

## **Розділ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ОБРОБЛЕНОЇ ПЛАЗМОЮ ВОДИ В ХЛІБОПЕЧЕННІ В КОНТЕКСТІ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ**

### **3.1. Продовольча безпека: аспекти раціонального використання продовольчої сировини**

Продовольча проблема є однією з ключових у забезпеченні добробуту і здоров'я населення. Наявність харчової продукції у достатній кількості і високій якості є викликом для сучасності внаслідок обмеженості ресурсів. Застосування системного підходу до зниження втрат продовольчої сировини виступає одним із найбільш пріоритетних завдань сьогодення.

Продовольча безпека, як забезпечення населення високоякісною продукцією харчування, є однією з основних проблем людства. Виробництво продуктів харчування повинно суттєво збільшуватися, щоб задовольнити майбутні потреби зростаючого населення, яке за прогнозами Всесвітньої продовольчої організації (FAO) до 2050 року становитиме понад 9 млрд. (Xiaolei et al., 2013). Щоб забезпечити населення продуктами харчування, треба не лише збільшувати обсяги вирощування рослинної і тваринної продукції, а й підвищувати ефективність використання продовольчої сировини, застосовуючи безвідходні технології її переробки. При цьому має зберігатися умова отримання продукції високої якості і безпечності для кінцевого споживача.

Результати дослідження, проведені FAO, показують, що приблизно одна третина харчової сировини і готових продуктів, що виробляються для споживання людей, втрачається. Тобто щороку втрати харчової сировини сягають 1,3 млрд тонн. При цьому у перерахунку на сухі речовини 44 % сільськогосподарських культур, зібраних у полі, не доходять до столу споживача (Korotkov et al., 2010; Garvey et al., 2013). Величезна кількість харчових втрат у глобальних ланцюгах харчування привертає все більшу увагу суспільства через екологічні, соціальні та економічні наслідки їх наявності на планеті. Величезна кількість ресурсів, що використовуються у виробництві продуктів харчування, витрача-

ється даремно. Зокрема, викиди парникових газів, спричинені виробництвом продуктів, які в кінці кінців не застосовуються для харчування людини, також є марними.

Питаннями зниження втрат продовольчої сировини сьогодні найбільше опікуються науковці Великої Британії, США, Швеції, Німеччини, Фінляндії, Китаю, Нідерландів, Індії, Австрії і Австралії (Pivovarov et al., 2015). Дані про зміну клімату переконують, що виробництво і споживання харчових продуктів суттєво впливає і на глобальне потепління. Адже доведено, що для країн Європейського Союзу їх вклад становить 22 % факторів, які призводять до кліматичних змін (Murielle et al., 2010).

Втрати продовольчої сировини відбуваються на кожному етапі протягом усього харчового ланцюга, який являє собою послідовність стадій і певних операцій виготовлення, обробки, розподілу, зберігання харчових продуктів та їхніх інгредієнтів і користування ними, починаючи з первинного виробництва і до споживання (Верголяс, Гончарук, 2016). Окремо вирізняють дві категорії втрат: втрати харчових продуктів – зменшення їх кількості і якості та харчові відходи як частину втрати харчових продуктів, які зіпсувалися з вини учасників продовольчого ланцюга, переважно кінцевого споживача. Отже, значної кількості втрат продовольчої сировини, а саме понад 80 %, можна уникнути. Звісно, що у харчовому ланцюзі неможливим є повне використання всієї сировини рослинного і тваринного походження та готової харчової продукції, але частка таких втрат незначна і становить лише 18 %.

Харчовий ланцюг складається із шести основних ланок: вирощування сільськогосподарської продукції та її збирання; післязбиральна обробка і зберігання; переробка і виробництво готової до споживання харчової продукції; постачання харчових продуктів суб'єктам роздрібної торгівлі; реалізація товару кінцевому споживачу; споживання. Проте наповнення продовольчого ланцюга за етапами може варіюватися залежно від товарної групи харчових продуктів.

Агропромисловий сектор, який включає сільське господарство, харчову та переробну промисловість, займає одне з найважливіших місць у структурі

української економіки. Сільськогосподарське виробництво формує близько 10 % українського ВВП, у той час як харчова промисловість – близько 8 %. Зазначені галузі зі сільськогосподарським машинобудуванням, виробництвом добрив і хімікатів складають у ВВП України понад 25 % (Martínez-Huitle, Brillas, 2008; Malik, 2010; Масленников и др., 2013). За даними вчених, якщо у США до роздрібного покупця може доходити 90 % вирощеної продукції, в Україні – близько 40 % (Huang et al., 2008). Тільки в збиральний період втрати плодоовочевої продукції в Україні становлять майже 43 % загального обсягу виробництва. Таким чином втрати харчової продукції є важливою проблемою як для світової спільноти, так і для української економіки, що потребує пошуку шляхів скорочення втрат із впровадження ресурсозберігаючих технологій.

Втрати харчової сировини суттєво залежать від її хімічного складу та застосовуваних технологічних переробок і виробництва кінцевого харчового продукту. Наприклад, для олійних і бобових культур та м'яса втрати становлять 20 %, того часу для коренеплодів і плодоовочевої продукції втрачається близько 45 % від кількості харчової сировини на початку продовольчого ланцюга.

Харчові товарні групи відрізняються за характером і кількістю продовольчих втрат. У цілому прийнято поділяти їх на такі продовольчі групи (Pivovarov et al., 2015): зерно і зернові продукти; коренеплоди; олійні і бобові культури; плоди; овочі; м'ясо; риба і морепродукти; молочні продукти; яйця; інші види харчових продуктів.

Незважаючи на особливості товарних груп під час урахування втрат сировини в диференційованих харчових ланцюгах деякі групи об'єднують, наприклад, плоди та овочі, молочні продукти і яйця. У табл. 3.1. наведені втрати продовольчої сировини в період від сільськогосподарського виробництва – кінцевий етап харчового ланцюга – споживання готової харчової продукції. Для європейських країн у цілому найбільша кількість втрат характерна для початкової точки ланцюга постачання (коренеплоди, олійні і бобові культури, плоди та овочі) і кінцевої точки (зернові культури, м'ясо, риба і морепродукти, молоко і яйця). На етапі постачання харчових продуктів реєструються найменші

втрати. Виняток становить плодоовочева продукція через зниження її якості під час транспортування. Для більшості товарних груп рослинного походження, тобто зерна і зернових продуктів, коренеплодів, олійних і бобових культур, а також м'яса, значна частка харчової сировини втрачається під час переробки і пакування. Так для зерна кількість втрат, що виникають у післязбиральний період, під час зберігання і в технологічних процесах його переробки, перевищують аналогічні втрати зерна в полі у 2 та 4 рази, відповідно.

Таблиця 3.1. Втрати сировини протягом харчового ланцюга «з лану до столу» в Європі (Pelletier et al., 2013)

Вид харчової сировини	Втрати протягом ланки продовольчого ланцюга, млн т					Загальні втрати, %
	сільсько-господарське виробництво	післязбиральна обробка і зберігання	переробка і пакування	постачання	споживання	
Зерно і зернові продукти	2,8	4,9	10,8	1,8	22,6	30
Коренеплоди	26,9	9,2	7,0	2,1	6,7	45
Олійні і бобові культури	1,7	0,2	0,7	0,2	0,6	20
Плоди та овочі	32,0	6,3	1,8	6,6	21,2	45
М'ясо	1,8	0,4	2,8	2,1	5,7	20
Риба і морепродукти	0,6	0	0,4	0,4	0,7	35
Молочні продукти і яйця	8,2	1,1	2,0	1,0	11,9	20
Всього	74	22	26	14	69	-

Як бачимо з наведених даних, втрати продовольчої сировини відбуваються на всіх етапах харчового ланцюга. Проте залежно від продовольчої групи доцільно вибирати різні концептуальні підходи, щоб скоротити втрати. Для коренеплодів, плодоовочевої продукції, олійних і бобових культур важливо запобігти втратам на початкових етапах харчового ланцюга. Більша кількість сировини тваринного походження має найбільші втрати на етапі споживання продукції. Зниження таких втрат у першу чергу пов'язано з раціоналізацією культури харчування і самосвідомістю споживачів. Увагу привертають можливості зміни технологічних підходів до первинної обробки, зберігання та переробки зерна,

коренеплодів, олійних і бобових культур та м'яса за рахунок використання ресурсозберігаючих методів обробки сировини. Такі технологічні етапи забезпечують приблизно 24 % усіх втрат протягом харчового ланцюга. Розвиток технологій на даних етапах здатний сприятливо впливати і на кінцеву стадію продовольчого ланцюга – споживання – за рахунок впровадження технологій виробництва харчових продуктів, які дозволяють забезпечити подовжений термін зберігання споживчих якостей харчових продуктів.

Розглянемо деталізацію втрат харчової сировини на трьох початкових етапах продовольчого ланцюга, які належать до безпосередньої сфери агропромислового комплексу (табл. 3.2).

Продовольча сировина втрачається уздовж усього харчового ланцюга – від вирощування культур сільськогосподарського призначення до споживання кінцевого харчового продукту. При цьому відомий факт залежності продовольчих втрат від рівня економічного розвитку країн.

Таблиця 3.2. Втрати протягом продовольчого ланцюга на ділянці вирощування та виробництва харчової продукції (Murielle et al., 2010).

Стадія	Харчові втрати, що виявляються на ділянці харчового ланцюга
1	2
Вирощування	Харчові культури, що були залишені у полі, з'їдені птахами, гризунами; недотримання термінів збору врожаю і втрата якості сільськогосподарської сировини; пошкодження врожаю під час заготівлі; недостатньо високий рівень агротехніки
Первинна обробка в полі	Втрати, пов'язані зі зниженою ефективністю роботи обладнання
Сушіння–транспортування	Втрати під час транспортування; псування і травмування
Зберігання	Пошкодження шкідниками, хворобами; втрати внаслідок забруднення сільськогосподарської сировини; проливання, просипання; природні втрати внаслідок фізіологічних процесів і висихання сировини

1	2
Первинна переробка – очищення, калібрування, сушіння, шліфування, пакування, замочування, просіювання	Технологічні втрати пов'язані із недосконалістю організації виробничих процесів; забруднення сировини, що призводить до втрати якості
Вторинна переробка – змішування, формування, нарізання, термічна обробка, виробництво кінцевої продукції	Технологічні втрати, пов'язані з недосконалістю організації виробничих процесів; забруднення сировини, що призводить до втрати якості
Оцінка продукту – контроль якості: стандарти, рецептурний склад	Втрати продукту через невідповідність вимогам стандартів; застосування руйнівних методів контролю
Упаковка – зважування, маркування, герметизація	Неприпустимий вміст виробленої упаковки продукту; втрати зерна за безтарного зберігання внаслідок атаки гризунів

Причини втрати харчових продуктів у країнах зі середнім і високим рівнем доходів головним чином пов'язані з поведінкою споживачів, а також з відсутністю координації між різними учасниками продовольчого ланцюга. Продовольчі відходи в промислово розвинених країнах можуть бути зменшені шляхом підвищення обізнаності серед працівників харчової промисловості, роздрібної торгівлі і підвищення культури споживання харчових продуктів. Сьогодні актуальною є також проблема повного використання побічних продуктів харчової промисловості для створення якісної і максимально корисної продукції. До групи продовольчих відходів входять втрати харчових продуктів, які потенційно можуть бути використані для споживання людиною (Xiaolei et al., 2013). Наприклад, під час переробки зерна пшениці на борошно середні втрати становлять 20 % за масою вхідної сировини (Martínez-Huitle, Brillas, 2008). Ці втрати являють собою в основному побічні продукти, до яких відносять кормові зернопродукти і висівки, що містять зародок, і периферійні частини зернівки, багаті на біологічно активні речовини і харчові волокна (табл. 3.3). Зокрема, на більшості українських харчових підприємств потенціал корисності пшеничних зародків часто не розкривається для кінцевого споживача через недостатню

практику подальшої переробки цього побічного продукту (Abdulsudi et al., 2011). Тому це спричиняє вилучення цінного для людини зародка з продовольчого ланцюга внаслідок швидкого псування, зумовленого розвитком окислювальних процесів. Але прогалини в оптимізації використання продовольчої сировини носять не регіональний, а світовий характер, що вказує на необхідність наукового пошуку вирішення даного питання.

Харчова промисловість відіграє надзвичайно важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки. Зниження втрат продовольчої сировини є важливим кроком до підвищення ефективності використання природних ресурсів. Однак потрібно мати збалансований підхід до мінімізації енергетичних витрат у технологічному процесі поряд із необхідністю створювати «здорові» продукти харчування з високою харчовою і біологічною цінністю (Mykolenko et al., 2014).

Тенденції до зростання кількості населення і збільшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище у XXI столітті вказують на те, що для виробництва сільськогосподарської і харчової продукції ми змушені використовувати менше матеріальних і енергетичних ресурсів. У свою чергу обсяги виробництва будуть зростати, що потребує розробки новітніх харчових продуктів і впровадження інноваційних технологічних рішень у харчову і переробну промисловість.

До основних напрямів інноваційної діяльності у харчовій і переробній галузях належать:

- технологічні (процесні);
- продуктові (асортиментні);
- маркетингові (управлінські);
- інфраструктурні (організаційні) (Misra et al., 2011).

Технологічні інновації здатні суттєво впливати на скорочення втрат продовольчої сировини. Вони можуть мати різну направленість. Передусім інновації можуть стосуватися розробки і впровадження нових технологій зберігання сировини, як основи для виробництва харчових продуктів. Звісно, що перспективним аспектом скороченням втрат є застосування ресурсозберігаючих техно-

логій, які характеризуються максимально високим виходом готової продукції широкого асортименту і мінімізацією відходів за рахунок застосування сучасних методів обробки харчової сировини.

Таблиця 3.3. Хімічний склад зерна і продуктів його переробки (Миколенко та ін., 2014).

Складові компоненти	Пшениця м'яка озима	Борошно пшеничне вищого сорту	Висівки пшеничні	Зародок пшеничний
Білки, г	11,2	10,3	16,0	23,1
Жири, г	2,1	1,1	3,8	9,7
Вуглеводи, г	55,2	68,9	16,6	38,6
Клітковина, г	2,4	0,1	43,6	13,2
Зольність, г	1,7	0,5	5,0	4,2
Na, мг	8,0	3,0	8,0	12,0
K, мг	323	122,0	126,	892,0
Ca, мг	50,0	19,0	150,0	39,0
Mg, мг	111	16,0	448,0	239,0
P, мг	340	86,0	950,0	842,0
Fe, мг	5,1	1,2	14,0	626,0
Zn, мг	2,8	-	7,27	12,3
Cu, мг	0,5	-	1,0	796,0
Mn, мг	108	16,0	11,5	13,3
Se, мг	0,3	-	0,7	79,2
B <sub>1</sub> , мг	0,41	0,17	0,75	1,9
B <sub>2</sub> , мг	0,17	0,04	0,26	0,5
B <sub>5</sub> , мг	1,15	-	2,2	2,2
B <sub>6</sub> , мг	0,5	-	1,3	1,3
B <sub>9</sub> , мг	0,4	-	0,1	0,3
E, мг	3,0	1,5	1,5	10,4
PP, мг	5,04	1,2	13,5	6,8

Необхідним є й пошук підходів до скорочення виробничого циклу без втрати якості готової продукції, а також впровадження нових технологій пакування продукції, що забезпечить їх високі транспортабельні якості.



Харчові продукти повинні максимально сприятливо впливати на здоров'я людини, мати тривалий термін зберігання споживчих якостей. Це також суттєво залежить від культури харчування і обізнаності людей щодо характеристик тих чи інших харчових продуктів. Для вирішення глобальної продовольчої проблеми необхідне впровадження інтегрованого багатогалузевого підходу вздовж всього ланцюга постачання харчових продуктів. Прийняття такого підходу дозволить досягти високої системної ефективності використання природних ресурсів, створення безпечних і якісних харчових продуктів широкого асортименту.

### **3.2. Використання плазмохімічно активованої води у хлібопеченні для підвищення якості продукції**

Хліб є одним з найважливіших продуктів харчування, який забезпечує організм людини вітамінами, мінералами, білковими речовинами та має високу енергетичну цінність. Однак виробництво хлібопекарської продукції прийнятної якості та мікробіологічної безпеки потребує використання борошна з високими хлібопекарськими властивостями, кількість якого на світовому ринку тенденційно знижується. Погіршення якісних характеристик пшеничного борошна останнім часом набуває непередбачуваного характеру. Основними чинниками такого явища є несприятливі кліматичні умови виробництва зернової продукції, недотримання агротехнічних заходів та технологічних особливостей зберігання та переробки зерна. Тому для коректування хлібопекарських властивостей борошна широкого розповсюдження в хлібопеченні набуло застосування поліпшувачів різного походження. Такі добавки можуть негативно впливати на здоров'я споживачів, особливо з огляду на те, що хлібобулочні вироби є продуктами масового вживання та присутні в щоденному раціоні людини. Наприклад, одним з ефективних хімічних поліпшувачів окислювальної дії є бромат калію, який в незначних дозах (0,001–0,003 %) за рахунок спрямованої дії на структурно-механічні властивості тіста сприяє підвищенню його газотримувальної здатності, збільшенню об'єму хліба, покращенню структури пористості й ко-

льору м'якушки. Довгий час бромат калію широко використовувався для виробництва хлібопекарської продукції, однак згодом було встановлено, що даний поліпшувач має канцерогенні ознаки, тому на сьогодні в багатьох країнах світу він заборонений до використання (Xiaolei et al., 2013). Водночас поліпшувачі мають достатньо високу вартість, а їх застосування в технології виробництва хлібобулочних виробів ускладнюється нестабільністю властивостей сировини й потребою в спеціальному дозувальному обладнанні, що робить неможливим їх використання в екстремальних умовах.

У зв'язку зі зростанням чисельності населення актуальною проблемою розвитку світу є забезпечення людей продуктами харчування. Поряд з тим значних масштабів останнім часом набуває підвищення рівня загроз техногенного характеру, кліматичних катаклізмів та терористичної активності за участю небезпечних для життєдіяльності речовин біологічного, хімічного та радіаційного походження. У разі виникнення згаданого «особливого» періоду вимоги до сировини, як правило, нівелюються за рахунок наявності будь-яких сировинних запасів, що зберігаються без ушкодження в реальних умовах та які мають використовуватися для виготовлення хлібопекарської продукції у великій кількості для масового забезпечення населення постраждалих територій. У такому випадку виникає проблема застосування сировини будь-якої якості для виготовлення хліба зі споживчими властивостями, що наближаються до відповідних стандартних характеристик. Вирішення подібних важливих завдань має реалізуватися шляхом технологій нового покоління, серед яких значну перспективу відіграють заходи, пов'язані з останніми досягненнями науки, зокрема в галузі хімії високих енергій (Korotkov et al., 2010; Garvey et al., 2013).

Необхідним компонентом в рецептурі хлібобулочних виробів є вода. Сьогодні в Україні та окремих країнах СНД хлібопекарські підприємства для виробництва продукції найчастіше використовують воду без будь-якої підготовки. Відомо, що від її структури і складу залежить інтенсивність мікробіологічних й ферментативних процесів під час приготування тіста та якість готового продукту. Використання води, яку піддано дії відомих фізико-хімічних методів, на-

приклад електролізу, ультрафіолетовому опромінюванню, озонуванню, не отримало широкого розповсюдження з багатьох причин, серед яких, відсутність серійного технологічного обладнання, вдосконалених технологічних регламентів та відповідного санітарно-гігієнічного тестування кінцевої продукції. Тому такі технологічні рішення до цього часу не вийшли за межі лабораторних досліджень.

Викликають зацікавленість процеси активації води за допомогою електричних розрядів, серед яких окремо виділяється застосування контактної нерівноважної плазми для обробки питної води та водних розчинів. Серед особливостей води, активованої під дією плазми, увагу привертають зміни у її хімічному складі та поява специфічної структури, що підтверджено спектральними та фізико-хімічними методами (Martínez-Huitle, Brillas, 2008). Тому така вода набуває особливих властивостей, не потребуючи спеціальних умов для її зберігання (Pivovarov et al., 2015).

Використання борошна різної якості в поєднанні зі застосуванням для замішування тіста плазмохімічно активованих водних розчинів суттєво відображається на перебігу технологічного процесу виробництва хліба та характеристиках готових виробів. У наукових роботах показано, що використання розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, при виготовленні пшеничного тіста інтенсифікує газоутворення, покращує реологічні властивості напівфабрикату, сприяє прискоренню протікання біохімічних, мікробіологічних та колоїдних процесів (Верголяс, Гончарук, 2016; Масленников и др., 2013; Malik, 2010). Узагальнені фізико-хімічні показники якості отриманого хліба та характеристика його зовнішнього вигляду відображено в табл. 3.4 та на рис. 3.1. Аналіз отриманих даних підтверджує, що для виготовлення хліба із борошна зі зниженими хлібопекарськими якостями в результаті використання плазмохімічно активованих водних розчинів спостерігається збільшення питомого об'єму хліба на 6–8 %, зростає формостійкість подових виробів в середньому на 20–35 %, поліпшується структура м'якушки і збільшується пористість до 5 % порівняно зі зразком, виготовленим на основі магістральної питної води без

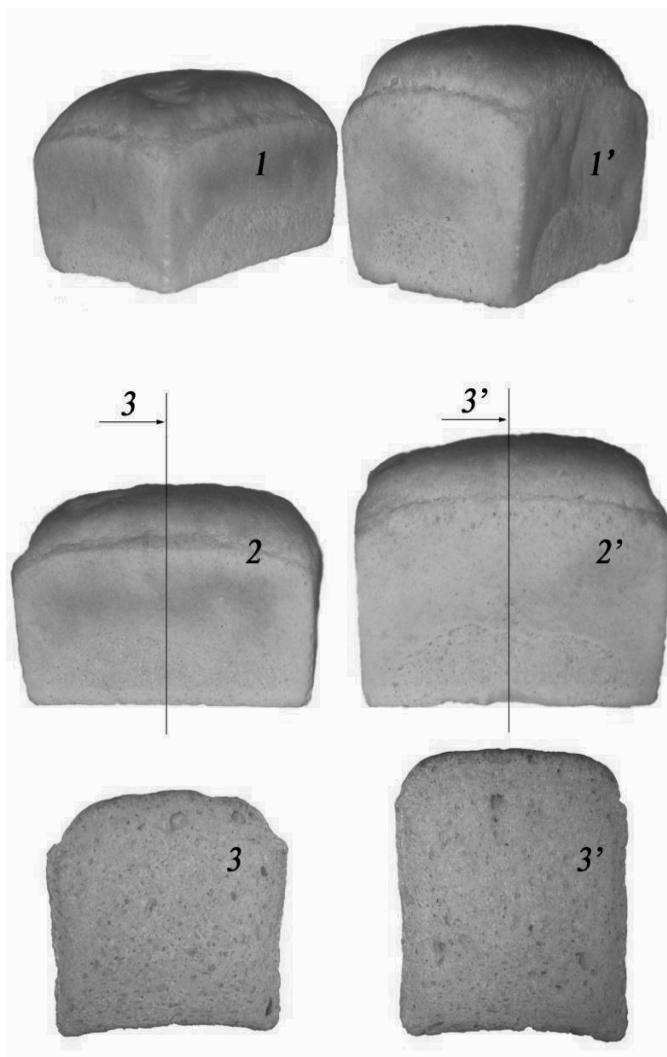


Рис. 3.1. Хліб формовий із пшеничного борошна другого сорту на основі магістральної води (1–3) та плазмохімічно активованих водних розчинів (1'–3')

додаткової обробки. У випадку використання для виробництва хліба пшеничного борошна низького сорту з підвищеним умістом периферійних частин зернівки застосування плазмохімічно активованих водних розчинів сприяє підвищенню питомого об'єму виробів на 20–23 % та формостійкості виробів на 5–10 %, покращенню пористості хліба на 4–6 %.

Фізико-хімічні показники якості дослідних зразків хліба знаходяться на рівні аналогічних значень контрольного варіанта. Однак у випадку використання борошна низького сорту вологість хліба на основі плазмохімічно активованих водних розчинів є зниженою на 0,5 %, що є передумовою для зростання продуктив-

ності виробництва за рахунок збільшення фактичного виходу хліба в середньому на 1,5 %. В обох випадках за характеристиками хліб, виготовлений з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів, не відрізняється від виробу на магістральній воді без додаткової обробки. Важливим є те, що під час випікання хліба відбувається розкладання пероксидних сполук з вивільненням активного кисню, тому готові вироби не мають штучно привнесених хімічних речовин, є безпечними для споживання.

Хлібопекарській продукції властива втрата її якісних характеристик під час зберігання. Через деякий час після випікання та охолодження хліба відбува-

ється зниження еластичності і пружності м'якушки, її водопоглинальної здатності, зростання крихкості та підвищення жорсткості пористої структури хліба. Одночасно хліб втрачає характерний смак і аромат. Такі процеси обумовлені всиханням хліба – переміщенням вологи, а також перетвореннями, які зазнають високомолекулярні полімери хліба в період зберігання (табл. 3.5). Встановлено, що під час зберігання хліба відбувається поступова втрата вологи його м'якушкою. Для дослідного і контрольного зразків різниця значень вологості є мало помітною і знаходиться в межах похибки, однак підкреслимо, що спостерігається тенденція до менш інтенсивного зниження показника для хліба на основі плазмохімічно активованих водних розчинів.

Таблиця 3.4. Характеристики якості хліба із пшеничного борошна

Показники	Хліб з борошна,			
	виробленого зі зерна, пошкодженого клопом-черепашкою		другого сорту з високим умістом периферійних частинок	
	1 (контроль)	2	3 (контроль)	4
Питомий об'єм хліба, см <sup>3</sup> /г	3,86	4,17	3,42	4,24
Формостійкість, Н:Д подового хліба	0,29	0,43	0,27	0,26
Вологість хліба, %	40,7	40,7	44,0	43,5
Кислотність м'якушки, град	1,5	1,5	2,2	2,1
Пористість, %	82	86	75	80

Відомо, що для кінцевого споживача одним з найбільш виразних характеристик свіжості хліба є підвищення крихкості м'якушки. Аналіз отриманих даних демонструє суттєві відмінності за цим показником для дослідного і контрольного зразків. Після 24 год зберігання виробу на основі плазмохімічно активованих водних розчинів його крихкість є нижчою в середньому на 2 % порівняно з контролем. Зауважимо, що при подальшому зберіганні хліба даний показник залишається зниженим для дослідних зразків, а наприкінці дослідження різниця зростає вдвічі і сягає 4 %. Для свіжого хліба характерна висока гідрофільність м'якушки, але внаслідок старіння біополімерів цей показник поступово знижується, що свідчить про підвищення ступеня черствіння хліба.

Таблиця 3.5. Вплив плазмохімічно активованих водних розчинів на ступінь зберігання хлібом свіжості

Тривалість зберігання, год	Показник свіжості хліба					
	вологість, %		крихкість мякушки, %		кількість вологи, яку поглинає мякушка, % на сухі речовини	
	контроль	дослідний зразок	контроль	дослідний зразок	контроль	дослідний зразок
24	42,3	42,5	5	3	233	245
48	41,8	42,1	6	4	207	218
72	41,7	42,0	10	6	194	210

За результатами досліджень встановлено, що використання розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, сповільнює втрату м'якушкою гідрофільних властивостей. На всіх етапах визначення якості виробів цей показник для дослідних зразків є підвищеним на 11–14 % у порівняно з контрольними. За результатами проведених досліджень постає необхідність виявлення причин зміни споживчих характеристик хлібопекарської продукції під впливом плазмохімічно активованих водних розчинів шляхом визначення ступеня асоціації води з біополімерами виробу та встановлення мікроструктурних особливостей хліба на їх основі.

Вода в харчових продуктах відіграє важливу роль, оскільки обумовлює консистенцію і структуру продукту, а її взаємодія з присутніми компонентами визначає їх стійкість під час зберігання. Тому серед факторів, що впливають на збереження виробами свіжості, окрему увагу приділяють вмісту вологи та характеру її поведінки в готовому продукті (Huang et al., 2008; Півоваров та ін., 2012; Pelletier et al., 2013). Волога, яка міститься в хлібобулочних виробах, має різний ступінь асоціації зі складовими компонентами, залежно від якого поділяється на вільну та зв'язану. Зв'язана волога являє собою асоційовану воду, міцно пов'язану з білками, вуглеводами та ліпідами продукту за рахунок хімічних та фізичних зв'язків. Вільна волога включає воду, не зв'язану біополімерами та доступну для перебігу біохімічних, хімічних та мікробіологічних реакцій

(Abdulsudi et al., 2011; Миколенко та ін., 2014; Mykolenko et al., 2014). Характеристики хлібобулочних виробів суттєво залежать від співвідношення вільної та зв'язаної вологи в продукті.

Встановлено, що після 24 годин зберігання хліба на основі розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, вміст в ньому механічно зв'язаної вологи стає нижчим у середньому на 6 %, а осмотично зв'язаної, навпаки, на 2–3 % вищим порівняно з хлібом, виготовленим за традиційною технологією (табл. 3.6). Очевидно, такий ефект пов'язаний зі структурними особливостями плазмохімічно активованих водних розчинів. Оскільки дрібнокластерні частки води мають здатність міцно зв'язуватися клейковинними білками, то в хлібі зменшується кількість води, яка має підвищену молекулярну рухомість. Відзначимо, що в дослідному зразку водночас зі зменшенням частки вільної вологи збільшується вміст зв'язаної води на 3–4 % порівняно з контрольним зразком. Здатність до адсорбційного зв'язування вологи характерна для крохмалю – основного складового компонента борошна, який являє собою міцне і водночас лабільне утворення. Міцність структури крохмального зерна обумовлюється наявністю в ньому численних зв'язків, що поєднують між собою розміщені одна біля одної молекули. Крохмаль має підвищену чутливість до різноманітних зовнішніх чинників і тому легко змінює свою структуру. Відомо, що вода, яка взаємодіє з іонами та іонними групами, має найвищий ступінь зв'язку в харчових продуктах. Так, велика кількість груп –ОН в молекулі крохмалю свідчить про його податливість до утворення водневих зв'язків (Misra et al., 2011). Оскільки під дією контактної нерівноважної плазми вода змінює свою структуру, то цілком вірогідним є підвищення адсорбційної здатності крохмалю і, як наслідок, збільшення кількості міцно зв'язаної вологи в хлібобулочних виробках.

Протягом зберігання хліба вміст зв'язаної вологи в його мікропорах підвищується, як показують результати досліджень, у межах 6 – 9 % (табл. 3.7). Заповнення мікропор вільною вологою і перехід її у зв'язаний стан можливо пояснити виникненням водневих зв'язків між молекулами води і складовими компонентами хліба.

Таблиця 3.6. Параметри форм зв'язку вологи в м'якушці хліба після 24 годин зберігання

Форма зв'язку вологи	Кількість вологи, %	Температура видалення, °С	
		інтервал	пік
Вільна волога:	<u>83,6</u>	<u>20–121</u>	-
	79,6	20–116	-
механічно зв'язана	<u>47,6</u>	<u>20–101</u>	-
	40,7	20–90	-
осмотично зв'язана	<u>36,0</u>	<u>101–121</u>	<u>120</u>
	38,9	90–116	116
Зв'язана (адсорбційна) волога	<u>16,4</u>	<u>121–150</u>	-
	20,4	111–250	-

Примітка: значення над рискою – показник для контрольного зразка,  
під рискою – для дослідного.

Аналогічні явища описані в роботі (Миколенко та ін., 2014), в якій запропоновано декілька варіантів міграції вологи, наприклад, шляхом ланцюгового механізму з утворенням водневих містків, які міцно утримуються в капілярно-му просторі. Крім того, в хлібі також залишається присутньою вода з підвищеною рухливістю, яка, можливо, утримується в капілярах без утворення будь-яких водних містків. Така волога в першу чергу може бути видалена нагріванням і зафіксована методом диференціально-термічного аналізу у вигляді вільної вологи.

Таблиця 3.7. Параметри форм зв'язку вологи в м'якушці хліба після 72 годин зберігання

Форма зв'язку вологи	Кількість вологи, %	Температура видалення, °С	
		інтервал	пік
Вільна волога:	<u>75,0</u>	<u>20–110</u>	-
	72,9	20–110	-
механічно зв'язана	<u>41,7</u>	<u>20–90</u>	-
	38,3	20–90	-
осмотично зв'язана	<u>33,3</u>	<u>90–110</u>	<u>110</u>
	34,6	90–110	109
Зв'язана (адсорбційна) волога	<u>25,0</u>	<u>110–250</u>	-
	27,1	110–250	-

Примітка: значення над рискою – показник для контрольного зразка,  
під рискою – для дослідного



Результати досліджень показали зниження частки вологи, яка має найбільшу молекулярну рухомість, в м'якушці хліба після 72 год зберігання (табл. 3.7). Для хліба на основі розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, вміст механічно зв'язаної вологи на 3–4 % менший у порівнянні з хлібом, виготовленим за традиційною технологією. Щодо осмотично зв'язаної вологи, спостерігається тенденція до зниження її вмісту протягом всього терміну зберігання виробів. У роботах (Morgalev et al., 2010; Миколенко та ін., 2016) доведено, що для хліба характерною є втрата вологи денатурованою клейковиною з подальшим її поглинанням крохмалем. Відзначимо, що кількість осмотично зв'язаної вологи залишається підвищеною для виробів, виготовлених з використанням розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, порівняно з контрольними зразками на магістральній воді без додаткової обробки. Отже, застосування плазмохімічно активованих водних розчинів сприяє посиленню гідратаційних зв'язків у білковій фракції хлібної м'якушки.

Для дослідних зразків уміст адсорбційно зв'язаної вологи після 72 год зберігання хліба залишається підвищеним на 2–3 % порівняно з контрольними зразками. Очевидно, що за рахунок використання плазмохімічно активованих водних розчинів відбувається деяке затримання процесів молекулярного переміщення вологи всередині виробу. Відомо, що під час зберігання хліба, ступінь рухливості вільної вологи в ньому зростає, а зв'язаної, міцно асоційованої з біополімерами, навпаки, знижується (Noncharova, 2015). Слід вважати, що у виробу, виготовленому за традиційною технологією, за рахунок підвищеної рухливості води під час зберігання хліба відбувається перехід молекул води вздовж ланцюжків крохмальних полімерів, що сприяє утворенню додаткових зв'язків між ними та набуття м'якушкою структурної жорсткості. Для хлібопекарських виробів на основі плазмохімічно активованих водних розчинів, рухливість води стає зниженою, що сприяє подовженню терміну зберігання ними свіжості.

Споживчі характеристики хлібопекарської продукції, зокрема їх фізико-хімічні та органолептичні показники якості, безпосередньо пов'язані зі станом

складових виробів на мікроструктурному рівні. Для хліба з пшеничного борошна основними структурними компонентами є білок, крохмаль і вода, які під дією чинників різної природи підлягають складним перетворенням та змінюють свої властивості. Наявність води і дія температурного фактору викликають денатурацію гідратованої під час дозрівання тіста клейковини і часткову клейстеризацію зерен крохмалю. Волога протягом бродіння напівфабрикату по-різному поглинається біополімерами борошна і характер її перерозподілу між крохмалем та білком при зберіганні хліба має ряд особливостей. Зокрема, у разі використання плазмохімічно активованих водних розчинів замість магістральної води без додаткової обробки, кількість осмотично і адсорбційно зв'язаної біополімерами вологи, як в тісті, так і в хлібі, виготовленому з нього, зростає, а в мікроструктурі тіста спостерігається розгортання білкової матриці та набухання крохмальних зерен.

Мікрофотографії відображають структуру м'якушки хліба після 24 год зберігання, для якої характерною є присутність пор, обмежених міжпоровими стінками (рис. 3.2). Хліб, виготовлений з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів, має більш тонкі міжпорові стінки (40–170 мкм) порівняно з виробом на основі магістральної води (50–250 мкм). Поверхню міжпорових стінок утворює маса коагульованого білка в поєднанні з клейстеризованим крохмалем. Відзначимо, що для хліба, як складної гетерогенної системи, клейстеризація крохмалю – найбільш суттєве перетворення, що відрізняє структуру тіста і виробу з нього. Відомо, що основна частина крохмальних зерен (92–94 %) у випеченому хлібі є деформованими і зруйнованими (Гончарова, Пугач, 2016).

Для хліба, виготовленого з використанням магістральної води, мікроструктура формується крохмально-білковою матрицею, в якій закріплені зерна крохмалю, що мають сплющений і складчастий характер (рис. 3.2,в). Підкреслимо, що в такій структурі присутні повітряні прошарки товщиною до 15 мкм.

При застосуванні плазмохімічно активованих водних розчинів м'якушка хліба включає деформовані, дещо витягнуті зерна крохмалю з втраченою гра-

нулярною формою, що з усіх сторін оточені масою коагульованого білка (рис. 3.2 *з*). Тому структура такого хліба є суцільною, без прошарків і чіткої межі між окремими складовими. Очевидно, що відмінності в мікроструктурі дослідного і контрольного зразків обумовлені підвищенням осмотичного набухання білків, активним адсорбційним поглинанням вологи крохмалем у випадку використання плазмохімічно активованих водних розчинів.

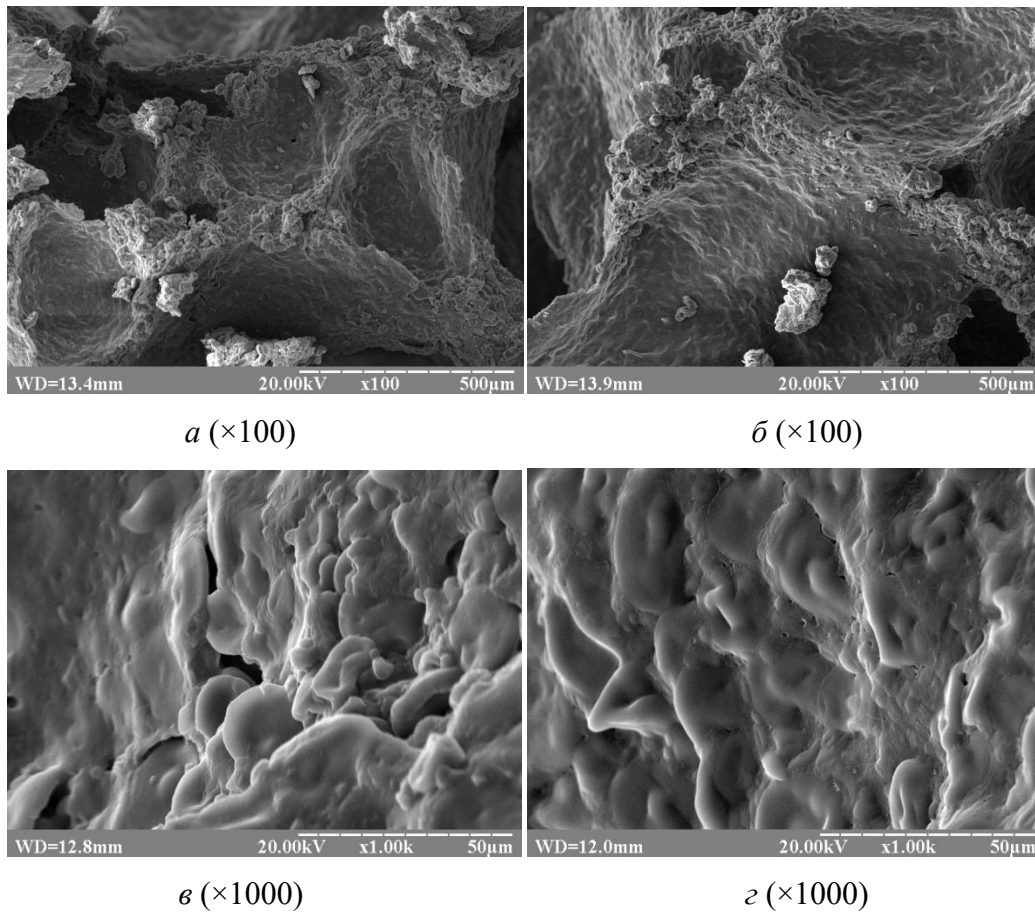


Рис. 3.2. Мікроструктура хліба на основі звичайної питної води (*а, в*) та плазмохімічно активованих водних розчинів (*б, з*) після 24 годин зберігання

За тривалого зберігання хліба відбувається зміна його органолептичних та фізико-хімічних властивостей. Зокрема, внаслідок черствіння м'якушка хліба ущільнюється, що в свою чергу залежить від її структури, вмісту білка, рівня клейстеризації крохмалю та перерозподілу вологи між компонентами. Особливості пористої структури хліба після 72 год зберігання ілюструє рис. 3.3.

У виробі на основі магістральної води без додаткової обробки присутня значна кількість повітряних прошарків, міжпорові стінки мають розпушену структуру, в якій зерна крохмалю є чітко відокремленими одне від одного (рис. 3.3,*a*). Для хліба, виготовленого з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів, міжпорові стінки складаються з аморфної суцільної маси (рис. 3.3,*б*). Підкреслимо, що для контрольного зразка протягом його зберігання стан крохмалю і крохмалепротеїнової матриці змінюється суттєво. Відображена на рис. 3.3,*в* поверхня пор має численні вигини та бугриста за своєю структурою. Водночас матриця, сформована клейстеризованим крохмалем і білком, стає більш компактною порівняно з аналогічним за рецептурою свіжим хлібом. У результаті її згортання в структурі м'якушки присутні розриви значної довжини (понад 50 мкм). Очевидно, що такі утворення і викликають підвищення крихкості виробів та погіршення їх реологічних характеристик. На відміну від контрольного зразка, у хлібі на основі плазмохімічно активованих водних розчинів поверхня пор залишається цілісною і не містить повітряних прошарків (рис. 3.3,*г*). Для клейковинної матриці, в яку щільно упаковані зерна крохмалю, спостерігається незначне послаблення її структури, що, очевидно, пов'язано зі зниженням долі осмотично зв'язаної вологи в системі.

Таким чином, мікроструктура хліба для дослідного і контрольного зразків після 72 год зберігання відрізняється за станом крохмальних зерен. При використанні магістральної питної води вони мають більш високий рівень складчастості, що вказує на поглиблення процесів ретроградації крохмалю, тоді як застосування водних розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, сприяє збереженню форми таких включень аналогічно їх стану в свіжому хлібі.

Споживчі якості хлібобулочних виробів у період зберігання обумовлюються не лише процесами черствіння. Найчастіше кінцевий термін споживання продуктів пов'язаний з їх мікробіологічним псуванням. Нині найбільш поширеною формою мікробіологічного ушкодження хліба є його пліснявіння, збудниками якого можуть виступати десятки видів мікроскопічних грибів. Найбільш часто на поверхні виробів зустрічаються представники родів *Mucor*, *As-*

*pergillus*, *Penicillium* і *Rhizopus* (Коротков, 2007). Деякі з цих мікроорганізмів здатні продукувати афлотоксини В1, В2, А, охратоксин А, цитринин, патулін, пеніцилову кислоту та інші речовини, які викликають харчові отруєння і тяжкі захворювання людини (Vainshelboim et al., 2005; Пат. UA Україна 111577 ..., 2016).

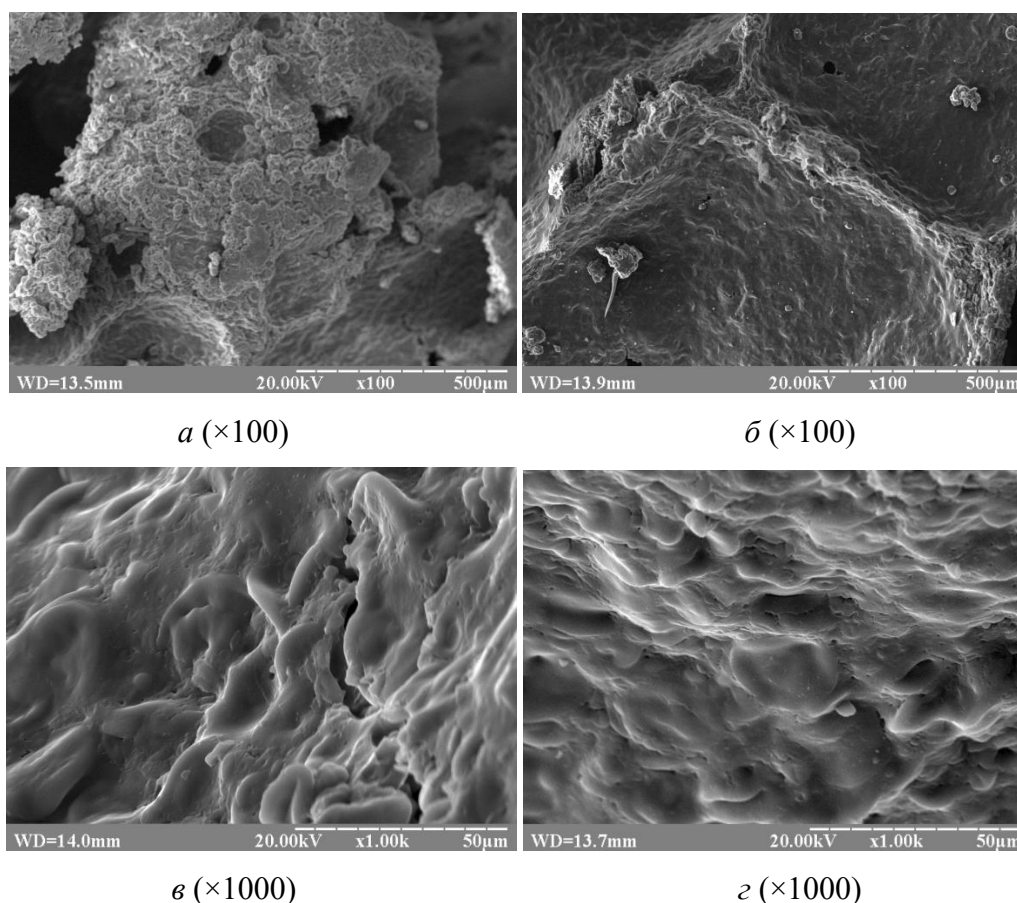


Рис. 3.3. Мікроструктура хліба на основі звичайної питної води (а, в) та плазмо-хімічно активованих водних розчинів (б, з) після 72 год зберігання

Для пліснявих грибів сприятливим для розвитку є широкий діапазон температур від 5 до 50 °С, однак інтенсивність їх розмноження максимальна при 25–35 °С. Підвищена відносна вологість середовища під час зберігання хліба також позитивно впливає на їх життєдіяльність. Вважається, що спори плісеневих грибів під час випікання хлібобулочних виробів гинуть, а зараження продукції відбувається мікроорганізмами, що містяться в оточуючому середовищі,

під час підсумкових технологічних етапів виробництва хліба – його охолодження та пакування (Методика визначення гострості ..., 1997). Однак в інших роботах наведено дані щодо тісного взаємозв'язку мікробіологічної стійкості хліба та ступеня зараженості борошна мікроорганізмами (Shields, 2001; Коротков, Яковлева, 2014).

Серед асортименту хлібобулочних виробів хліб має найбільший вміст вологи, хоча, в його складі за рецептурою відсутні речовини, наприклад, моносахариди, здатні знижувати відносну рівноважну вологість продукту та стримувати розвиток мікроскопічних грибів. Тому задля забезпечення мікробіологічної стійкості хліба ефективним є застосування таких консервантів, як пропіонова, оцтова кислоти, їх солі та інші речовини штучного походження. Найчастіше внесення таких компонентів не лише пригнічує життєдіяльність корисної мікрофлори тіста, уповільнюючи процеси його дозрівання та збільшуючи тривалість загального виробничого циклу, а і може негативно відобразитися на здоров'ї людини при споживанні виробів з їх використанням.

Плазмохімічно активовані водні розчини містять у своєму складі пероксидні і надперекисні сполуки, які за рахунок дрібнокластерної структури води здатні глибоко проникати не лише в складові компоненти хлібобулочних виробів, а і крізь мембрани мікробіологічних клітин. Пригнічення життєдіяльності хвороботворних мікроорганізмів під впливом розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, було підтверджено низкою досліджень (табл. 3.8). Отримані результати підтверджують, що в разі використання магістральної води без додаткової обробки видимий міцелій на поверхні хліба з'являється на 3 доби раніше порівняно з виробами, виготовленими на основі плазмохімічно активованих водних розчинів. Очевидно, що пригнічення життєдіяльності плісневих мікроорганізмів під час використання розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, з одного боку, пов'язане з їх здатністю чинити антисептичний вплив на мікрофлору складових компонентів продукту. З іншого боку, внаслідок дрібнокластерної структури таких розчинів, виготовлених на їх основі хліб містить більше зв'язаної вологи порівняно з контролем. Відомо, що

рівень рухливості води визначає її здатність брати участь у фізико-хімічних процесах та сприяти розвитку мікроорганізмів. За наявності високого осмотичного тиску в продуктах розвиток мікроорганізмів блокується в результаті зневоднення їх клітин. Тобто у випадку переходу молекул води у зв'язаний стан відбувається затримання процесу пліснявіння хлібобулочних виробів.

Таблиця 3.8. Стійкість хлібобулочних виробів до пліснявіння

Тривалість зберігання, діб	Оцінка мікробіологічного ушкодження плісневими грибами хліба, виготовленого з використанням	
	магістральної води без додаткової обробки	плазмохімічно активованих розчинів
1–5	-	-
6	+	-
7	+	-
8	+	-
9	+	+

Поряд з пліснявінням найбільш поширеним видом мікробіологічного псування хлібопекарської продукції із пшеничного борошна є картопляна хвороба хліба, яка є наслідком життєдіяльності спороутворюючих бактерій *Bacillus subtilis*. Уражений такими мікроорганізмами продукт може спричинити харчові отруєння людини. Борошно завжди містить деяку кількість таких бактерій та їх спор, тому з основною сировиною вони потрапляють в готові вироби. Останнім часом спостерігається зниження мікробіологічної чистоти борошна, що пов'язано порушенням агротехнічних заходів при вирощуванні зерна, недостатнім рівнем очищення зерна перед помелом, зокрема, фактичною відсутністю в підготовчому відділенні борошномельних заводів операції вологого очищення його поверхні. Зниженню мікробіологічної стійкості хліба до картопляної хвороби сприяє також те, що переважна кількість виробів на сьогодні постачається на ринок упакованими в полімерні матеріали.

Для запобігання розвитку *Bacillus subtilis* в хлібопекарській продукції використовують ряд технологічних заходів, серед яких найбільш популярними є застосування підкислюючих напівфабрикатів (закваски, рідкі дріжджі) та хар-

чових добавок хімічного та мікробіологічного походження (пропіонова, оцтова, молочна кислоти та їх солі; селектин, нізин, гідрохлорид лізину та ін.). Однак використання додаткових компонентів підвищує собівартість продукту та може негативно впливати на споживчі якості готових виробів внаслідок підвищення їх кислотності.

Результати експериментальних досліджень впливу плазмохімічно активованих водних розчинів на розвиток картопляної хвороби відображено в табл. 3.9. Аналіз отриманих даних підтверджує, що застосування плазмохімічно активованих водних розчинів пригнічує життєдіяльність споруутворюючих бактерій, стримує розвиток картопляної хвороби хліба на 50 % порівняно з використанням магістральної води без додаткової обробки.

Таблиця 3.9. Вплив плазмохімічно активованих водних розчинів на розвиток картопляної хвороби хліба

Тривалість зберігання, година	Ступінь розвитку картопляної хвороби хліба, виготовленого з використанням			
	магістральної води без додаткової обробки		плазмохімічно активованих розчинів	
	оцінка, бал	наявні ознаки	оцінка, бал	наявні ознаки
24	0	ознаки відсутні	0	ознаки відсутні
36	0	ознаки відсутні	0	ознаки відсутні
39	5	поява незначного запаху	0	ознаки відсутні
44	20	слабкий запах, липка м'якушка	5	поява незначного запаху
48	30	різкий запах, липка м'якушка	5	незначний запах

Відзначити, що такий ефект не обумовлений зміною кислотності продукту, як у випадку застосування традиційних методів запобігання розвитку *Bacillus subtilis*, а викликаний антисептичним впливом водних розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, на негативну мікрофлору борошна під час



тістovedення в результаті наявності стійкого пероксиду водню та дрібнокластерної структури плазмохімічно активованих водних розчинів.

Таким чином, застосування для виготовлення хліба плазмохімічно активованих водних розчинів замість магістральної питної води без додаткової обробки за умови використання пшеничного борошна зі зниженими хлібопекарськими властивостями без внесення додаткових поліпшувачів штучного походження дозволяє покращити характеристики якості продукції: питомий об'єм хліба зростає на 6–23 %, формостійкість – на 20–35 %, поліпшується пористість на 4–6 % порівняно з хлібом, виготовленим за традиційною технологією. При цьому органолептичні властивості хліба на основі плазмохімічно активованих водних розчинів залишаються на високому рівні.

Експериментально підтверджено, що використання розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, запобігає черствінню хлібопекарських виробів: під час зберігання сповільнюється процес втрати вологи м'якушкою хліба, знижується крихкість виробів на 2–4 % та підвищуються гідрофільні властивості м'якушки на 11–14 % ніж у контролі.

Термогравіметричним методом встановлено, що хліб на основі розчинів, підданих дії контактної нерівноважної плазми, має підвищений вміст зв'язаної вологи: залежно від тривалості зберігання кількість в ньому вологи, поглинутої білками, зростає на 1–3 %, а частка адсорбційної вологи збільшується на 2–6 % порівняно з виробом, виготовленим з використанням магістральної води без додаткової обробки. Водночас кількість механічно зв'язаної вологи, яка має найбільшу молекулярну рухливість, зменшується в м'якушці хліба до 3–6 %.

Пориста структура пшеничного хліба, виготовленого з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів, має більш тонкі міжпорові стінки (40–170 мкм) порівняно з контрольним зразком (50–250 мкм). Мікроструктура таких виробів є суцільною, без прошарків та чіткої межі між складовими. На відміну від контрольного зразка на основі магістральної води, через 72 год збе-

рігання мікроструктурні характеристики виробів майже не змінюються порівняно з початковими етапами зберігання хліба.

Мікробіологічне псування пшеничного хліба в разі використання плазмохімічно активованих водних розчинів затримується внаслідок пригнічення життєдіяльності плісневих мікроорганізмів та розвитку картопляної хвороби в 1,5 рази, що дозволяє збільшити термін споживання виробів у 1,3–1,5 рази порівняно з хлібом, виготовленим за традиційною технологією.

### **3.3. Біотестування плазмохімічно активованої води як харчової сировини**

Вода виконує важливу фізіологічну роль для живих організмів та виступає основним активатором мікробіологічних, біохімічних та фізико-хімічних процесів у технологіях виробництва харчової і кормової продукції. Регуляція властивостей води дозволяє впливати на хід технологічного процесу (Xiaolei et al., 2013) і здатна визначати активність взаємодії водного середовища з окремими молекулами, ферментами, складними біополімерними структурами, збільшувати проникність мікрокапілярів та забезпечувати зміни й взаємодію компонентів систем на наноструктурному рівні. Використання фізико-хімічних методів обробки води є досить перспективним, оскільки за рахунок такої попередньої підготовки води можна змінити направленість її характеристик, ураховуючи потреби виробництва (Korotkov et al., 2010; Garvey et al., 2013). Серед відомих методів обробки води комплексного спрямування увагу привертає використання контактної нерівноважної низькотемпературної плазми (Martínez-Huitle, Brillas, 2008; Murielle et al., 2010; Pivovarov et al., 2015). Оскільки вода є основною складовою живих організмів, то суттєва зміна її властивостей потребує комплексної оцінки реакції тест-об'єктів для оцінки сукупної дії плазмохімічно активованої води на системи живих організмів.

Останнім часом все більшого значення набувають методи прямої оцінки токсичності водного середовища за допомогою біоіндикаторів. Актуальність

використання біологічних об'єктів для біо- і фітотестування полягає, передусім у специфічній здатності організаційної системи таких об'єктів рефлексувати на широкий спектр чинників різної природи (Верголяс, Гончарук, 2016). Оцінка біологічної рефлексії нетрадиційних методів обробки харчової сировини, зокрема використання хімії високих енергій для регулювання характеристик води, можлива з використанням методу газорозрядної візуалізації, за допомогою якого дослідники визначали антиоксидантний статус рослин в умовах токсичної дії, оцінювали якість лікарських препаратів, біологічно активних добавок тощо (Масленников и др., 2013). У свою чергу поєднання декількох експрес-методів зробило можливим надання дослідженням комплексності та набуде науково-практичного значення, оскільки вивчення фізіологічного стану об'єкта біотестування на тлі використання різних чинників передбачає здійснення цілої ланки послідовних досліджень.

Нетрадиційні методи обробки сировини в технологіях виробництва харчової і кормової продукції набувають все більшої популярності серед населення завдяки їх можливості нівелювати негативні фактори впливу щодо формування якості кінцевого продукту протягом технологічного процесу (Malik, 2010). До того ж, переваги створення екопродуктів, які не передбачають використання штучних поліпшувачів та потенційно небезпечних для людини інгредієнтів, є очевидними з точки зору кінцевого споживача, орієнтованого на здорове харчування (Huang et al., 2008; Pelletier et al., 2013). При цьому має зберігатися параметр економічної ефективності процесу за умови забезпечення мінімального навантаження на навколишнє середовище.

Застосування контактної нерівноважної низькотемпературної плазми для обробки води і водних розчинів входить до переліку сучасних способів підготовки, які мають потенційні переваги щодо використання в різних галузях промисловості, зокрема, в агропромисловому комплексі та виробництві харчової і кормової продукції. За рахунок плазмохімічної обробки вода набуває високої проникної здатності через утворення дрібнокластерної структури та появи додаткових можливостей щодо взаємодії із структурними компонентами (Півова-

ров та ін., 2012). Залежно від потреб виробничого процесу можливим є підтримання потрібних параметрів активної кислотності середовища (Abdulsudi et al., 2011). Окремою характеристикою води, підданої дії контактної нерівноважної плазми, виступає наявність у її складі активного кисню у формі пероксидних і надперекисних сполук, забезпечуючи її антисептичні властивості. Підготовлена в такий спосіб вода, здатна пригнічувати патогенні та умовно-патогенні мікроорганізми (Миколенко та ін., 2014). Відомим є також факт позитивного впливу плазмохімічно активованої води на хлібопекарські пресовані дріжджі, які за відсутності змін морфологічних властивостей та затримки росту мікробіологічної культури показали збільшення кількості життєздатних клітин *Saccharomyces cerevisiae* за умови культивування з водою, підданою дії контактної нерівноважної плазми (Mykolenko et al., 2014).

Дослідженнями підтверджено ефективність застосування плазмохімічно активованої води в різних харчових технологіях, зокрема для виробництва хлібопекарської продукції (Misra et al., 2011; Миколенко та ін., 2016). Такий технологічний підхід робить можливим одержання якісного продукту з високими споживчими якостями та підвищеною мікробіологічною стійкістю без використання штучних поліпшувачів.

Реакція живих організмів на досліджуваний фактор впливу має змогу відображати ефективність використання компонентів харчового ланцюга з огляду на біохімічний ефект та зміни характеристик об'єктів біотестування (Morgalev et al., 2010).

Незважаючи на прикладні результати і очевидну доцільність використання плазмохімічно активованої води для виробництва продукції харчового і кормового профілю, наразі є фактично відсутніми експериментальні дослідження, що розкривають вплив такої води на біологічні об'єкти з огляду на можливість появи близьких і віддалених наслідків щодо дії на їх біологічні функції.

Визначення токсичності досліджуваної проби засноване на здатності тест-об'єктів реагувати на присутність у водному середовищі речовин, які можуть негативно позначатися на їх життєдіяльності. В Україні сьогодні відбува-

ється гармонізація біотехнологічних методів, національного законодавства та стандартів зі сучасними міжнародними вимогами. Акцент має той чинник, що здійснення контролю за виробництвом продукції має відбуватися протягом усього харчового ланцюга (Noncharova, 2015; Гончарова, Пугач, 2016). Уже існуючі методи дещо поступаються сучасним, оскільки останні є більш інформативними, здійснюються в більш стислі строки і дозволяють на тлі отримання високої якості продукції досягти ресурсозберігаючого ефекту. В літературних наукових джерелах є інформація щодо використання таксонів *Decapoda*, *Paramecium caudatum*, де показник токсичності досліджуваного об'єкта визначається рівнем зміни певних параметрів функціональної системи життєдіяльності організмів за допомогою біофізичних, фізіологічних, мікроскопічних методів або шляхом візуалізації (Коротков, 2007; Korotkov et al., 2010). У деяких роботах газорозрядна візуалізація (ГРВ) демонструє можливості отримання вірогідних результатів тестування об'єктів різної природи в експрес-режимі (Коротков, 2007; Vainshelboim et al., 2005). При цьому поширення набуває визначення біопотенціалу об'єкта під час діагностики фізіологічного статусу організму людини, при дослідженні ГРВ-грам різної структури води (Vainshelboim et al., 2005). У міжнародній практиці агропромислового комплексу така практика є мало застосовуваною і фактично відсутньою у вітчизняному секторі. Наприклад, є відносно невеликий досвід використання методу інтерпретації ГРВ-грам при визначенні біопотенціалу продукції у тваринництві (Пат. UA Україна 111577 ..., 2016).

У доступній літературі представлені результати досліджень, що свідчать про ефективність фітотестів при визначенні рівня екологічної безпеки впливу чинників довкілля, вивченні токсичності певної речовини (Morgalev et al., 2010). Наприклад, якість питної води формується певним чином під впливом саме таких чинників. Але в повному обсязі в літературі відсутня інформація щодо здійснення науково-практичних експериментів з використанням фітоіндикаторів для визначення токсичності води, підданої дії контактної нерівноважної плазми. Саме в цьому напрямку обрана тематика досліджень є актуальною

та набуває науково-практичної цінності в галузі сільського господарства і харчової промисловості.

Під час досліджень використовували магістральну воду без додаткової обробки і воду, піддану дії КНП, з характеристиками, що наведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10. Характеристики магістральної та плазмохімічно активованої води

№ зразка групи	Тривалість дії КНП на воду, хв	Концентрація пероксидних сполук, мг/л	pH води	Окисно-відновний потенціал, мВ
1-магістральна без додаткової підготовки	–	–	7,2	235
2-плазмохімічно активована магістральна вода	10	100	9,7	135
3-плазмохімічно активована магістральна вода	30	500	10,1	101

Обробку води контактною нерівноважною плазмою проводили в лабораторії плазмохімічних технологій ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет” на лабораторній установці дискретного типу з об’ємом реактора 0,1 дм<sup>3</sup> (рис. 3.4).

Для контрольних тест-груп біологічних об’єктів використовували питну воду міської магістралі м. Дніпро.

Резистентність об’єктів біотестування (структура води, температура, хімічний склад та ін.) впливає передусім на їх характер руху, швидкість, частоту розворотів, різноманітні таксиси, тобто позначається на їх поведінці в тестованому середовищі. *Paramecium caudatum* широко використовується для оцінки хронічної токсичності медичних препаратів та харчових добавок (Верголяс, Гончарук, 2016). В усіх досліджуваних групах ступінь виживання інфузорій становила 87,0–89,5 % - рис. 3.5.

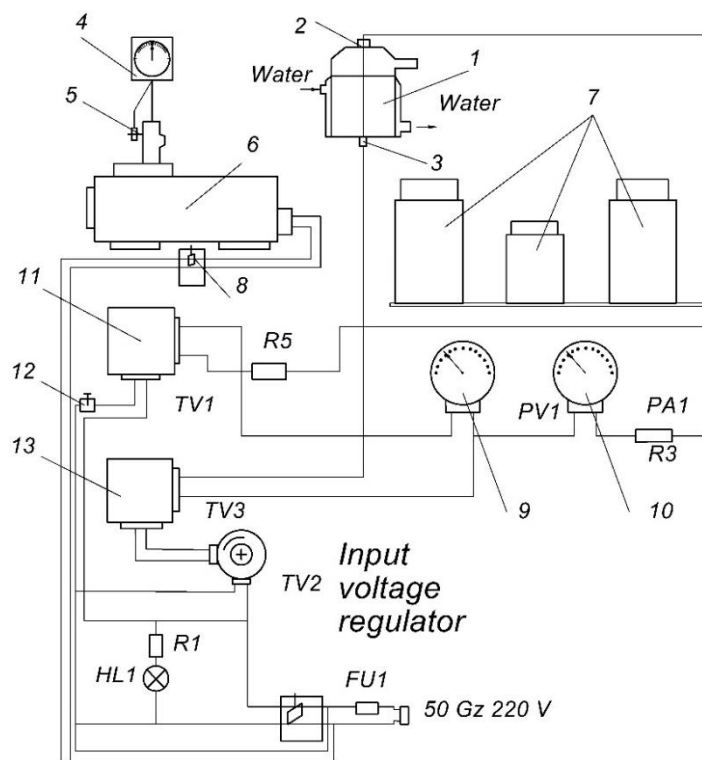


Рис. 3.4. Схема установки для плазмохімічної обробки води:

1 – реактор; 2, 3 – електроди; 4 – вакуумметр; 5 – кран; 6 – насос; 7 – фільтруючі елементи; 8 – вимикач; 9 – вольтметр; 10 – амперметр; 11 – трансформатор підпалу; 12 – вимикач; 13 – трансформатор напруги

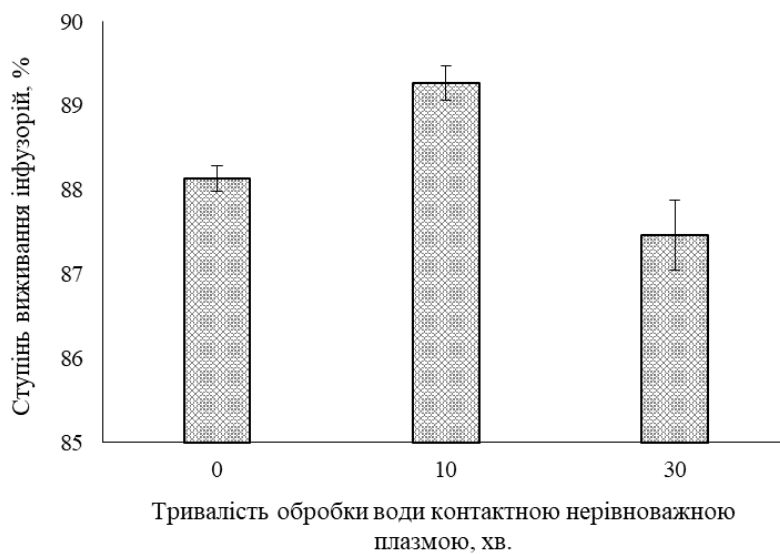


Рис. 3.5. Вивчення показника токсичності *Paramecium caudatum*

При цьому в дослідній групі 1, де одноклітинні організми культивувалися в середовищі води, підданій дії контактної нерівноважної плазми протягом 10 хв, тестована речовина відповідала класу «нетоксична». Аналогічно для дослідної групи організмів, що виступали тест-об'єктами для плазмохімічно активованої води з концентрацією пероксидних сполук 500 мг/л, цей показник був дещо нижчим, але також відносився до класу «нетоксичний».

*Artemia salina* є високочутливим гідробіонтом, яка застосовується в аквакультурі як природний корм для риб. Такі організми особливо чутливі до змін водного середовища під час вилуплення науплій. Параметри гідрохімічного режиму корегують їх вилуплення та життєву активність. Культивування науплій артемій у середовищі плазмохімічно активованої води свідчило про зміну показника їх вилуплення, рівня здатності зберігати життєву активність, рухливість в перші дні життя після вилуплення. Зокрема, значно вищий рівень вилуплення спостерігався при культивуванні *Artemia salina* у воді, попередньо підданій дії контактної нерівноважної плазми (рис. 3.6). У випадку використання плазмохімічно активованої води з концентрацією пероксидних сполук у кількості 500 мг/л кількість життєздатних організмів зростала на 60–70 % порівняно з використанням магістральної води без попередньої обробки.

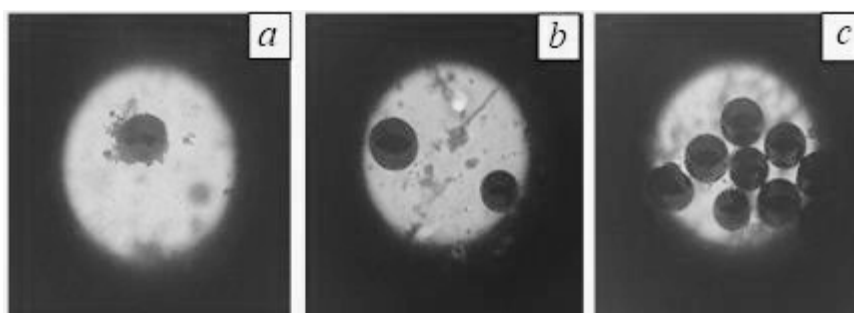


Рис. 3.6. Функціональний статус науплій *Artemia salina*, культивованої у воді, підданій дії контактної нерівноважної плазми протягом, хв:

*a* – 0, *b* – 10, *c* – 30.

Фітопланктон *Riccia fluitans* і *Lémna minor* L. є безпосередніми складовими екосистеми. Оскільки природним середовищем існування фітопланктону є



вода, то надзвичайно важливу роль відіграє і гідрохімічний стан. При культивуванні ряски малої та річчії у середовищі плазмохімічно активованої води встановлені відмінності в тенденціях розвитку фітопланктону залежно від тривалості обробки води. Результати виміру біометричних показників культури ряски малої показали, що довжина корінців ( $L_{max}$ ) в контрольній групі була найменшою порівняно зі згаданим показником у дослідних групах. Результати впливу на ряску плазмохімічно активованої води, обробленої протягом 30 хв (дослідна група 2), відрізнялися від даних контролю вірогідно, на відміну від дослідної групи 1, яка лише мала тенденцію до збільшення контрольованого показника. Інтенсивність розвитку кореневої системи тест-об'єктів зростала на 7–12 і 28–39 % порівняно з контрольною групою у випадку використання води, підданої дії плазми 10 і 30 хв, відповідно (рис. 3.7). Підкреслимо, що відмічалося зниження інтенсивності забарвлення фітопланктону в дослідних групах, а значення фітотоксичного ефекту для таких груп не перевищувало 20 %, тоді як для контролю цей показник становив 30 %.

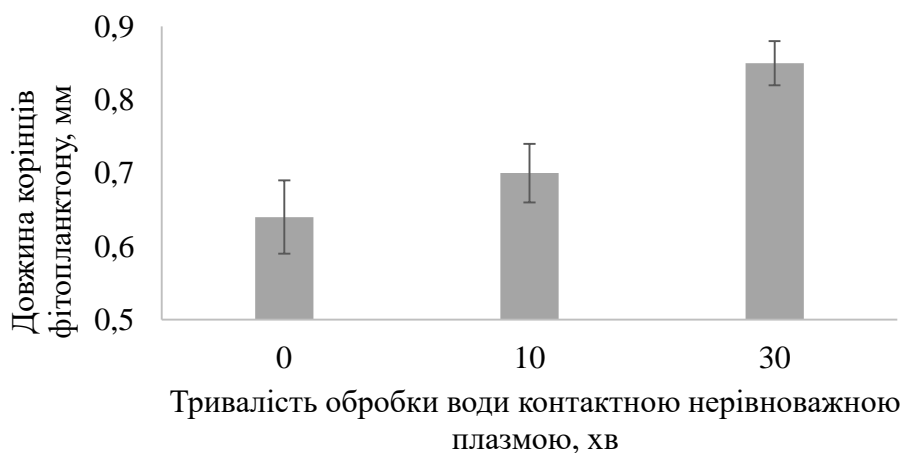


Рис. 3.7. Вплив плазмохімічно активованої води на культуру *Lemna minor L*

Короп лускатий *Cyprinus carpio* за своєю природою належить до складно організованих гідробіонтів, які мають трофічну пластичність. Ця риба живиться різними формами зоопланктону і є добре адаптованою до споживання комбікорму. Фізіологічний стан і розвиток даних гідробіонтів перебуває у прямій зале-

жності від екологічних умов вирощування, зокрема водної екосистеми. Включення до кормового раціону цьоголіток лускатого коропа артемій як живого корму та введення до його складу ряски і річчії, попередньо культивованих у плазмохімічно активованій воді, приводило до прискорення росту риб в онтогенезі та позначалося на ступені виживання гідробіонтів (рис. 3.8). Показник швидкості росту в онтогенезі дослідної групи 2 був найвищим і на 2 % перевершував значення в контрольній групі за перший тиждень досліджень, тоді як у дослідній групі 1 ця різниця становила лише 1,5 % відносно контрольної групи.

Порівнюючи масу тіла *Cyprinus carpio* наприкінці третього тижня, було виявлено, що в дослідних групах 1 і 2 особини мали вищі значення порівняно з контрольною групою на 3,5 та 6,3 %, відповідно. Для всіх досліджуваних зразків кількість екземплярів коропа, що залишалися життєздатними, знижувалася в середньому на 33 % порівняно з першим тижнем досліджень. У дослідних групах 1 і 2 риба мала на 13 та 8 % вищий показник порівняно з контролем через два і три тижні експерименту, відповідно.

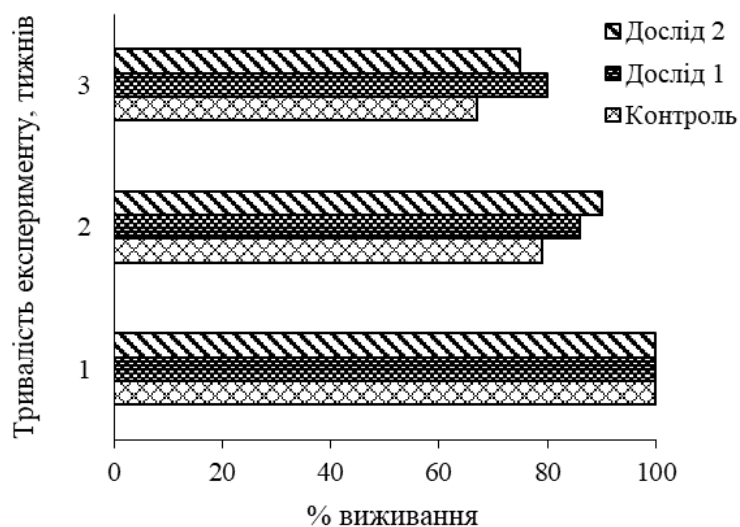


Рис. 3.8. Виживання *Cyprinus carpio* залежно від культивованого середовища і особливостей раціону,  $n = 6$

Використання газорозрядної діагностики при вивченні біопотенціалу плазмохімічно активованої води дозволило більш об'єктивно проаналізувати її характеристики. При обробці результатів враховували, що газовий розряд, що виникає під час аналізу проби, чинить вплив на стан об'єкта дослідження, викликаючи вторинні емісійні і теплові процеси (Коротков, Яковлева, 2014). Приймач випромінювання перетворює просторовий розподіл освітленості в зображення, аналіз якого приводить до формування набору параметрів. Серед чималої кількості параметрів, які були оброблені програмним забезпеченням, нами були відібрані основні за критерієм цифрового значення: ентропія і площа випромінювання у двох проекціях. Показники правої і лівої проекції контрольного і дослідного зразків показали вірогідну різницю між собою у випадку аналізу зразка води, підданого дії плазми протягом 30 хв (табл. 3.11). Різниця результатів дослідження між магістральною водою без додаткової обробки і водою, що оброблялася плазмою 10 хв, знаходилася в межах похибки вимірювань.

Таблиця 3.11. Результати визначення біопотенціалу води

Показник	Тривалість обробки води контактною нерівноважною плазмою, хв		
	0	10	30
Права проекція, ентропія	3,8±0,027	3,8±0,039	3,6±0,028
Ліва проекція, ентропія	4,0±0,066	4,1±0,086	3,3±0,036
Права проекція, площа	17123±41,1	17869±41,3	18250±35,1
Ліва проекція, площа	16164±65,1	16354±65,7	19987±54,9

Як видно з наведених у табл. 3.11 даних, плазмохімічно активована вода збільшеної до 30 хв тривалості експозиції має знижений порівняно з контрольним зразком показник ентропії.

За допомогою програмного забезпечення “GDV Capture” зафіксовано інтенсивність випромінювання на ГРВ-грамі (рис. 3.9): форма «корони світіння» та її площа після обробки води контактною нерівноважною плазмою зменшується. Вода, піддана дії контактної нерівноважної плазми, характеризувалася

вищими променями випромінювання та мала більш широкий спектр, що свідчить про підвищення її біопотенціалу порівняно з контролем.

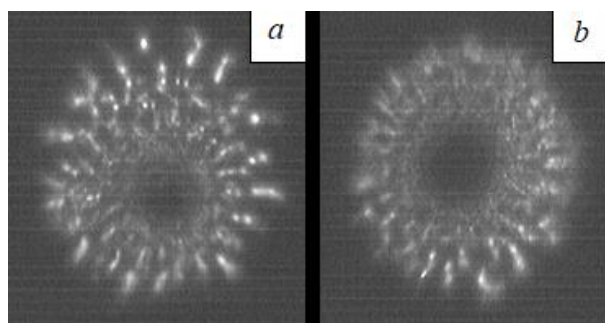


Рис. 3.9. ГРВ-грама біопотенціалу води до (а) та після обробки контактною нерівноважною плазмою (b)

Результати систематичного контролю, візуального спостереження за розвитком двох представників фітопланктону – річчії та ряски малої – показали, що така вода сприяє активації метаболічних процесів в рослинах, зміні їх пігментації. З одного боку, отримані результати надають підстави використовувати оцінку біометричних і цитологічних параметрів фітопланктону в якості індикаторів визначення зміни характеристик води під впливом чинників різної природи – фізичних, хімічних та фізико-хімічних. З іншого боку, виявлена різниця між впливом води без обробки та плазмохімічно активованої води дозволяє відмітити позитивну активуючу дію води, підданої дії контактної нерівноважної низькотемпературної плазми, на інтенсивність розвитку фітопланктону. У доступній літературі в повному обсязі відсутня інформація щодо експериментальних досліджень саме з використанням об'єкта фітотестування та такої води. Тому доцільним, враховуючи позитивні результати, буде розширити спектр досліджуваних показників та продовжити дослідження в цьому напрямі.

Біотестування зоопланктону вказує на можливість використання води, підданої дії контактної нерівноважної плазми, при інкубації науплій артемій як адаптогену та способу підвищення відсотка вилуплення науплій. Подібні експериментальні дослідження з використанням як екосистеми плазмохімічно ак-

тивованої води не проводилися. Тому даний напрям має науково-практичну актуальність, всі підстави й надалі продовжувати експериментальні дослідження. Очевидно, що підвищення рівня вилуплення науплій при культивуванні зоопланктону підкреслює промислове значення як фактор інтенсифікації виробничих процесів (Shields, 2001).

При культивуванні лускатого коропа в контрольній групі з використанням магістральної води без попередньої обробки було встановлено найнижчий відсоток виживання. Водночас загальний функціональний стан організму коропів, які знаходилися у воді, підданої дії контактної нерівноважної низькотемпературної плазми, був зафіксований як вищий, ніж у контрольній групі. В аквакультурі здійснюються дослідження щодо впливу чималої кількості чинників, розчинів, добавок на гідробіонти. Є результати науковців про позитивний вплив таких речовин різної природи; використання запропонованого методу в даній роботі при вирощуванні цьоголіток коропа не відмічено в наукових публікаціях інших авторів.

Виявлений у результаті проведених досліджень вплив плазмохімічно активованої води на життєдіяльність фіто-, зоопланктону та складноорганізованих гідробіонтів – риб – напряму пов'язаний зі зафіксованою зміною біопотенціалу води під впливом дії на неї контактної нерівноважної плазми. Об'єктами ГРВ-діагностики можуть бути біологічна рідина, рослинний або тваринний організм, біологічно активна добавка як компонент харчового продукту тощо. Дослідженнями відзначено суттєві відмінності випромінювання краплі води після фільтрації та зміни агрегатного стану з твердого на рідкий порівняно з магістральною водою (Korotkov et al., 2010). Іншими роботами встановлено, що газорозрядна візуалізація фіксувала зворотно пропорційний зв'язок між фізіологічним станом організму і показником ентропії в результаті проведеного тестування (Коротков, 2007; Коротков, Яковлева, 2014).

Результати проведених нами досліджень вказують на зміну положення одного структурного елементу (молекули води) під впливом чинників фізико-хімічної природи, яким у даному випадку виступає контактна нерівноважна ни-

знькотемпературна плазма. Слід припустити, що це відбувається за рахунок зміни орієнтації молекул, які локалізуються одна поряд з одною, що очевидно виступає додатковим підтвердженням формування дрібнокластерної структури води (Pivovarov et al., 2015). Неоднорідність поверхні і об'єму досліджуваного об'єкта, процеси емісії заряджених частинок впливає та може корегувати певні параметри електромагнітного поля, за рахунок чого змінюються характеристики струму розряду і оптичного випромінювання. Отже, ГРВ-діагностика дозволила встановити підвищення біоенергетичного потенціалу об'єкта тестування експрес-методом, що у свою чергу надає змогу обґрунтувати появу активізуючих функцій води, підданої дії контактної нерівноважної плазми, щодо біологічних об'єктів.

Запропонований комплексний підхід до дослідження та отримані позитивні результати переконують в тому, що надходження до організму гідробіонтів плазмохімічно активованої води не викликає пригнічення їх життєдіяльності, а оброблена в такий спосіб вода здатна виступати як активатор каталітичних процесів, можливо адаптогеном, імуномодулятором, гепатопротектором. Але ж для ствердження такого впливу необхідно розширити дослідження в напрямку визначення перетворень біологічних об'єктів на клітинному рівні. Очевидно, що після обробки води контактною нерівноважною плазмою така вода здатна чинити позитивний вплив на перебіг адаптаційно-компенсаторних механізмів у живих організмів, що в свою чергу позначається на показниках загального функціонального та фізіолого-біохімічного стану.

### **3.4. Висновки**

Таким чином, проведені дослідження впливу плазмохімічно активованої води на функціональний стан тест-об'єктів *Riccia fluitans*, *Létna minor L.*, *Paramecium caudatum*, *Artemia salina* і *Cyprinus carpio* доповнюють уявлення відносно безпечності використання води, підданої дії контактної нерівноважної низькотемпературної плазми, як складової харчового ланцюга.

Відсутність токсичної дії плазмохімічно активованої води на інфузорії *Paramecium caudatum* показує встановлений рівень виживання організмів на рівні 87–89,5 %. Культивування зоопланктону *Artemia salina* у водному середовищі, попередньо обробленого запропонованим способом, дозволяє підвищити кількість життєздатних організмів на 60–70 % порівняно з використанням води без попередньої обробки. Розвиток кореневої системи фітопланктону *Riccia fluitans* та *Lémna mínor L.* під впливом плазмохімічно активованої води демонстрував більшу на 7–39 % інтенсивність, яка додатково зростала зі збільшенням тривалості експозиції води, що очевидно пов'язано з наявністю активного кисню у водному середовищі. При культивуванні цьоголіток *Cyprinus carpio* у середовищі обробленої води виживання і розвиток тест-об'єктів зростали до 13 і 6 % відповідно. Методом газорозрядної діагностики виявлено, що обробка води контактною нерівноважною плазмою протягом 30 хв викликає підвищення її біопотенціалу на відміну від короткочасної експозиції води протягом 10 хв. Тобто результати біотестування поєднані із ГРВ-діагностикою вказують на відсутність токсичного впливу плазмохімічно активованої води на гідробіонти і навіть надають підстави відмітити прояви поліпшення функціональних станів таких тест-об'єктів як *Artemia salina*, *Riccia fluitans* і *Lémna mínor L.*, а у випадку *Cyprinus carpio* потребують проведення додаткових біохімічних і гістологічних досліджень. Отримані результати дослідження доводять практичну цінність поєднання комплексного підходу до біотестування інноваційних методів підготовки сировини.