

Рукопис надійшов: 01.06.2022

Статтю опубліковано: 30.08.2022

УДК 641.53.092:683.958:664.71-11

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.262102

Удосконалення режимів опромінення електромагнітним полем під час виробництва крупи плющеної полб'яної

В. В. Любич, І. І. Мостов'як, В. В. Новіков, І. А. Лещенко, С. О. Белінська, В. М. Кір'ян, О. В. Тригуб, С. В. Пикало, В. В. Петренко, О. В. Твердохліб

Проведено наукове обґрунтування режимів виробництва крупи плющеної полб'яної з використанням електромагнітного поля надвисокої частоти. Досліджено вплив тривалості опромінення полем надвисокої частоти і водо теплового оброблення на температуру, вихід і тривалість варіння крупи плющеної полб'яної.

За опромінення полем надвисокої частоти від 20 до 180 с мінімальна температура продукту становить 27–128 °С, а максимальна – 43–159 °С. Оброблення полем надвисокої частоти від 20 до 100 с достовірно не впливає на загальний вихід крупи з пшениці полби. Загальний вихід при цьому становить 94–97 %. За опромінення полем надвисокої частоти від 120 до 180 с загальний вихід крупи достовірно знижується до 83–90 %. Достовірно зменшує тривалість варіння крупи плющеної оброблення полем надвисокої частоти упродовж 100–180 с. Тривалість варіння крупи при цьому становить 14,0–15,8 хв. Слід відзначити, що водотеплове оброблення достовірно зменшує тривалість варіння крупи плющеної порівняно з варіантом без зволоження.

Особливість технології виробництва плющеної крупи з пшениці полби з використанням поля надвисокої частоти полягає в тому, що цілу крупу необхідно опромінювати впродовж 60–80 с з проведенням зволоження на 1,0–1,5 %. За такого режиму загальний вихід крупи становить 94–97 %, тривалість варіння крупи – 14,3–15,9 хв. За умови виробництва крупи плющеної вищого сорту необхідно проводити опромінення полем надвисокої частоти упродовж 80 с без водотеплового оброблення. За такого режиму вихід крупи плющеної вищого сорту становить 80 %, а першого – 13 %. Тривалість варіння такої крупи становить 16,8 хв.

Розроблені рекомендації можуть бути використані зернопереробними підприємствами низької продуктивності за виробництва крупи плющеної.

Ключові слова: електромагнітне поле, крупа, пшениця полба, кулінарна якість, водотеплове оброблення.

1. Вступ

Об'єктивними передумовами формування конкурентного середовища на сучасному ринку харчових продуктів є зростання кількості потенційних споживачів. Достатній рівень їх платоспроможності, модернізація технологічного устаткування, що дозволяє істотно зменшити собівартість готового продукту

[1]. Харчування людини – важлива проблема, оскільки включає значну кількість чинників. До них входять вид сировини і способи зміни фізико-хімічних її властивостей під час перероблення [2].

Найбільш поширеною сировиною у харчовій промисловості є зерно злакових культур, зокрема пшениця м'яка [3]. Визнано [4], що пшениця м'яка є домінуючою культурою в країнах із помірним кліматом. Слугує основною сировиною для широкого асортименту продуктів харчування. Зерно пшениці м'якої використовують для виробництва хлібобулочних, кондитерських виробів, макаронів, крупів тощо. Споживання продуктів перероблення зерна пшениці м'якої дозволяє забезпечити організм біологічно-активними речовинами, харчовими волокнами, незамінними амінокислотами. Крім цього, продукти перероблення пшениці м'якої володіють високими показниками кулінарної якості, що є вагомою перевагою.

Враховуючи високий рівень вживання продуктів перероблення пшениці м'якої у світі, особлива увага приділяється їх антипоживним властивостям. Доведено, що продукти перероблення зерна пшениці можуть бути передумовою до розвитку аутоімунних захворювань [5]. Більш безпечними для споживання можуть бути продукти, вироблені з інших малопоширених видів пшениць, зокрема пшениці полби [6].

Асортимент круп'яних продуктів та харчових концентратів широкий. Круп'яні продукти відрізняються за формою та фізичними властивостями. Більшу перевагу сучасні споживачі надають круп'яним продуктам із високою кулінарною характеристикою та мінімальним терміном приготування. До таких продуктів можна віднести крупи подрібнені та крупи плющені [7]. Потенційно привабливі для споживача є крупи плющені за рахунок поєднання високих показників кулінарної якості та мінімальній тривалості приготування. Однак, технологія виробництва крупів плющених відрізняється підвищеною матеріалоемністю за рахунок використання пропарювання зерна та його плющення. Процес пропарювання вимагає додаткового залучення теплоносіїв, встановлення генераторів пари та формування магістралей подачі пари у виробничі приміщення. Для підприємств низької продуктивності вказані вимоги виробництва пов'язані із критичним ризиками капіталовкладень [8]. Вирішенням поставленої проблеми є використання альтернативних джерел теплової енергії, зокрема електромагнітного поля струмів надвисокої частоти. Відомі й інші напрацювання щодо використання альтернативних методів теплового або хімічного оброблення, які сьогодні впроваджуються у виробництво [9].

Наукові дослідження, пов'язані із вивченням альтернативних видів енергії та шляхів розширення асортименту круп'яних продуктів із зерна пшениці, є важливими для виробників і малих фермерських господарств. Результати таких досліджень потрібні практиці, оскільки нададуть можливість модернізувати діючі круп'яні цехи. Сприятимуть введенню в експлуатацію ліній виробництва крупів плющених за використання альтернативних джерел енергії. Розширять асортимент круп'яних продуктів за рахунок використання малопоширеної сировини. Таким чином встановлення зв'язків між технічними показниками круп'яного виробництва за використання альтернативних видів теплової енергії, вивчення кулінарної якості отриманих продуктів є актуальним завданням.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Зерно пшениці полби використовують для виробництва високоякісних продуктів [10]. Так, хліб з борошна пшениці полби використовується у всьому світі, але найбільше в Швейцарії. В Італії його використовують для виробництва макаронних виробів і як заміник рису [11]. Доведено, що зернопродукти із пшениці полби мають сенсорні властивості на рівні кращих сортів пшениці м'якої або й вищі [12]. Проте в дослідженнях не вивчалось питання впливу технологічних параметрів на вихід і якість готових продуктів.

У праці [13] наведено результати досліджень застосування борошна пшениці полби для виробництва високоякісного хліба, кондитерських виробів і макаронів. Проте дослідження було направлено на розробленні методів ідентифікації генів пшениці полби для виявлення фальсифікату.

У дослідженні [14] наведено вплив опромінення зерна пшениці полем надвисокої частоти. Показано, що опромінення малими дозами позитивно впливало на схожість та енергію проростання зерна пшениці м'якої. При цьому схожість зростала до 100 %. Проте рекомендовані режими не можна застосовувати для виробництва крупи, бо технологічні властивості об'єктів відрізняються.

Інші результати вказують на те, що обробка електромагнітним полем надвисокої частоти (600 Вт, 30 с) може сприяти зростанню вмісту загальних флавоноїдів, редуційних цукрів і розчинного білка [15]. Встановлено [16], що обробка електромагнітним полем надвисокої частоти стимулює активність ферментів для сприяння проростанню та накопиченню активних речовин у насінні зернових. Дослідження [17] показали, що електромагнітним полем надвисокої частоти може посилити активність антиоксидантних ферментів, включаючи пероксидазу, аскорбатпероксидазу і глутатіонпероксидазу. Так само було продемонстровано, що оброблення електромагнітним полем надвисокої частоти є ефективною у сприянні підвищенню активності α -амілази [18]. Встановлено, що обробка насіння вівса (*Avena sativa* L.) електромагнітним полем надвисокої частоти сприяє активності нітратредуктази і глутамінтрансферази та пригнічує активність протеолітичних ферментів і рибонуклеази [19]. Також було виявлено, що опромінення електромагнітним полем надвисокої частоти протягом 5–25 с може підвищити активність α -амілази [20]. Очевидно такі зміни будуть проходити у продуктах, які зазнають впливу електромагнітного поля.

Перевагою застосування електромагнітного поля надвисокої частоти є зниження чисельності мікрорганізмів у продуктах. Вважається, що механізм інгібування мікроорганізмів заснований на впливі внутрішнього нагрівання, що призводить до денатурації білків, ферментів і нуклеїнових кислот [21]. За оптимізованих умов ріст мікробів на зерні можна повністю пригнічувати без шкоди для його якості [22]. Дослідження показало, що обробка зернових культур може ефективно пригнічувати проростання спор грибів, що продукують афлатоксин (*Aspergillus spp.*) [23]. Отже, застосування електромагнітного поля надвисокої частоти під час виробництва крупи сприятиме отриманню чистого від мікробів продукту.

Вплив режимів оброблення зернових та бобових культур у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти досліджено у роботі [24]. Обґрунтованими є рекомендації щодо впровадження етапу оброблення зерна зерна у елект-

ромагнітним полем струмів надвисокої частоти як аналог класичних методів фумігації. Вказаний вид оброблення істотно скорочує час дезінсекції та має безперервну дію, що вигідно до застосування для автоматизації процесів первинного оброблення та підвищення його ефективності.

Ефективність оброблення зерна у мікрохвилювому випромінюванні для знищення шкідників розглянуто у роботі [25]. Встановлено зв'язки між потужністю електромагнітного випромінювання та смертністю шкідників, надано рекомендації щодо впровадження етапу оброблення в електромагнітному полі збіжжя.

Режими застосування електромагнітного поля струмів наведені у роботах [24, 25] не можна застосовувати для виробництва плющеної крупи, оскільки вони розроблені для знезаражування зерна. Технологічний режим опромінення електромагнітним полем надвисокої частоти для плющення відрізняється.

Аналіз різних генотипів стародавніх пшениць під час формування якості хліба досліджено у роботі [26]. Отримані результати свідчать про високу варіабельність кінцевих ознак хліба, виробленого із стародавніх пшениць, при цьому ознаки хліба, що виробляли із сучасних сортів пшениць мали ознаки однорідності. Проте недостатньо наведено результатів досліджень щодо формування якості зернопродуктів із пшениці полби. Крім цього, не висвітлюються результати впливу технологічних параметрів на вихід і якість виробів. Такі висновки не стосуються круп'яних продуктів.

Отже, зерно пшениці полби користується попитом для виробництва високоякісних продуктів. Застосування опромінення електромагнітним полем надвисокої частоти має переваги у технологіях харчових продуктів. При цьому недостатньо вивчено вплив його режимів на вихід і якість крупи плющеної із пшениці полби. Тому доцільним є розроблення режимів застосування електромагнітного поля надвисокої частоти під час виробництва крупи із пшениці полби.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є наукове обґрунтування режимів виробництва крупи плющеної полб'яної з використанням електромагнітного поля надвисокої частоти. Отримані результати нададуть можливість практичного застосування електромагнітного поля надвисокої частоти під час виробництва крупи плющеної полб'яної. Очікуваними практичними результатами від впровадження рекомендацій є розширення асортименту круп'яних продуктів і мінімізація витрат на основні фонди під час модернізації діючого виробництва або відкриття нового.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- дослідити вплив водотеплового оброблення на температуру проміжного продукту;
- визначити вплив водотеплового оброблення на вихід крупи і супутніх продуктів;
- визначити вплив режимів водотеплового оброблення крупи на тривалість приготування готового продукту;
- обґрунтувати раціональні параметри виробництва крупи плющеної із пшениці полби.

4. Матеріали та методи дослідження

4. 1. Об'єкт та гіпотеза дослідження

Об'єктом дослідження було обрано технологію круп'яного виробництва. Була висунута гіпотеза, що полягала у ймовірному впливу тривалості оброблення лущеного зерна пшениці полби у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти та попереднього його зволоджування на показники виходу крупи. Найбільшу дію електромагнітне поле струмів надвисокої частоти має на молекули води. Тому доцільним було виявити можливі зміни у кулінарній якості крупи за різних режимів водотеплового оброблення. Для спрощення проведення досліджень були обрані середні значення тривалості відволожування крупи (30 хв) та потужності електромагнітного поля.

4. 2. Сировина для виробництва крупи полб'яної плющеної

Для виробництва крупів використовували пшеницю полбу сорту Голіківська, вирощену у контрольованих умовах лівобережного лісостепу України. Зразки пшениці було отримано у 2021 році. Основний блок досліджень – 4 кв 2021 року. Післязбиральне дороблення зерна полягало у його очищенні від домішок, що відрізнялись за геометричним та аеродинамічними показниками. Після цього дороблено зерно зберігали в контрольованих умовах. Вологість зерна впродовж зберігання $-12,0 \pm 0,2$ %; вміст білка $-14,3 \pm 0,3$ %; склоподібність -95 ± 2 %.

4. 3. Програма, методика, обладнання

Крупу плющену отримували шляхом оброблення крупи №1, отриманої у лабораторних умовах. Для виробництва крупи №1 проводили лущення зерна пшениці полби впродовж 80 с у машині ударно-стиральної дії УШЗ-1, Україна. Отримані продукти лущення сепарували на розсіві лабораторному РЛУ-1, Україна. Отриману крупу № 1 зволожували мікрокрапельним способом, відволожували впродовж 30 хв, обробляли у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти (мікрохвильова піч Rainford RMW-301, Китай) та плющили за допомогою верстату (ВПК-200, Україна). Продукти плющення охолоджували до температури приміщення та сепарували за розміром. Крупа, що була отримана проходом сита 6,5 мм та сходом сита 3,2 мм відносили до вищого сорту. Дрібку отримували проходом сита 2,0 мм та сходом сита № 067. Частинки, які були сполучені між собою, отримані сходом сита 6,5 мм вилучали.

Масу продуктів визначали на вагах лабораторних. Температуру продукту після термічного оброблення – пірометром TROTEC BP5F (Германія).

Кулінарну оцінку проводила дигустаційна група, сформована із фахівців із достатнім рівнем компетенції. Твердження експертів були узгоджені, що підтверджено статистичними аналізами.

4. 4. Статистичне оброблення експериментальних даних

Дослідження проводили у чотирьох повторюваннях, які були рандомізовані в часі. Результати обробляли за використання програм Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, USA) і Statistica 12 (StatSoftStatistica Ultimate Academic, Ukraine) відповідно до методичних рекомендацій [27, 28].

5. Результати дослідження показників виробництва крупів плющених

5.1. Вплив режимів водотеплового оброблення на температуру отриманого проміжного продукту

Температура продукту розподілялась нерівномірно по площині шару крупи, що була оброблення в електромагнітному полі струмів надвисокої частоти. Збільшення тривалості оброблення крупи у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти зумовлювало збільшення температури продукту. Тенденції зміни температури були подібними у зразках, які попередньо зволожували та тих, що не зволожували перед термічним обробленням (рис. 1).

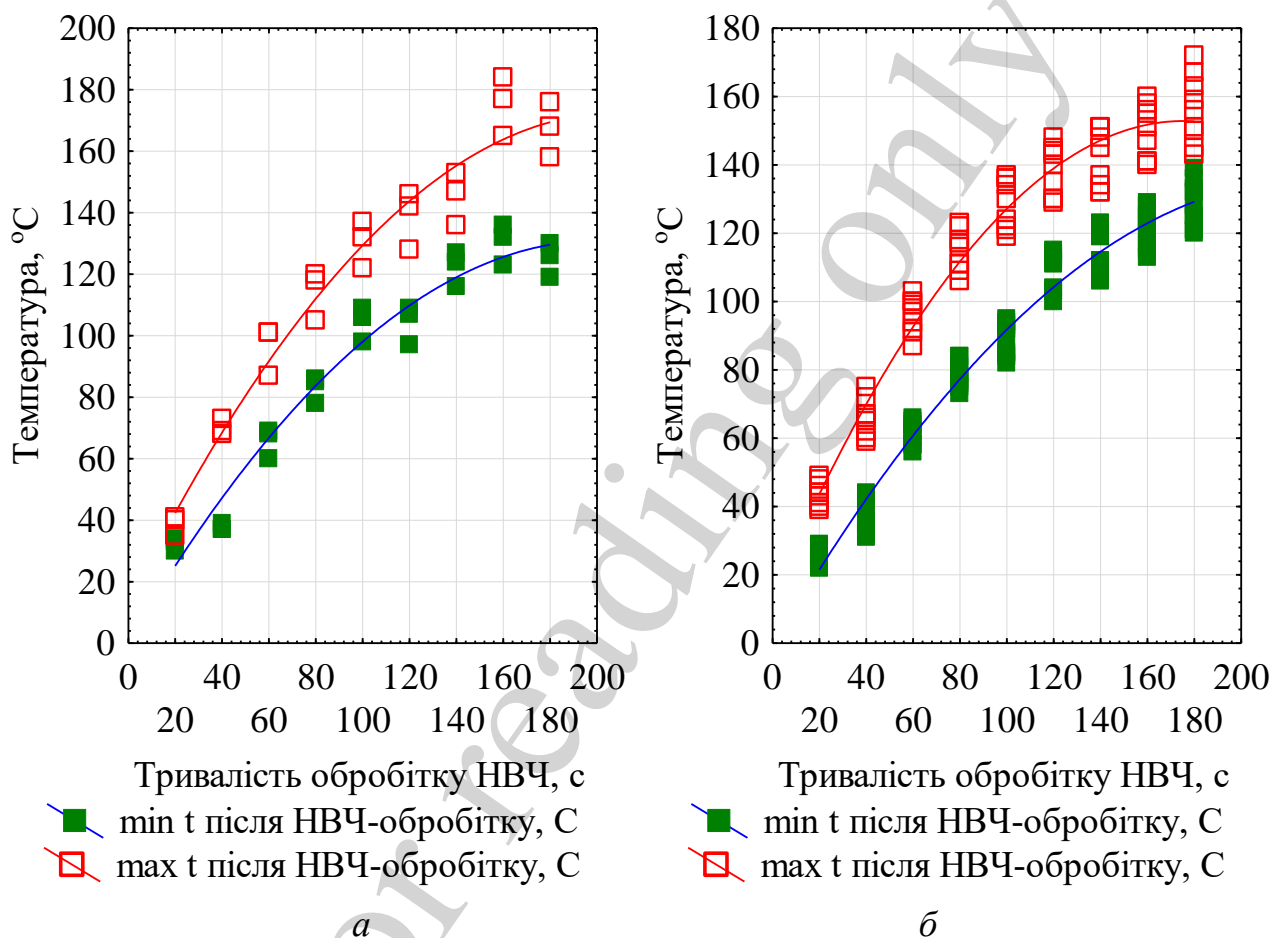


Рис. 1. Температура крупи після оброблення в електромагнітному полі струмів надвисокої частоти: *a* – без застосування попереднього зволоження; *б* – після застосування попереднього зволоження

Зафіксовано більш нерівномірне розподілення температур у зразках, які були оброблені тривалий час (140–180 °C) та не були попередньо зволожені (рис. 1, *a*).

Достовірною є залежність між тривалістю термічного оброблення крупи, режимом попереднього зволоження та її температури (рис. 2). Найбільший вплив на температуру зумовлювала тривалість термічного оброблення (Partial eta-squared=0,89). Менший вплив на температуру зумовлювало використання різних режимів зволоження крупи (Partial eta-squared=0,10).

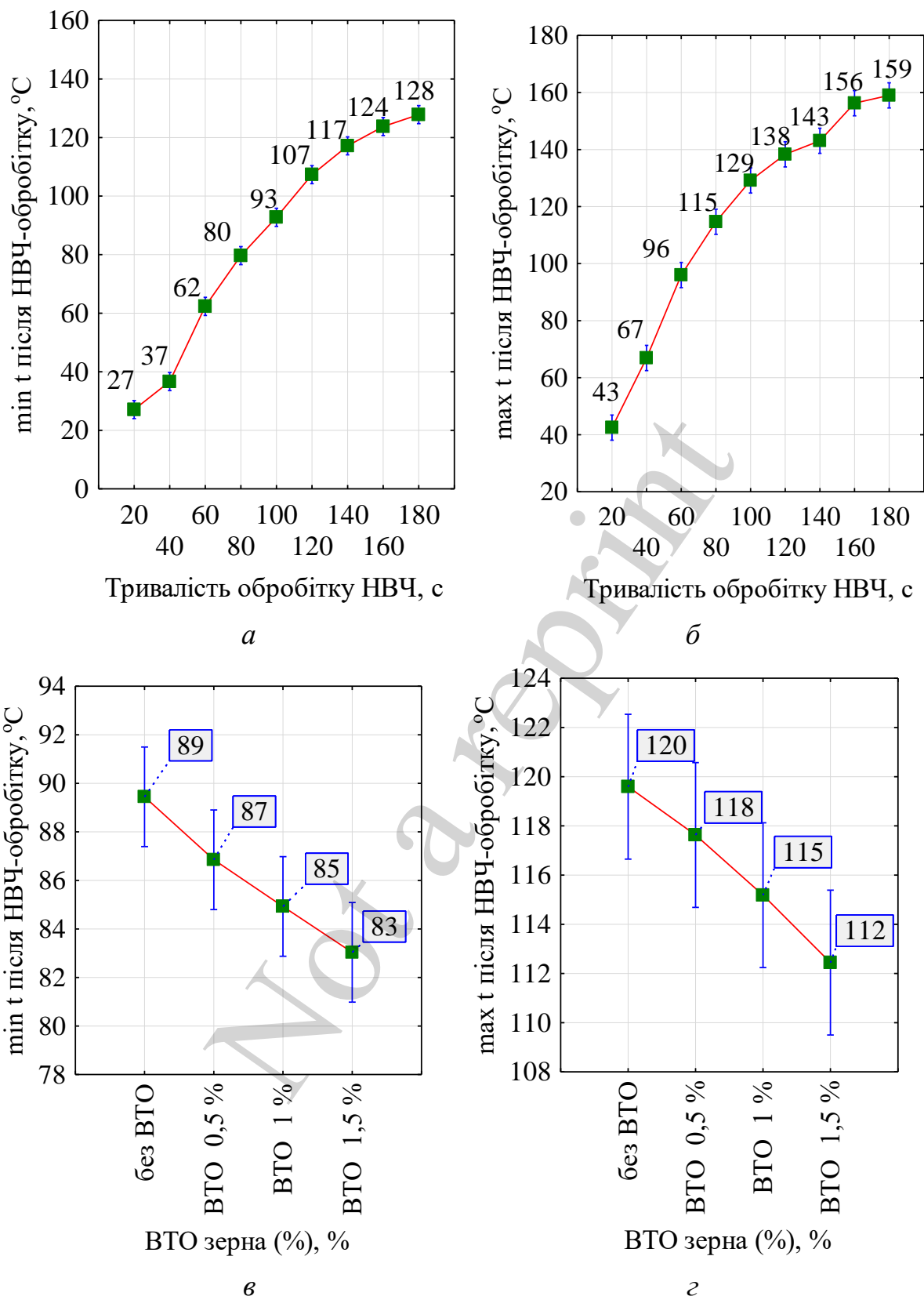


Рис. 2. Вплив тривалості термічного оброблення та режимів зволоження на температуру крупи перед плющенням: *а* – мінімальна температура крупи залежно від тривалості термічного оброблення; *б* – максимальна температура крупи залежно від тривалості термічного оброблення; *в* – мінімальна температура крупи залежно від режиму зволоження; *г* – максимальна температура крупи залежно від режиму зволоження

Стрімкий приріст температури фіксували у перші 80 с оброблення крупи (рис. 2, *а, б*). Подальший приріст температури залежно від тривалості термічного оброблення був менш інтенсивним.

Застосування зволоження зерна дозволяє досягати меншої температури нагріву крупи порівняно із зразками, які не зволожували (рис. 2, *в, г*).

5. 2. Вплив режимів водотеплового оброблення на вихід крупи та супутніх продуктів

Режими водотеплового оброблення мають важливе значення під час формування виходу круп'яних продуктів, оскільки істотно впливають на рівень клейстеризації крохмалю. Високий вихід крупи плющеної можливо отримати у результаті високого рівня клейстеризації крохмалю. Встановлено, що застосування зволоження перед термічним оброблення суттєво не впливало на вихід крупи вищого та першого сортів (рис. 3, *а*). Без проведення зволоження отримували на 1–3 % менший вихід крупи плющеної порівняно із зразками, що зволожували перед термічним обробленням.

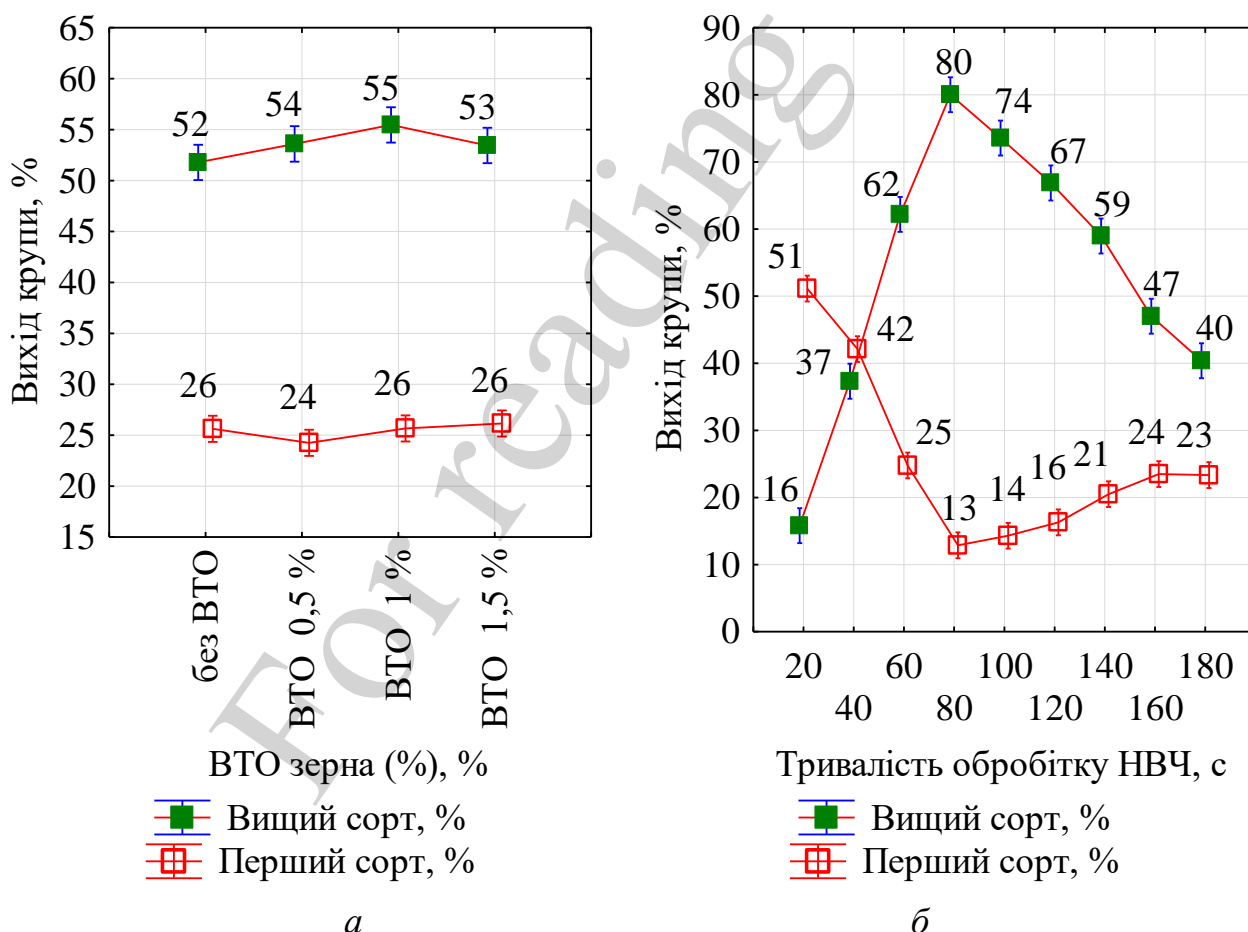


Рис. 3. Вихід крупи залежно від режиму водотеплового оброблення: *а* – залежно від зволоження; *б* – залежно від тривалості термічного оброблення

Застосування різної тривалості оброблення зразків у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти зумовлювало істотні зміни виходів крупи ви-

щого та першого сортів (рис. 3, б). Мінімальний вихід крупи вищого сорту фіксували за мінімальної тривалості оброблення (20 с). Збільшення тривалості оброблення до 80 с сприяло підвищенню показнику виходу крупи вищого сорту. Подальше збільшення тривалості термічного оброблення мало негативний ефект на вихід крупи вищого сорту. За максимальної тривалості оброблення (180 °С) був зафіксований вихід крупи вищого сорту 40 %, що на 50 % менше порівняно із максимальним виходом цієї крупи, отриманого за оброблення впродовж 80 °С. Збільшення виходу крупи вищого сорту зумовлювало зменшення виходу крупи першого сорту. Істотне зменшення виходу крупи першого сорту фіксували за збільшення тривалості оброблення від 20 с до 80 с (рис. 3, б). Подальше збільшення тривалості оброблення зумовлювало збільшення виходу крупи другого сорту.

В цілому вихід круп'яних продуктів зменшувався на 2–3 % за проведення попереднього зволоження зерна перед обробленням у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти (рис. 4, а). Аналогічно зменшувався вихід дрібки. Вихід мучки підвищувався за використання попереднього зволоження в середньому на 1–2 %.

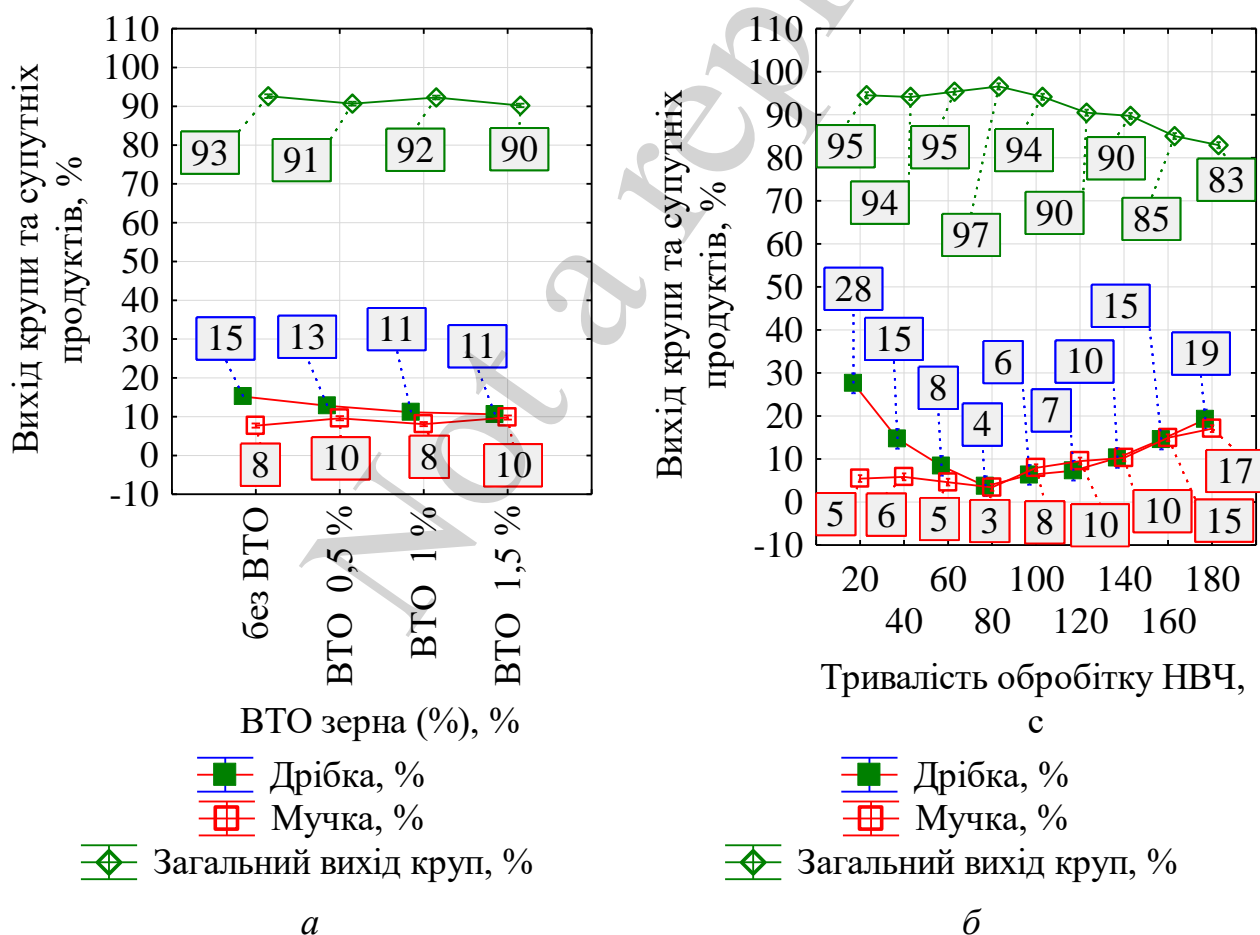


Рис. 4. Вихід крупи та супутніх продуктів залежно від режимів водотеплового оброблення: а – залежно від зволоження; б – залежно від тривалості термічного оброблення

Вихід крупи підвищувався на 1–2 % за оброблення впродовж 80–100 с. Подальше збільшення тривалості термічного оброблення суттєво зменшувало загальний вихід крупи (рис. 4, б). Зменшення загального виходу було зумовлено збільшенням показників виходу супутніх продуктів (мучки та дрібки).

5.3. Вплив режимів водотеплового оброблення крупи плющеної на тривалість приготування готового продукту

Кулінарна якість отриманих продуктів була високою (загальна кулінарна оцінка 8,2–8,6 балів із 9-ти). Істотних змін у показниках запаху, смаку, кольору або консистенції зафіксовано не було.

Тривалість приготування каші мала зв'язок із режимами водотеплового оброблення (рис. 5).

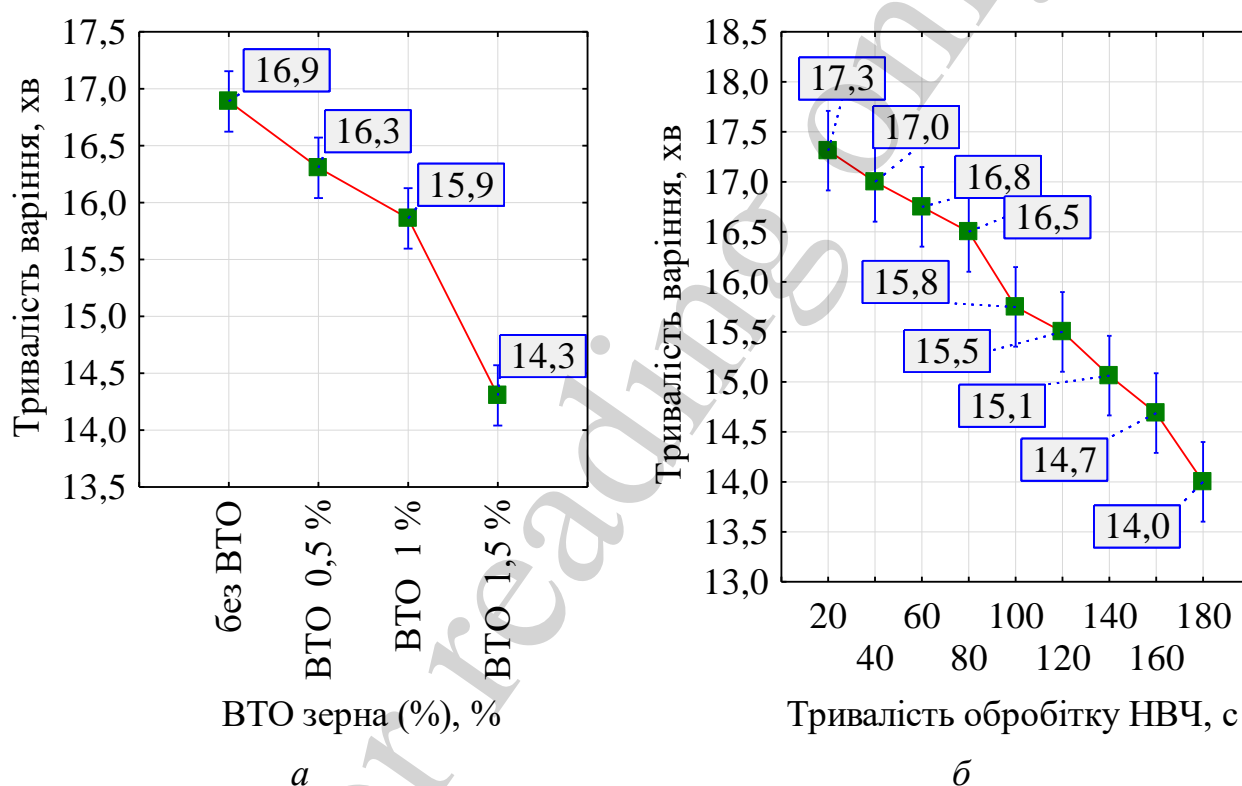


Рис. 5. Тривалість варіння каші із крупи плющеної залежно від режимів водотеплового оброблення: *а* – залежно від зволоження; *б* – залежно від тривалості термічного оброблення

Зволоження крупи на 1,5 % перед термічним обробленням зумовлювало зменшення тривалості приготування каші у середньому на 2,6 хв (рис. 5, *а*). Більш суттєве зменшення тривалості варіння відбувалось у результаті проведення довготривалого оброблення у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти (рис. 5, *б*). Застосування максимальної тривалості оброблення зумовлювало зменшення тривалості варіння каші на 3,3 хв порівняно із зразком, що обробляли впродовж 20 с.

5. 4. Обґрунтування раціональних режимів виробництва крупи плющеної із пшениці полби

Для формування рекомендацій виробництву щодо режимів водотеплового оброблення із застосуванням альтернативної теплової енергії була побудована узагальнена функція бажаності, що графічно зображена на рис. 6.

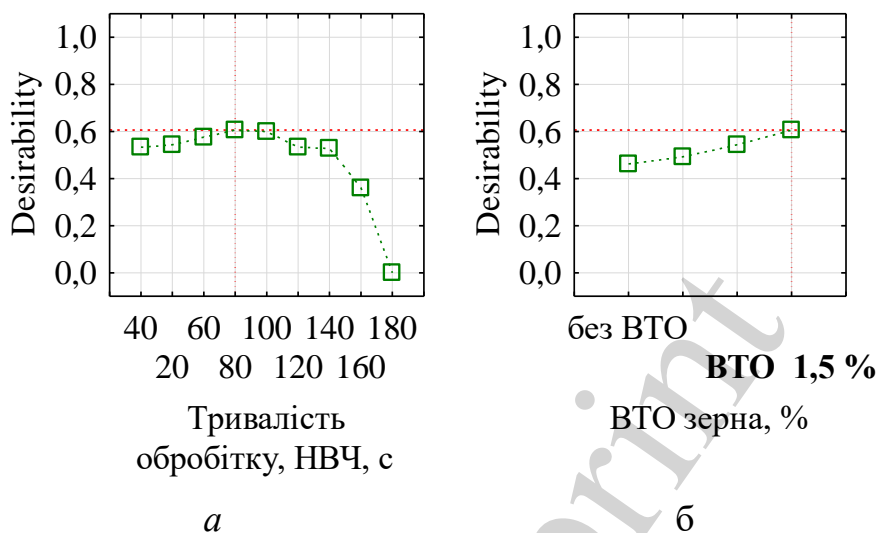


Рис. 6. Узагальнена функція бажаності: *a* – залежно від тривалості оброблення термічного оброблення; *б* – залежно від зволоження

Головними вимогами до функції бажаності були: максимальний загальний вихід крупи; максимальна кулінарна якість круп'яних продуктів, мінімальна тривалість варіння. Максимальні значення функції бажаності (0,6 – добрий за шкалою Харінгтона) було отримано за тривалості оброблення НВЧ впродовж 80 с. Подальше збільшення тривалості обробітку негативно впливало на значення узагальненої функції бажаності. Суттєве погіршення значень функції фіксували за тривалості оброблення 140 с і більше. Застосування зволоження крупи перед обробленням НВЧ позитивно впливало на значення функції бажаності. Максимальний показник функції бажаності зафіксовано за зволоження крупи на 1,5 % перед обробленням НВЧ.

6. Обговорення результатів дослідження розширення асортименту кексів збагачених гарбузом

Кулінарні властивості готового продукту є основною передумовою для сучасного споживача під час вибору продуктів харчування. Кулінарна якість круп'яних продуктів істотно залежить від кількості клітковини у ньому [29, 30]. Вміст клітковини у круп'яних продуктах пов'язаний із застосованим індексом лущення (кількості знятих оболонок). Високі кулінарні показники можливо отримати за зняття 10–15 % оболонок. Під час виробництва крупи плющеної була використана крупа № 1, що характеризувалась індексом лущення 10 %. Застосовані режими термічного оброблення не зумовлювали істотних змін структури клітковини, що зумовлювало зменшення оцінки за параметрами кон-

систенції каші під час розжовування та кольору. Проте інші параметри кулінарної якості, зокрема запах, смак, консистенція, колір були на високому рівні. Таким чином загальна кулінарна якість отриманих продуктів була високою та не змінювалась залежно від застосованих режимів водотеплового оброблення.

Збільшення тривалості оброблення у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти достовірно збільшувало температуру продукту, що обробляли (рис. 2, *a, б*). Це корелює із специфікою оброблення продукту за використання вказаного способу. Отримані результати є подібними до тих, що висвітлені у роботах інших дослідників [25, 26].

Після зволоження крупи спостерігали достовірне зменшення мінімальної та максимальної температури після оброблення (рис. 2, *в, г*). В попередніх досліджених механізми впливу додаткового зволоження на фізико-хімічні зміни крупи, виробленої із зерна пшениці полби не вказано. Тому можна зробити припущення, що зменшення температури крупи, що попередньо зволожували може бути зумовлено зміною теплоємності та тепловологопровідності отриманої суміші. Проте вказане припущення вимагає додаткового дослідження.

Застосування зволоження крупи перед термічним обробленням позитивно впливало на вихід крупи вищого та першого сорту (рис. 3, *a*). Для крупів плющених важливим показником є ступінь клейстеризації крохмалю, що залежить від параметрів водотеплового оброблення та параметрів налаштування плющильного верстату (діаметр вальців, зазор між вальцями). За високих показників клейстеризації отримують пластівці, що мають стабільну форму на низький показник крихкості. Зразки із низькою вологістю, що піддають плющенню не здатні формувати пластівці та на етапі сортування продуктів плющення не відносяться до першого або другого сорту крупів. Тому додаткове зволоження, застосоване перед обробленням електромагнітним випромінюванням ймовірно впливало як на вологість отриманого продукту так на ступінь клейстеризації. Реологічні властивості проміжних продуктів круп'яного виробництва, що обробляли дією електромагнітного поля струмів надвисокої частоти вимагають більш глибокого подальшого дослідження.

Збільшення тривалості оброблення у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти від 20 до 80 с позитивно впливало на вихід крупи вищого сорту (рис. 3, *б*). Така особливість пов'язана із підвищенням ступеня клейстеризації крохмалю за рахунок підвищення температури продукту перед плющенням. Одночасно із збільшенням виходу вищого сорту спостерігали зменшення виходу першого сорту за вказаної тривалості термічного оброблення крупи перед плющенням. За тривалості оброблення більше 80 с істотно зменшувався вихід крупи вищого сорту та підвищувався вихід крупи першого сорту. Такі зміни можуть бути пов'язані із істотною втратою вологості у результаті дії високих температур та тривалості оброблення крупи. Тому продукти плющення мали високу крихкість та не були здатні формувати фракції, що можна віднести до вищого сорту. Очевидним є доцільність більш детального дослідження впливу тривалості оброблення на показники вологості та клейстеризації крохмалю у подальших дослідженнях.

Істотних змін загального виходу готового продукту залежно від попереднього зволоження не було зафіксовано. Проте достовірним є зменшення кількості дрібки (рис. 4, *a*). Суттєвий вплив на показник загального виходу зумовлювала тривалість термічного оброблення (рис. 4, *b*). Істотне зменшення загального виходу за тривалості термічного оброблення 80 с і більше пов'язано із істотним приростом супутніх продуктів (мучки та дрібки). При тривалому обробленні готовий продукт характеризується високою крихкістю із утворенням фракцій, що за гранулометричним складом відносять до мучки і дрібки.

Збільшення тривалості варіння каші істотно зменшувалась за збільшення збільшенні вологості продукту перед обробленням та тривалістю такого оброблення (рис. 5). Така особливість може бути пояснена високими температурами оброблення (до 159 °С) за яких у крупі відбували незворотні фізико-хімічні зміни.

За комплексом показників можна стверджувати про доцільність впровадження у виробництво оброблення у електромагнітному полі струмів надвисокої частоти як ефективний аналог традиційного водотеплового оброблення.

Особливістю запропонованого методу є виключення етапу відволоження та істотного зменшення тривалості термічного оброблення крупи порівняно із типовими та загальноприйнятими способами водотеплового оброблення. На відміну від відомих способів застосування електромагнітного опромінення [25, 26] запропонований метод дозволяє істотно розширити сфери використання адресної доставки енергії. Особливість методу полягає у зміні фізико-хімічних властивостей сировини на етапі водно теплового оброблення у технології перероблення зерна пшениці полби на крупу плющену. Використання запропонованих режимів дозволить ефективно впроваджувати виробництво крупів із застосуванням виключно електричної енергії.

Виявлені закономірності доповнюють знання про електромагнітне поле струмів надвисокої частоти, що частково були порушені у роботах [18, 20, 24]. Відмінність отриманих результатів полягає у розширенні відомостей про зв'язки між технічними показниками виробництва та режимами водно теплового оброблення за використання електромагнітного випромінювання.

Обмеженням даного дослідження є відсутність промислового варіанту технологічного устаткування для здійснення оброблення в електромагнітному полі струмів надвисокої частоти на етапі круп'яного виробництва перед плющенням. Однак відомі промислові варіанти подібних машин, що використовують для знезаражування зернових мас. Модернізація такого устаткування є можливою та може бути здійснена у короткі строки.

Головним недоліком дослідження слід вважати видові особливості сировини, щ була використана під час експериментів. Результати роботи [26] свідчать про високу варіативність показників під час перероблення різних сортів стародавніх пшениць у тому числі пшениці полби. Тому технічні показники під час перероблення інших сортів пшениці полби можуть відрізнятись.

Подальший розвиток дослідження полягає у вивченні сортових властивостей зерна пшениці полби та показників її перероблення на різні продукти харчування. Доцільним є встановлення зв'язків між режимами оброблення елект-

ромагнітним полем струмів надвисокої частоти сировини із різними показниками тепловологопровідності.

7. Висновки

1. Визначено вплив тривалості опромінення полем надвисокої частоти і водотеплового оброблення на температуру проміжного продукту. Встановлено, що опромінення полем надвисокої частоти достовірно впливає на температуру крупи з пшениці полби № 1. За опромінення полем надвисокої частоти від 20 до 180 с мінімальна температура продукту становить 27–128 °С, а максимальна – 43–159 °С. Водотеплове оброблення крупи з пшениці полби № 1 перед опроміненням по різному впливає на температуру продукту. Так, зволоження крупи №1 на 1,5 % достовірно знижує температуру порівняно з варіантом без водотеплового оброблення. Температура мінімальна при цьому становить 83 °С, а максимальна – 112 °С. Слід відзначити, що між варіантами зволоження крупи на 0,5, 1,0 і 1,5 % достовірної різниці не виявлено.

2. Оброблення полем надвисокої частоти від 20 до 100 с достовірно не впливає на загальний вихід крупи з пшениці полби. Загальний вихід при цьому становить 94–97 %. За опромінення полем надвисокої частоти від 120 до 180 с загальний вихід крупи достовірно знижується до 83–90 %. Опромінення полем надвисокої частоти крупи з пшениці полби № 1 упродовж 20–80 с достовірно збільшує вихід крупи плющеної вищого сорту. За такого режиму вихід плющеної крупи вищого сорту зростає від 16 до 80 %, першого сорту достовірно знижується від 51 до 13 %. Опромінення полем надвисокої частоти упродовж 100–180 с вихід крупи плющеної вищого сорту достовірно знижується від 74 до 40 %, а першого сорту зростає від 14 до 23 %. Проведення водотеплового оброблення не впливає на вихід крупи плющеної з пшениці полби.

3. Достовірно зменшує тривалість приготування готового продукту із оброблення крупи полем надвисокої частоти упродовж 100–180 с. Тривалість варіння крупи при цьому становить 14,0–15,8 хв. За опромінення полем надвисокої частоти від 20 до 80 с. тривалість варіння становить 16,5–17,3 хв. Слід відзначити, що водотеплове оброблення достовірно зменшує тривалість варіння крупи плющеної порівняно з варіантом без зволоження. Водотеплове оброблення крупи на 1,5 % знижує тривалість варіння достовірно порівняно з 0,5–1,0 %-м зволоженням до 14,3 хв.

4. У технології виробництва плющеної крупи з пшениці полби з використанням поля надвисокої частоти необхідно опромінювати крупу впродовж 60–80 с з проведенням зволоження на 1,0–1,5 %. За такого режиму загальний вихід крупи становить 94–97 %, тривалість варіння крупи – 14,3–15,9 хв. За умови виробництва крупи плющеної вищого сорту необхідно проводити опромінення полем надвисокої частоти упродовж 80 с без водотеплового оброблення. За такого режиму вихід крупи плющеної вищого сорту становить 80 %, а першого – 13 %. Тривалість варіння такої крупи становить 16,8 хв.

Література

1. Mefleh, M., Conte, P., Fadda, C., Giunta, F., Piga, A., Hassoun, G., Motzo, R. (2018). From ancient to old and modern durum wheat varieties: interaction among cultivar traits, management, and technological quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (5), 2059–2067. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9388>
2. Ma, F., Baik, B.K. (2021). Influences of grain and protein characteristics on in vitro protein digestibility of modern and ancient wheat species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101 (11), 4578–4584. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11100>
3. Petrenko, V., Liubich, V., Bondar, V. (2017). Baking quality of wheat grain as influenced by agriculture systems, weather and storing conditions. *Romanian Agricultural Research*, 34, 69–76. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183008263>
4. Shewry, P. R. (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60 (6), 1537–1553. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp058>
5. Lindfors, K., Ciacci, C., Kurppa, K., Lundin, K. E. A., Makharia, G. K., Mearin, M. L. et. al. (2019). Coeliac disease. *Nat Rev Dis Primers*, 5 (1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41572-018-0054-z>
6. Dubois, B., Bertin, P., Muhovski, Y., Escarnot, E., Mingeot, D. (2017). Development of TaqMan probes targeting the four major celiac disease epitopes found in α -gliadin sequences of spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) and bread wheat (*Triticum aestivum* ssp. *aestivum*). *Plant Methods*, 13 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0222-2>
7. Liubych, V., Novikov, V., Zheliezna, V., Prykhodko, V., Petrenko, V., Khomenko, S. et. al. (2020). Improving the process of hydrothermal treatment and dehulling of different triticale grain fractions in the production of groats. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(11 (105)), 55–65. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203737>
8. Osokina, N., Liubych, V., Volodymyr, N., Leshchenko, I., Petrenko, V., Khomenko, S. et. al. (2020). Effect of electromagnetic irradiation of emmer wheat grain on the yield of flattened wholegrain cereal. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (11 (108)), 17–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217018>
9. Aguilar, C. N., Ruiz, H. A., Rubio Rios, A., Chávez-González, M., Sepúlveda, L., Rodríguez-Jasso, R. M. et. al. (2019). Emerging strategies for the development of food industries. *Bioengineered*, 10 (1), 522–537. doi: <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1682109>
10. De Sousa, T., Ribeiro, M., Sabença, C., Igrejas, G. (2021). The 10,000-Year Success Story of Wheat! *Foods*, 10 (9), 2124. doi: <https://doi.org/10.3390/foods10092124>
11. Arzani, A. (2011). Emmer (*Triticum turgidum* spp. *dicoccum*) Flour and Breads. *Flour and Breads and Their Fortification in Health and Disease Prevention*, 69–78. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-380886-8.10007-8>
12. Boukid, F., Folloni, S., Sforza, S., Vittadini, E., Prandi, B. (2017). Current Trends in Ancient Grains-Based Foodstuffs: Insights into Nutritional Aspects

and Technological Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17 (1), 123–136. doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12315>

13. Silletti, S., Morello, L., Gavazzi, F., Gianì, S., Braglia, L., Breviario, D. (2019). Untargeted DNA-based methods for the authentication of wheat species and related cereals in food products. *Food Chemistry*, 271, 410–418. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.178>

14. Zhang, L., Du, L., Shi, T., Xie, M., Liu, X., Yu, M. (2022). Effects of pulsed light on germination and gamma-aminobutyric acid synthesis in brown rice. *Journal of Food Science*, 87 (4), 1601–1609. doi: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16087>

15. Wang, S., Wang, J., Guo, Y. (2018). Microwave Irradiation Enhances the Germination Rate of Tartary Buckwheat and Content of Some Compounds in Its Sprouts. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 68 (3), 195–205. doi: <https://doi.org/10.1515/pjfn-2017-0025>

16. Wu, X. H., Luo, G. Q., Feng, J. M. (2017). Effects of microwave treatment on the nitrogen metabolism of oat seedlings under Na₂CO₃ stress. *J. Microwaves*, 33, 91–96.

17. Qiu, Z.-B., Guo, J.-L., Zhang, M.-M., Lei, M.-Y., Li, Z.-L. (2012). Nitric oxide acts as a signal molecule in microwave pretreatment induced cadmium tolerance in wheat seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35 (1), 65–73. doi: <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1048-1>

18. Chen, Y.-P., Jia, J.-F., Han, X.-L. (2008). Weak microwave can alleviate water deficit induced by osmotic stress in wheat seedlings. *Planta*, 229 (2), 291–298. doi: <https://doi.org/10.1007/s00425-008-0828-8>

19. Ding, J., Hou, G. G., Dong, M., Xiong, S., Zhao, S., Feng, H. (2018). Physicochemical properties of germinated dehulled rice flour and energy requirement in germination as affected by ultrasound treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41, 484–491. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.010>

20. Chen, Y., Chen, D., Liu, Q. (2017). Exposure to a magnetic field or laser radiation ameliorates effects of Pb and Cd on physiology and growth of young wheat seedlings. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 169, 171–177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.03.012>

21. Schmidt, M., Zannini, E., Arendt, E. (2018). Recent Advances in Physical Post-Harvest Treatments for Shelf-Life Extension of Cereal Crops. *Foods*, 7 (4), 45. doi: <https://doi.org/10.3390/foods7040045>

22. Chemat, F., Zill-e-Huma, Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18 (4), 813–835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>

23. Chen, Y., Liu, Q., Yue, X., Meng, Z., Liang, J. (2013). Ultrasonic vibration seeds showed improved resistance to cadmium and lead in wheat seedling. *Environmental Science and Pollution Research*, 20 (7), 4807–4816. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1411-1>

24. Yadav, D. N., Anand, T., Sharma, M., Gupta, R. K. (2012). Microwave technology for disinfestation of cereals and pulses: An overview. *Journal of Food*

Science and Technology, 51 (12), 3568–3576. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0912-8>

25. Singh, R., Singh, K. K., Kotwaliwale, N. (2011). Study on disinfestation of pulses using microwave technique. *Journal of Food Science and Technology*, 49 (4), 505–509. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0296-1>

26. Ruisi, P., Ingrassia, R., Urso, V., Giambalvo, D., Alfonzo, A., Corona, O. et. al. (2021). Influence of grain quality, semolinas and baker's yeast on bread made from old landraces and modern genotypes of Sicilian durum wheat. *Food Research International*, 140, 110029. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110029>

27. Yang, F., Zhang, J., Liu, Q., Liu, H., Zhou, Y., Yang, W., Ma, W. (2022). Improvement and Re-Evolution of Tetraploid Wheat for Global Environmental Challenge and Diversity Consumption Demand. *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (4), 2206. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms23042206>

28. Літун, П. П., Кириченко, В. В., Петренкова, В. П., Коломацька, В. П. (2009). Системний аналіз в селекції польових культур. Харків, 354.

29. Царенко, О. М., Злобін, Ю. А., Скляр, В. Г., Панченко, С. М. (2000). Комп'ютерні методи в сільському господарстві та біології. Суми, 200.

30. Liubych, V., Novikov, V., Polianetska, I., Usyk, S., Petrenko, V., Khomenko, S. et. al. (2019). Improvement of the process of hydrothermal treatment and peeling of spelt wheat grain during cereal production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (11 (99)), 40–51. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.170297>