdoughs is reflected in both composition and metabolite formation. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 68. P. 6059-6069. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.12.6059-6069.2002>.
28. Gobbetti, M., Lavermicocca, P., Minervini, F., De Angelis, M., Corsetti, A. (2000). Arabinose fermentation by *Lactobacillus plantarum* in sourdough with added pentosans and α -L-arabinofuranosidase: A tool to increase the production of acetic acid. *Journal of Applied Microbiology*. Vol. 88. P. 317-324. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.00962.X>.
29. Montemurro, M., Celano, G., De Angelis, M., Gobbetti, M., Rizzello, C. G., Pontonio, E. (2000). Selection of non-*Lactobacillus* strains to be used as starters for sourdough fermentation. *Food Microbiology*. Vol. 90. P. 103491. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103491>.
30. Mamhoud, A., Nionelli, L., Bouzaine, T., Hamdi, M., Gobbetti, M., Rizzello, C. G. (2016). Selection of lactic acid bacteria isolated from Tunisian cereals and exploitation of the use as starters for sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*. Vol. 225. P. 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.03.004>.
31. Coda, R., Rizzello, C. G., Gobbetti, M. (2010). Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread enriched of γ -aminobutyric acid (GABA). *International Journal of Food Microbiology*. Vol. 137. P. 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.12.010>.
32. Coda, R., Rizzello, C. G., Pinto, D., Gobbetti, M. (2011). Selected lactic acid bacteria synthesize antioxidant peptides during sourdough fermentation of cereal flours. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 78. P. 1087-1096. <https://doi.org/10.1128/AEM.06837-11>.
33. Lopez, H. W., Ouvry, A., Bervas, E., Guy, C., Messenger, A., Demigne, C. (2000). Strains of lactic acid bacteria isolated from sour doughs degrade phytic acid and improve calcium and magnesium solubility from whole wheat flour. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 48. P. 2281-2285. <https://doi.org/10.1021/jf000061g>.
34. Bartkiene, E., Bartkevics, V., Krungleviciute, V., Pugajev, A. I., Zadeike, D., Juodeikiene, G. (2017). Lactic acid bacteria combinations for wheat sourdough preparation and their influence on wheat bread quality and acrylamide formation. *Journal of Food Science*. Vol. 82. P. 2371-2378. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13858>.
35. Montemurro, M., Pontonio, E., Gobbetti, M., Rizzello, C. G. (2019). Investigation of the nutritional, functional and technological effects of the sourdough fermentation of sprouted flours. *International Journal of Food Microbiology*. Vol. 302. P. 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.005>.
36. Liu, T., Li, Y., Sadiq, F. A., Yang, H., Gu, J., Yuan, L., He, G. (2018). Predominant yeasts in Chinese traditional sourdough and their influence on aroma formation in Chinese steamed bread. *Food Chemistry*. 2018. Vol. 242. P. 404-411. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.081>.
37. Palla, M., Blandino, M., Grassi, A. (2020). Characterization and selection of functional yeast strains during sourdough fermentation of different cereal wholegrain flours. *Sci Rep*. Vol. 10. P. 128-156. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69774-6>.