

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

УДК 663.993

Кваліфікаційна робота на правах  
рукопису

**КЛИМЧУК Владислав Анатолійович**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ  
ОТРИМАННЯ СОЛОДУ В УМОВАХ НЕВЕЛИКИХ ВИРОБНИЦТВ**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело

\_\_\_\_\_ КЛИМЧУК В. А. \_\_\_\_\_  
(підпис) (ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
к.т.н., доц. Медведський О.В.

Житомир – 2022

## АНОТАЦІЯ

Климчук В. А. **Підвищення ефективності технологічного процесу отримання солоду в умовах невеликих виробництв.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2022 р.

Метою кваліфікаційної роботи є пошук основних раціональних конструкційних рішень виготовлювача карамельного солоду для умов невеликих виробництв.

Виконано аналіз серійних виготовлювачів карамельного солоду, встановлено їх переваги та недоліки, зроблено висновки щодо шляхів удосконалення.

У кваліфікаційній роботі вирішується наукове завдання підвищення енергетичної ефективності виготовлювача карамельного солоду шляхом обґрунтування технологічних параметрів та температурних режимів роботи.

За результатами дослідження встановлено оптимальні конструкційно-технологічні параметри обсмажувача карамельного солоду для отримання продукту високої якості.

**Ключові слова:** обертовий барабан, внутрішній шнек, температурний напір, частота обертання.

## ANNOTATION

Klymchuk V. A. **Increasing the Efficiency of the Technological Process of Obtaining Malt in the Conditions of Small Productions.** – Qualification work on manuscript rights.

Qualification work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2022

The purpose of the qualification work is to find the main rational design solutions of the caramel malt producer for the conditions of small productions.

An analysis of serial manufacturers of caramel malt was performed, their advantages and disadvantages were determined, and conclusions were drawn regarding ways of improvement.

The qualification work solves the scientific task of increasing the energy efficiency of the caramel malt producer by substantiating technological parameters and operating temperature regimes.

Based on the results of the study, the optimal structural and technological parameters of the caramel malt roaster were established to obtain a high-quality product.

**Key words:** rotating drum, internal screw, temperature pressure, rotation frequency.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ПИВОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА .....	7
1.1. Оцінка технологій виробництва пива та солоду .....	7
1.2. Оцінка конструкційних особливостей технологічного обладнання для виробництва карамельного солоду .....	12
1.3. Висновки до розділу 1 .....	15
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВИГОТОВЛЮВАЧА КАРАМЕЛЬНОГО СОЛОДУ .....	16
2.1. Обґрунтування напрямків удосконалення .....	16
2.2. Розроблення конструкції виготовлювача карамельного солоду .	17
2.3. Висновки до розділу 2 .....	21
РОЗДІЛ 3. ВСТАНОВЛЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЮВАЧА КАРАМЕЛЬНОГО СОЛОДУ .....	22
3.1. Встановлення впливу технологічних параметрів виготовлювача карамельного солоду на витрати енергії .....	22
3.2. Встановлення впливу технологічних параметрів запропонованого обсмажувача на якісні показники карамельного солоду .....	29
3.3. Висновки до розділу 3 .....	31
ВИСНОВКИ .....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	35

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Виробництво пива – багатоетапний та складний технологічний процес, який вимагає знань та вмінь. Важливим у розширенні асортименту видів продукції пивоварів є використання якісної сировини, зокрема солоду. Невеликі виробництва, броварні ресторанних господарств використовують у виробництві пива уже приготований солод із заданими характеристиками. Це не дає можливості розширити асортимент та залучити більше споживачів.

Промисловість пропонує різноманітне технологічне обладнання для виробництва пива у невеликих обсягах, починаючи від 50 літрів за один цикл і закінчуючи декількома сотнями літрів. Але у комплект обладнання не входить виготовлювач карамельного солоду. Відомо, що за допомогою виготовлювача можна отримати солод для виробництва як світлих так і темних сортів пива. Це визначається технологічними режимами обсмажування. Проте, обладнання для задоволення невеликих виробництв на ринку не пропонується. Відомі виготовлювачі карамельного солоду характеризуються великими габаритами та значною продуктивністю. Наявне серійне обладнання має велику енергоемність процесу виробництва, що не підходить для умов невеликих підприємств. Окрім цього, недостатньо пропрацьовано механізми підвищення інтенсивності виробничого процесу, зокрема перемішування та нагріву, ефективного використання гріючого середовища.

Тому, дослідження шляхів інтенсифікації виробництва карамельного солоду високої якості в умовах невеликих виробництв з розробкою малогабаритного та енергетично ефективного обладнання є актуальним завданням сьогодення.

**Мета і задачі досліджень.** Метою досліджень є підвищення ефективності виготовлювача карамельного солоду шляхом удосконалення конструкції та технологічних режимів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних задач:

- оцінити технологічні схеми виробництва карамельного солоду та конструкційні особливості обладнання для встановлення шляхів удосконалення;

- встановити вплив технологічних та кінематичних режимів роботи на показники енергетичної ефективності виробництва карамельного солоду;

- встановити раціональні конструкційні параметри та режими роботи виготовлювача карамельного солоду для невеликих виробництв;

- визначити вплив технологічних параметрів та режим роботи запропонованого виготовлювача карамельного солоду на якісні показники готового продукту.

**Об’єкт дослідження** – виготовлювач карамельного солоду періодичної дії із обертовим барабаном.

**Предмет дослідження** – вплив технологічних параметрів та режимів роботи на ефективність технологічного процесу.

**Методи досліджень.** При вирішенні сформульованих завдань на кваліфікаційну роботу використовували відомі положення теорії математичного моделювання із застосуванням положень масообмінних процесів, теплотехніки та технічної термодинаміки. Теоретичні дослідження проводились з метою отримання аналітичних та графічних залежностей, які дозволяють оцінити вплив конструкційно-технологічних параметрів запропонованого виготовлювача на ефективність виробництва та якість готового продукту.

Обробка та аналіз результатів досліджень здійснювалась з використанням теорії ймовірності, кореляційного та регресійного аналізу, використовувався комп’ютерний програмний продукт Microsoft Excel.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення та результати досліджень кваліфікаційної роботи доповідались і отримали позитивну оцінку на внутрішньовузівських міжфакультетських та міжнародній конференціях, відображені у наступних друкованих працях:

1. Климчук В. А.. Аналіз обладнання для виробництва карамельного солоду. *Студентські читання–2021* : матеріали науково-практичної конференції. 15 листопада 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 189–191.

2. Медведський О. В., Климчук В. А. Удосконалення конструкції виготовлювача карамельного солоду. *Студентські читання–2022* : матеріали науково-практичної конференції. 30 листопада 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 5–7.

3. Медведський О. В., Климчук В. А. Визначення показників енергетичної ефективності виготовлювача карамельного солоду. *Біоенергетичні системи* : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 21–23.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 3 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел (20 найменувань). Текст кваліфікаційної роботи виконано українською мовою на 36 сторінках загального обсягу машинописного тексту, проілюстровано 15 рисунками.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ПИВОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

### 1.1. Оцінка технологій виробництва пива та солоду

Пиво – досить популярний слабоалкогольний напій, котрий вирізняється особливими смаковими відтінками та має гарну здатність тамувати спрагу. Відзначається, також, значна поживність та вміст вітамінів та мікроелементів, які сприяють кращому функціонуванню кишково-шлункового тракту людини. Так, один літер пива забезпечує 1/3 денної потреби людини у вітамінах  $B_2$  та  $B_6$ , а загальний вміст вітамінів становить 210 мг. [1, 2]

Технологія виробництва пива складається із декількох технологічних етапів (рис. 1.1), кожен із яких вимагає відповідних знань та вмінь.

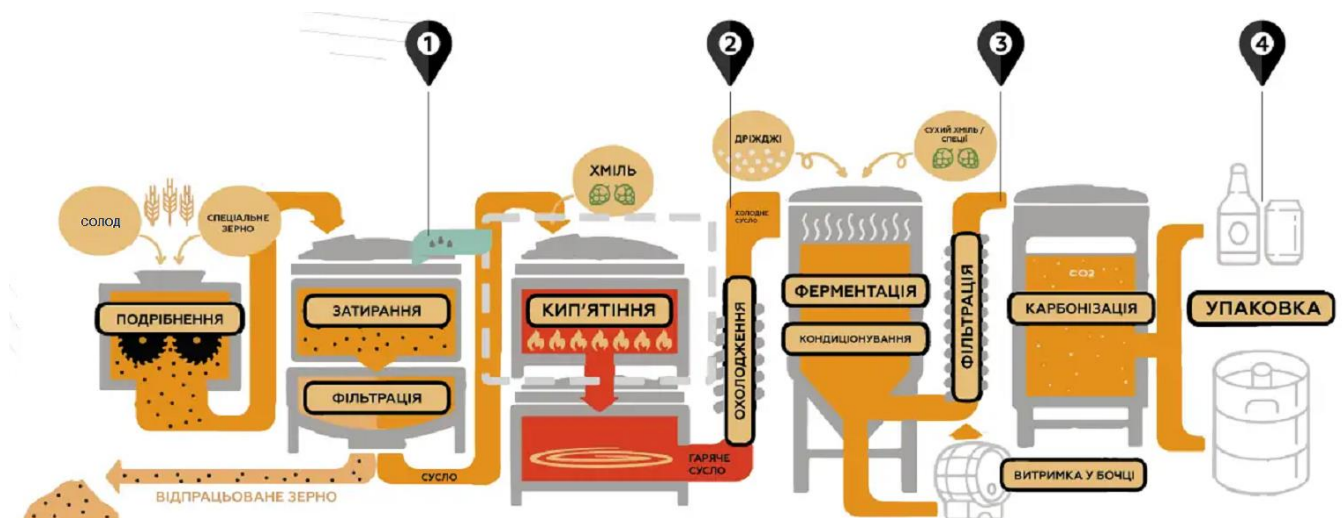


Рис. 1.1. Структурна схема виробництва пива [3]

Все більшої популярності набувають приватні броварні із невеликим обсягом виробництва. Для задоволення попиту на оснащення таких виробництв Чеська фірма «Czech brewery system» пропонує номенклатуру відповідного

обладнання різного об'єму виробництва, починаючи від 50 літрів сула на одну партію або на один пивоварний день (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Комплект обладнання пивоварні BVM-050: 1 – місткість для заварювання сула; 2 – ферментатор первинного бродіння; 3 – ферментатор вторинного бродіння із робочим тиском 1,2 бар; 4 – охолоджувач із чотирма насосами [4]

Броварня BREWMASTER BVM-200 (рис. 1.3) призначена для задоволення потреби невеликого виробництва. До складу обладнання входить



ємність для заварювання сусла на 200 літрів та декілька ферментаторів загальним об'ємом 240-525 літрів. Окрім цього додатково присутні компоненти устаткування які необхідні для кінцевого виробництва пива, відповідно до прийнятої технологічної схеми виробництва. [5]



Рис. 1.3. Приватна броварня BREWMASTER BVM-200 [5]

На ринку представлено велике різноманіття типів пива, які відрізняються смаком, кольором, ароматом, насиченням смаку, здатністю до піноутворення та ін. показниками. А тому стає зрозумілим, що для виробництва різних типів пива необхідно використовувати в різній кількості ті або інші типи солоду, що визначають особливості даного типу пива. При цьому базовим вважається нормальний світлий солод, а решта є похідними позиціями. Це стосується отримання, окрім світлого пива, напівтемного та темного. [5, 7]

Отже, солод – це пророщені зерна різних видів злакових культур за певних умов вологості та температури. Такий процес ще називають солодоращенням. Для одержання солоду як правило використовують ячмінь та жито, в деяких випадках використовують рис, пшеницю, овес та просо. У виробництві пива найбільшого поширення набуло використання ячмінного солоду. Під час пророщення у ячмені накопичуються ферменти, відбувається

розпушування та руйнація стінок зернини. Це сприяє кращому видобуванню крохмалю, білкових та різних речовин в процесі приготування сусла. [2]

Послідовність приготування пивного солоду передбачає декілька етапів [2, 7]:

1. підготовка зерна ячменю;
2. замочування зерна;
3. пророщування зерна;
4. висушування;
5. відокремлення паростків;
6. дозрівання солоду.

З метою отримання бажаних технологічних властивостей (відповідного смаку, кольору, аромату) та здатності до тривалого зберігання, солод висушують до вологості 2-2,5%. Залежно від температурних режимів та тривалості висушування можна отримати солод декількох видів [2]:

- білий;
- світлий;
- карамельний;
- темний;
- смажений та ін.

Для визначення кольору солоду та пива броварі користуються шкалою запровадженою Європейською конвенцією броварників (*European Brewing Convention – EBC*). Так для кольору класичного світло-золотавого пива типу «Pilsner» показник EBC знаходиться в межах 6-8 одиниць, а для темних сортів пива (портери або стаути) значення показника досягає 300 одиниць [2, 6].

Для розширення номенклатури та сортів пива використовують карамельний солод. Для отримання базового карамельного солоду, зелений солод зволожують до 45-50% та витримують протягом 30-36 годин при температурі 50°C. Потім протягом 90 хвилин за допомогою обсмажувальних барабанів солод витримують при температурі 60-80°C. Наступні операції визначаються сортом пива, який необхідно отримати [6]:

- прозоро-світлий карамельний солод «Carapils» на закінчення лише висушують;
- світлий карамельний солод обробляють як темний карамельний солод, але не так довго і не так інтенсивно;
- темний карамельний солод приблизно за 60 хв. нагрівають до 150-180°C при швидкому видаленні водяної пари, що утворюється, і підтримують цю температуру від 1 до 2 годин для карамелізації компонентів солоду. Потім солод видаляють з барабана і швидко та рівномірно його охолоджують. Завдяки цьому навіть за вологості 6% вміст зерен залишається м'яким.

Відповідно відмінностям у технології приготування ці сорти карамельного солоду мають різні властивості і застосовуються по-різному, наприклад [5]:

1) «CarapilsB» при додаванні до затирки в кількості 8-12% дає світлий колір, кращу піну та підвищену повноту смаку. Кольоровість у нього – 3-5 од. ЕВС, і він застосовується для приготування пива типу «Пілзнер» у кількості 3-5%. Для слабоалкогольного та безалкогольного пива його додають у кількості до 40%. «CarapilsB» покращує піну та посилює повноту смаку.

2) Світлий карамельний солод має кольоровість у 25-30 од. ЕВС і застосовується насамперед для світлого пива з метою посилення повноти смаку, посилення солодового аромату та отримання більш насиченої кольоровості. Його додають для отримання світлого та «святкового» пива у розмірі 10-15%, для легкого пива, для слабоалкогольного та безалкогольного пива – до 40%.

3) Темний карамельний солод виготовляють із різною кольоровістю – від 80 до 150 од. ЕВС. Він істотно впливає на посилення повноти смаку, посилення солодового аромату і на отримання більш насиченої кольоровості пива. Цей солод використовують для приготування темного пива в кількості 5-10% і до 2,5% – для легкого пива.

Таким чином, будь-яке виробництво пива, відповідно до технологічної схеми на рис. 1.1, розпочинається із базового набору складових, основним серед яких є солод. Для виробництва карамельного солоду використовують обсмажувальні агрегати у вигляді обертових барабанів.

## **1.2. Оцінка конструкційних особливостей технологічного обладнання для виробництва карамельного солоду**

Для теплової обробки солоду використовують спеціальне обсмажувальне обладнання. Таке обладнання може працювати як за умови атмосферного тиску так і у середовищі вакуумметричного тиску [8].

Класифікують обладнання для обсмажування солоду [7, 8]:

- за видом теплової обробки (смаження, тушкування, припускання, пасерування);
- за способом передачі теплоти (конвекція, теплопередача, радіаційний);
- за видом середовища для нагрівання (без додавання жиру, в малій кількості жиру, у великій кількості жиру – у фритюрі).

Залежно від виду теплоносія розрізняють жаровні з обсмажуванням в гарячому маслі, в потоці гарячого повітря, під впливом ІЧ-променів. В жаровнях з паровим обігрівом використовують водяну пару під тиском 0,8–1,2 МПа, який спрямовується до нагрівальних камер [7, 8].

За конструктивним виконанням апарати для смаження мають циліндричний барабан зварної конструкції (рис. 1.4), що приводиться в дію за допомогою електроприводу.

Під барабаном розташована топка. Продукти горіння омивають зовнішню поверхню барабана під час його обертання та виходять у газовідвід. Внутрішня поверхня барабана обладнана спіральними напрямними, які інтенсифікують процес обробки завантаженого продукту за рахунок перемішування.

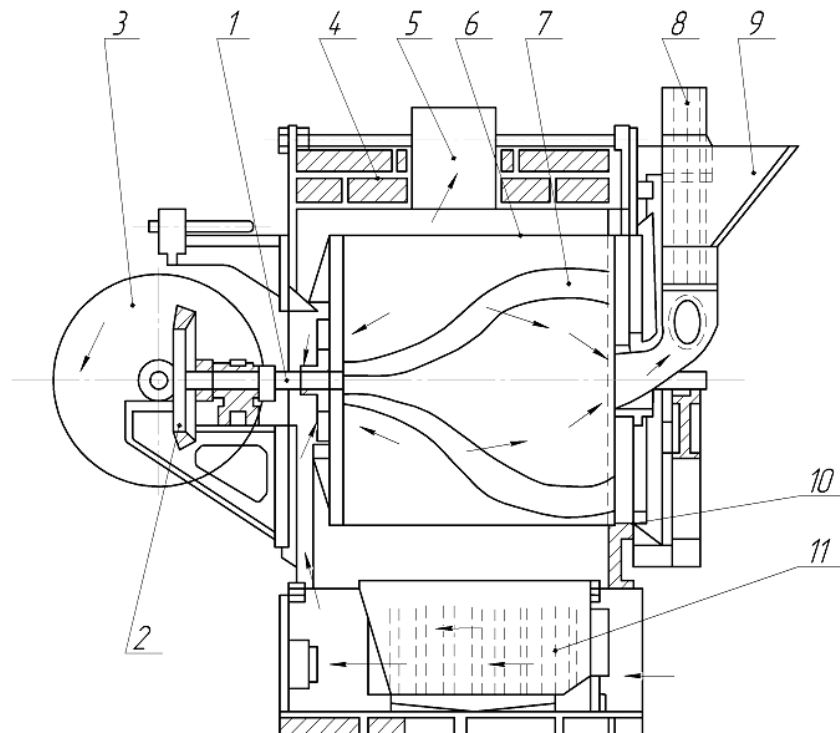
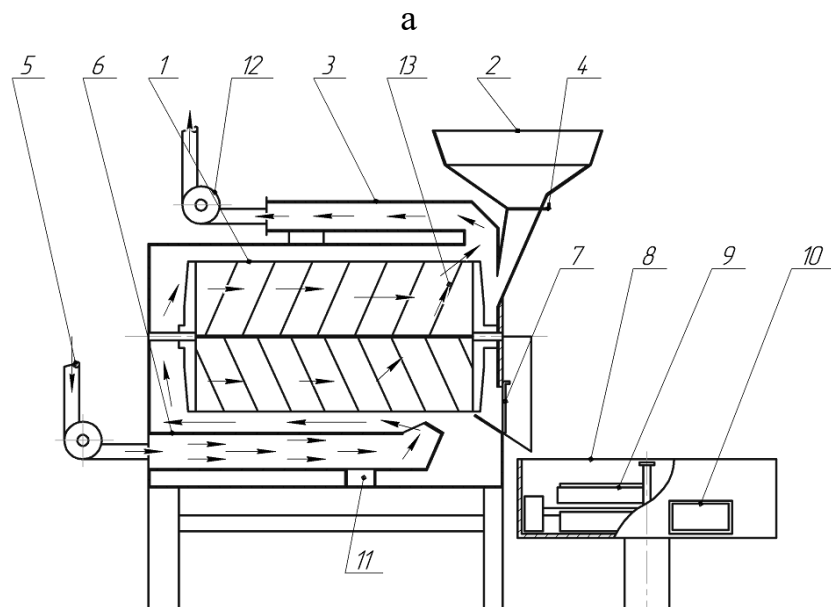


Рис.1.4. Структурна схема обсмажувача з горизонтальним циліндричним барабаном: 1 – вал барабана; 2 – редуктор; 3 – пасовий привод; 4 – цегляна кладка; 5 – відвід продуктів горіння; 6 – барабан; 7 – спіральні напрямні; 8 – витяжна труба; 9 – завантажувальна горловина; 10 – видалення готового продукту; 11 – топка [7, 8]

Процес смаження в барабанного типу досить тривалий. Регулювання температурного режиму здійснюється за допомогою зміни подачі палива. Як правило, місткість циліндричних барабанів складає 100 та 300 кг. [7, 8]

Для виробництва карамельного солоду використовують, також, обладнання з барабаном виробництва фірми «Технолог» (рис. 1.5).

На місці топки, як у попередньому варіанті, встановлено газовий пальник. При цьому продукти горіння рухаються аналогічно, знизу до верху. Нормативний режим роботи забезпечується автоматично, шляхом взаємодії систем вентиляції, пневмоавтоматики та обігріву. Вентиляційна система обладнана одним припливним та двома витяжними вентиляторами. Повітряна та опалювальна системи керуються системою автоматики [9].



б

Рис. 1.5. Обсмажувач солоду барабанного типу виробництва фірми «Технолог»: а – загальний вигляд; б – структурна схема: 1 – барабан робочий; 2 – приймальна місткість для солоду; 3 – зворотна труба; 4 – засувка; 5 – вентилятор; 6 – порожнина нагрівальна; 7 – вивантажувальна засувка; 8 – диск

охолоджувача; 9 – перемішувач; 10 – засувка охолоджувача; 11 – канал для повітря; 12 – вентилятор подачі повітря; 13 – лопатки. [9]

Таким чином, наявність центрального управління дозволяє задавати і автоматично підтримувати технологічний режим обсмажування. Це значно спрощує роботу операторів обладнання.

Серед номенклатури запропонованих технічних рішень зустрічаються конструкції обсмажувача солоду із вертикальною робочою камерою. В такому обладнанні суміщена система вертикального переміщення, під час обробки солоду гарячим повітрям чи парою, із обертовою системою у вигляді циліндра для повторної подачі. Обсмажувача такого типу не набули широкого поширення із-за значних габаритів та складності обслуговування.

Зважаючи на досить велику номенклатуру технологічного обладнання із різними конструкційними рішеннями та способами нагрівання сировини у робочих камерах, їм притаманні спільні недоліки. В першу чергу це значна енергоємність та недосконалість елементів інтенсифікації процесу, що небажано для невеликих виробництв.

### **1.3. Висновки до розділу 1**

1. Аналіз технологічних схем виробництва пива вказав на важливість використання різноманітних варіацій солоду як основного сировинного компоненту.

2. Виконана оцінка технічних засобів виробництва карамельного солоду вказала на широке поширення обладнання барабанного типу. Але значна енергоємність технологічного процесу не дозволяє використовувати обладнання для умов невеликих виробництв – приватних броварень.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВИГОТОВЛЮВАЧА КАРАМЕЛЬНОГО СОЛОДУ

#### 2.1. Обґрунтування напрямків удосконалення

Запорукою успішного бізнесу пивоварних підприємств невеликої потужності є випуск різноманітних сортів пива для задоволення якомога більшої кількості смакових вподобань відвідувачів ресторанів чи барів. У попередньому розділі зазначено можливість розширення видів продукції завдяки використанню карамельного солоду різних технологій приготування. Це дає змогу варити як світлі так і темні сорти пива. Але наявне на ринку обладнання для обсмажування солоду має промислові масштаби виробництва. А це обмежує невеликих виробників та змушує їх купувати уже готовий солод у промислових виробників.

Розроблення обладнання з невеликим обсягом виробництва карамельного солоду, наприклад до 300 кг за один цикл, дозволить приватним невеликим броварням значно розширити асортимент продукції. Це викличе позитивний соціальний ефект, оскільки продукція пивоварів є традиційно затребуваним продуктом, обсяги споживання якого зростають, особливо у відповідні сезони.

Окрім значних габаритів та великої продуктивності, як правило 1-1,5 тон за один цикл, розглянуті у першому розділі серійні обсмажувачі солоду мають деякі конструкційні та технологічні недоліки. В першу чергу це стосується інтенсифікації процесу перемішування солоду під час теплової обробки. В більшості випадків використовуються машини барабанного типу із розміщеними у внутрішній порожнині лопатками. Лопатки мають різну геометричну форму та спосіб розміщення, зокрема по гвинтовій лінії. Але цього недостатньо для отримання належної інтенсивності обсмаження, яке триває 2,5-3 години, залежно від виду кінцевого солоду [10]. Тому, удосконалення конструкційних елементів для інтенсифікації процесу перемішування солоду



під час обертання барабана має бути враховане у пропонованій конструкції обсмажувача.

Іншим, не менш важливим напрямком інтенсифікації технологічного процесу є максимальне використання можливостей систем додаткового нагрівання продукту. З цією метою деякі виробники пропонують подавати нагріте повітря. Але таке рішення може негативно вплинути на кінцеві якісні технологічні показники карамельного солоду та на смакові особливості виготовленого пива.

Тому, найбільш раціональною конструкцією нового обладнання має вважатись технічна система із можливістю додаткового підігрівання продукту під час об смаження без негативного впливу на його якісні показники.

## **2.2. Розроблення конструкції виготовлювача карамельного солоду**

При удосконаленні обсмажувача карамельного солоду необхідно забезпечити однаковий опір по ходу руху солоду під час обсмаження. При втіленні відповідного конструкційного рішення можна стабілізувати рух продукту, усунути небажане додаткове його ущільнення і стиск і, як наслідок, підвищити якість обсмажування.

Для вирішення вказаної проблеми, пропонується барабанний обсмажувач обладнати додатковим елементом у вигляді шнека (рис. 2.1-2.2). Шнек розташовується по осі обертання барабана та має спрямування витків протилежне внутрішнім виткам барабана. Це дозволить підвищити інтенсивність перемішування солоду під час обсмажування. Так, порції котрі піднімаються внутрішніми лопатками барабана, при певному куті повороту, під дією гравітації будуть рухатись донизу, потім підхоплюватись в зоні знаходження витків шнека та рухатись в зворотному напрямку, далі опускатись до внутрішніх витків барабана і підніматись вгору. Цикл буде повторюватись з

кожним обертотом барабана, що забезпечить інтенсивніше перемішування, тому, якість обсмажування має зростати, а тривалість процесу має знижуватись [11].

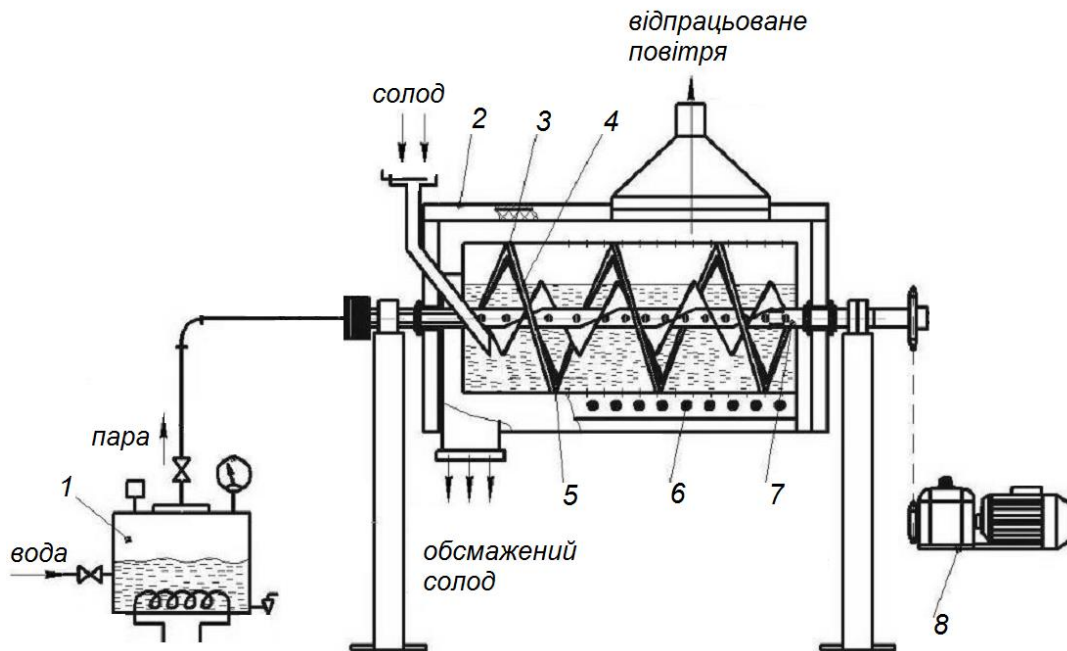


Рис. 2.1. Структурна схема розробленого обсмажувача солоду: 1 – генератор пари; 2 – корпус станини; 3 – барабан; 4 – лопатки барабана; 5 – кожух барабана; 6 – трубчасті електронагрівачі; 7 – порожнистий вал внутрішнього шнека; 8 – редуктор із електродвигуном.

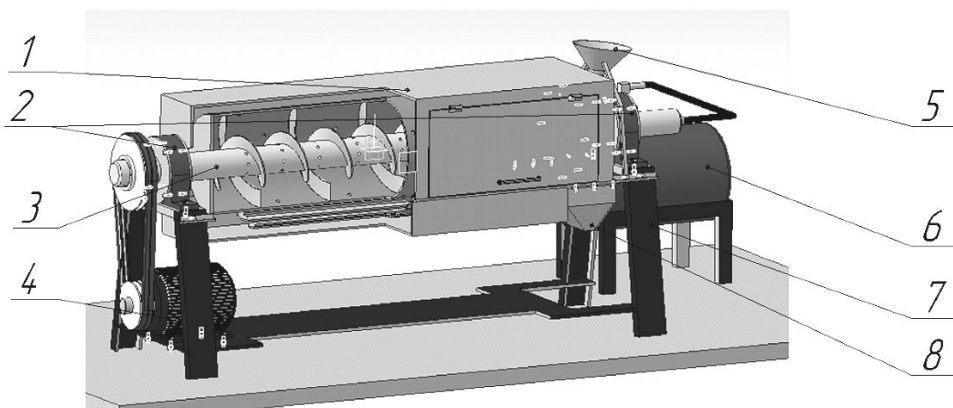


Рис. 2.2. Загальний вигляд виготовлювача карамельного солоду: 1 – зовнішній кожух; 2 – підшипники; 3 – порожнистий вал шнека; 4 – електродвигун; 5 – завантажувальна горловина; 6 – генератор пари; 7 – корпус; 8 – вивантажувальна горловина.

За умови використання запропонованої конструкції виготовлювача солоду карамельного, загальне рівняння опису тепловіддачі [12, 13, 14, 15] буде мати вигляд:

$$q = \alpha \cdot S \cdot (t_1 - t_2), \quad (2.1)$$

де  $S$  – загальна площа поверхонь зернин солоду, м<sup>2</sup>;

$\alpha$  – коефіцієнт віддачі тепла матеріалом барабана до зернин солоду, Вт/м<sup>2</sup>×К;

$t_1 - t_2$  – різниця між температурою матеріалу барабана та зернин солоду, °С.

Відповідно до рівняння (2.1) інтенсивність потоку тепла під час обсмажування залежить від різниці температур стінок барабана та температури сировини. Тому, одним із шляхів інтенсифікації процесу може бути використання цієї особливості. Для цього необхідно підняти температуру в середині барабана. З цією метою через отвори у порожнистому валу шнека до внутрішньої порожнини барабана подається пара під тиском 150 кПа.

Використання пари дозволяє інтенсифікувати теплообмінні процеси під час обсмаження солоду за рахунок інтенсивніших процесів тепловіддачі стінки барабана. Окрім цього, використання пари дозволяє позбутись неприємних запахів та гіркого присмаку карамельного солоду.

З врахуванням геометричних параметрів виготовлювача карамельного солоду та фізичної сутності процесу теплообміну [11, 12, 16, 17], рівняння (2.1) можна записати у вигляді:

$$q = \frac{\lambda}{D} \cdot C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^p \cdot S \cdot (t_1 - t_2), \quad (2.2)$$

де  $D$  – діаметр барабана, м;

$L$  – довжина барабана, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу барабана, Вт/м×К;

$Re$  – критерій Рейнольдса;

$Pr$  – критерій Прандтля;

$C, n, p, m$  – довідникові коефіцієнти.

Відповідно до теорії теплопередачі [12, 13, 14, 15] в умовах природної конвекції коефіцієнт тепловіддачі в повітряному середовищі не перевищує 12-15 Вт/м<sup>2</sup>К, в той час як у середовищі перегрітої водяної пари коефіцієнт тепловіддачі може сягати величини 40-50 Вт/м<sup>2</sup>К.

При цьому необхідно відзначити, що водяна пара значно краще поглинає променеву енергію нагрівальних електричних елементів. Тому застосування в середині барабана як додаткове гріюче середовище водяної перегрітої пари дозволяє істотно інтенсифікує процес теплової обробки зеленого солоду.

Слід відмітити необхідність використання у структурі установки окремого генератора пари. Важливо отримувати пар із обладнання локального, оскільки централізоване забезпечення має технічну пару, що неприпустимо при виробництві солоду.

Запропонована конструкція виготовлювача карамельного солоду повинна дозволяти змінювати технологічні налагодження залежно від режимів роботи. Це стосується частоти обертання барабана, інтенсивності витрати пари, тиску пари, коефіцієнта наповнення барабана, температура в середині барабана та тривалості об смаження.

З технічної точки зору важливим є реалізація технологічного процесу із найменшими затратами енергії при збереженні високих показників якості готового продукту.

Відповідно до технології виробництва карамельного солоду, з врахуванням особливостей конструкції запропонованого обладнання технологія використання полягає в наступному. На першому етапі обсмаження, завантажений солод витримують протягом 30 хв. за температури 65°C. На наступному етапі виробництва, температура піднімається до 150-180°C, а тривалість процесу становить 140-180 хв. Барабан повинен бути заповнений на 50-80%, а частота його обертання не перевищувати 2-5 об/хв.

Подальші дослідження будуть проводитись у напрямку встановлення технологічних та конструкційних параметрів за яких досягається отримання кінцевого продукту належної якості .

### **2.3. Висновки до розділу 2**

1. Ретельний аналіз технічних засобів та технологій виробництва карамельного солоду дозволив виокремити основні напрямки подальшого удосконалення обсмажувача барабанного типу, як найбільш поширеного обладнання.

2. Запропонована конструкція виготовлювача карамельного солоду. Для інтенсифікації перемішування у внутрішній порожнині барабана встановлений шнек, витки якого мають протилежне до витків лопатей барабана спрямування. Вал шнека виконано порожнистим із отворами через які до барабана подається пара під тиском 150 кПа.

3. Встановлено, що використання перегрітої пари дозволяє інтенсифікувати процес теплообміну оскільки її коефіцієнт тепловіддачі становить 40-50 Вт/м<sup>2</sup>К, що у три рази вище ніж у повітря. За рахунок таких особливостей пари процес обсмажування відбувається швидше, що сприяє зниженню питомих витрат енергії в цілому.

## РОЗДІЛ 3

### ВСТАНОВЛЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЮВАЧА КАРАМЕЛЬНОГО СОЛОДУ

#### 3.1. Встановлення впливу технологічних параметрів виготовлювача карамельного солоду на витрати енергії

Основною метою створення виготовлювача карамельного солоду було не тільки забезпечення високої його якості, а виконання процесу обсмаження із найменшими витратами енергії та найбільшою продуктивністю. При цьому, будемо керуватись питомими показниками [18, 19].

Так, питомі витрати енергії визначаються як відношення загальних витрат енергії впродовж технологічного процесу до кількості готового продукту отриманого за один цикл:

$$E = \frac{E_{\Sigma}}{G_{\delta}}, \quad (3.1)$$

де  $E_{\Sigma}$  – сумарні витрати енергії, кВт×год;

$G_{\delta}$  – вміст барабана виготовлювача солоду за один цикл роботи, кг.

Сумарні витрати енергії можна встановити за формулою:

$$E_{\Sigma} = E_{\delta} + E_e + E_n, \quad (3.2)$$

де  $E_{\delta}$  – енергія яка витрачається на привод барабана, кВт×год;

$E_e$  – енергія яка витрачається на електронагрів тенями, кВт×год;

$E_n$  – енергія яка витрачається на виробництво пари, кВт×год.

Кількість виробленого карамельного солоду залежить від геометричних параметрів барабана та ступеня його заповнення:

$$G_{\bar{o}} = V_{\bar{o}} \cdot \rho_c \cdot \varphi, \quad (3.3)$$

де  $V_{\bar{o}}$  – конструкційний внутрішній об'єм барабана, м<sup>3</sup>;

$\rho_c$  – об'ємна маса продукту в барабані, кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi$  – ступінь заповнення об'єму барабану.

Відповідно до рівнянь (3.1-3.3) основними технологічними параметрами що впливають на енергетичну ефективність технологічного процесу виробництва карамельного солоду є: частота обертання барабана ( $n$ ); температура оброблення солоду ( $t_c$ ); тривалість процесу ( $T_u$ ) та ступінь заповнення барабана ( $\varphi$ ). Результати дослідження вказаних параметрів охарактеризовані графічними залежностями, поданими на рис. 3.1-3.4.

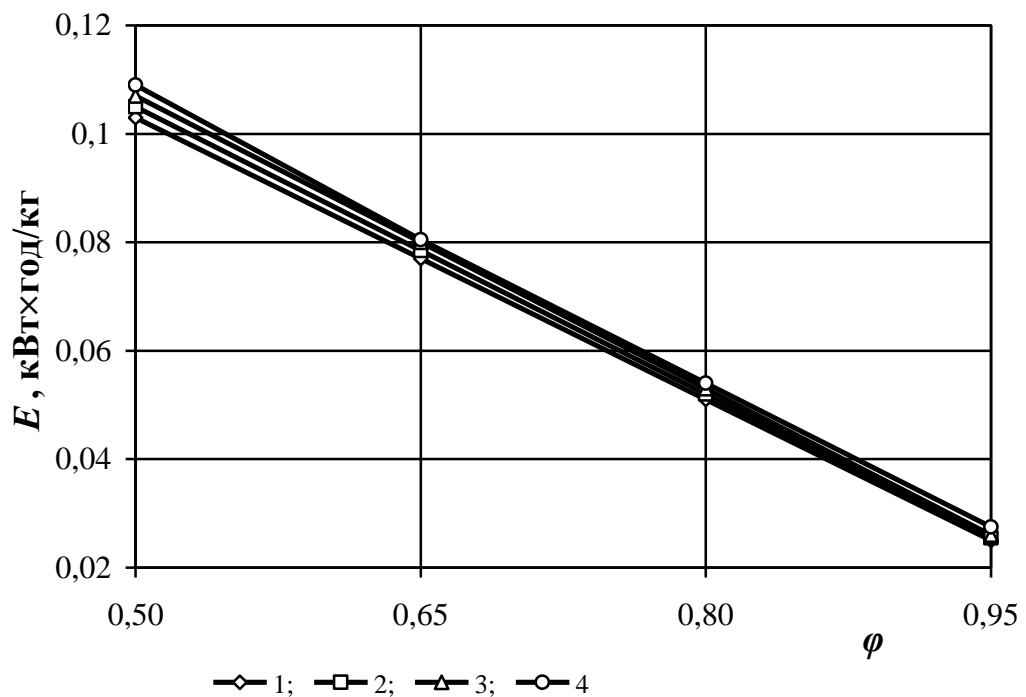


Рис. 3.1. Вплив ступеня заповнення барабана ( $\varphi$ ) на енергоємність процесу обсмаження ( $E$ ) за умови різної частоти обертання ( $n$ ): 1 –  $n=2,0$  об/хв; 2 –  $n=3,5$  об/хв; 3 –  $n=5,0$  об/хв; 4 –  $n=6,5$  об/хв.

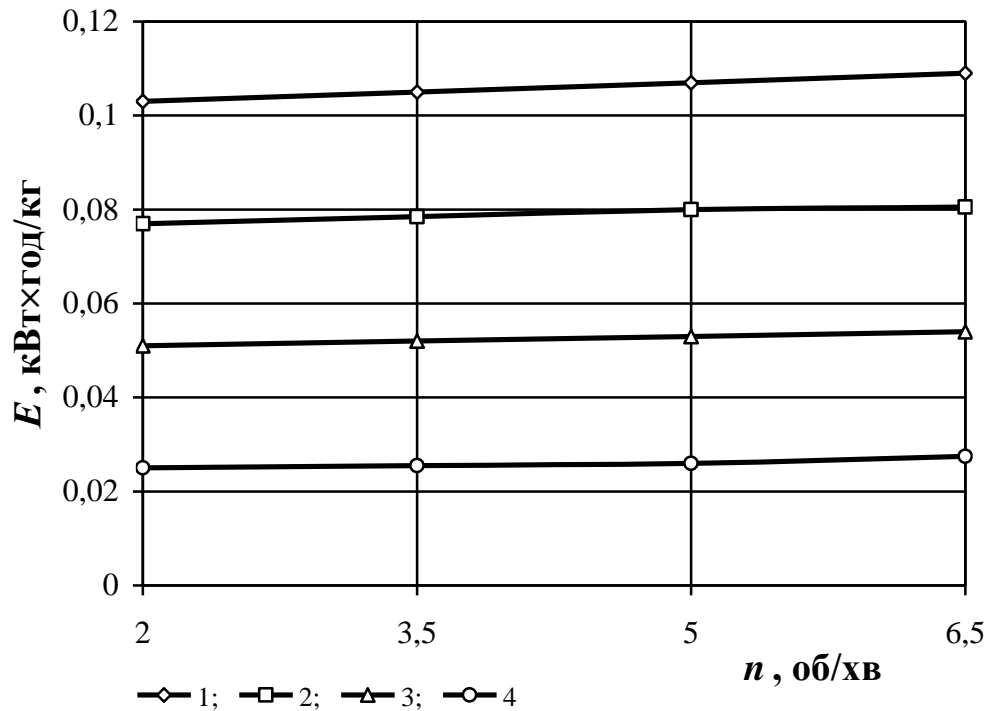


Рис. 3.2. Вплив частоти обертання барабана ( $n$ ) на енергоємність процесу обсмаження ( $E$ ) за умови різного ступеня заповнення барабана: 1 –  $\phi=0,5$ ; 2 –  $\phi=0,65$ ; 3 –  $\phi=0,8$ ; 4 –  $\phi=0,95$ .

Відповідно до графічних залежностей на рис. 3.1-3.2, можна зробити висновок про суттєвий вплив на енергоємність технологічного процесу ступеня заповнення барабана, незалежно від частоти обертання барабана. Так, зі зростанням ступеня заповнення барабана продуктом від 0,5 до 0,95 енергоємність технологічного процесу знижується у 4 рази. Пояснити це можна тим, що місткість барабана максимально заповнена продуктом обробки, а відповідно до рівняння (3.1) чим вищий вміст барабана виготовлювача солоду за один цикл роботи ( $G_{\phi}$ ) тим менша енергоємність процесу обсмажування.

Окрім цього на енергоємність впливає температура обробки солоду та тривалість обробки. Дослідження подані на рис. 3.1 та рис. 3.2 проводились при температурі  $150^{\circ}\text{C}$  та тривалості процесу 140 хв.

Рівняння регресії за результатами досліджень впливу частоти обертання та ступеня заповнення барабана на питомі витрати енергії має вигляд:



$$E_{n\varphi} = 0,0125 - 0,0095n + 0,3029\varphi + 0,0026n^2 - 0,0143n\varphi - 0,2569\varphi^2, \quad (3.4)$$

де  $n$  – частота обертання барабана, об/хв;

$\varphi$  – ступінь заповнення об'єму барабану.

Отже, рівняння (3.4) підтверджує оцінку вищого рівня значущості впливу ступеня заповнення барабана на енергетику процесу, порівняно із частотою обертання барабана.

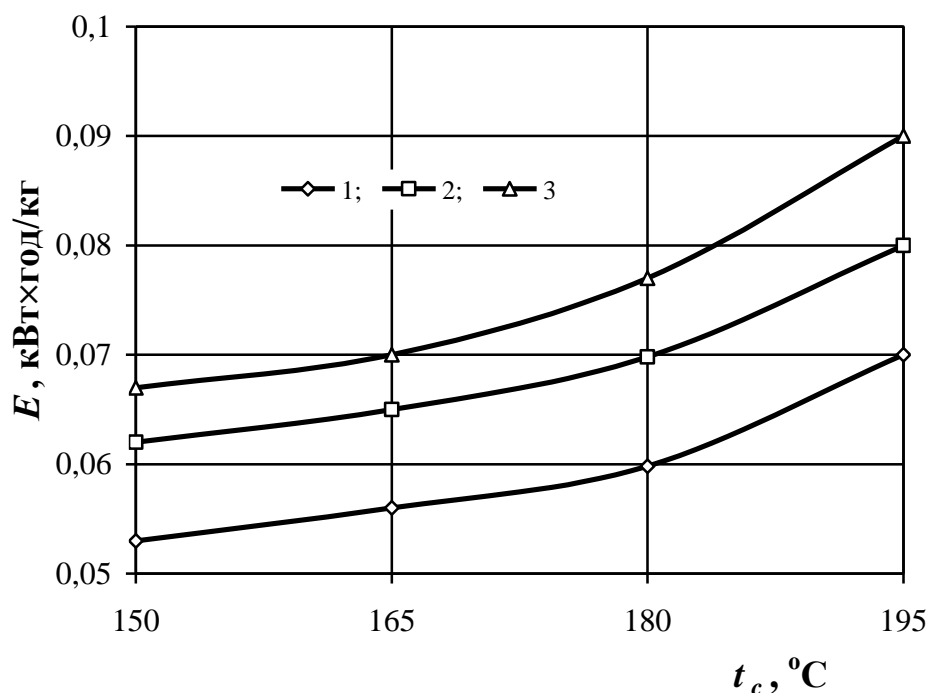


Рис. 3.3. Вплив температури обсмаження солоду ( $t_c$ ) на енергоємність виробництва ( $E$ ) за умови різної тривалості циклу: 1 –  $T_y=140$  хв.; 2 –  $T_y=160$  хв.; 3 –  $T_y=180$  хв.

З графічних залежностей, отриманих на рис. 3.3, можна зробити висновок про суттєвий вплив температури обсмажування солоду на енергоємність технологічного процесу. Так, зі зростанням температури від 150 до 195 °C, енергоємність циклу зростає на 32-34 % при зміні тривалості обсмажування від 140 до 180 хв. відповідно.

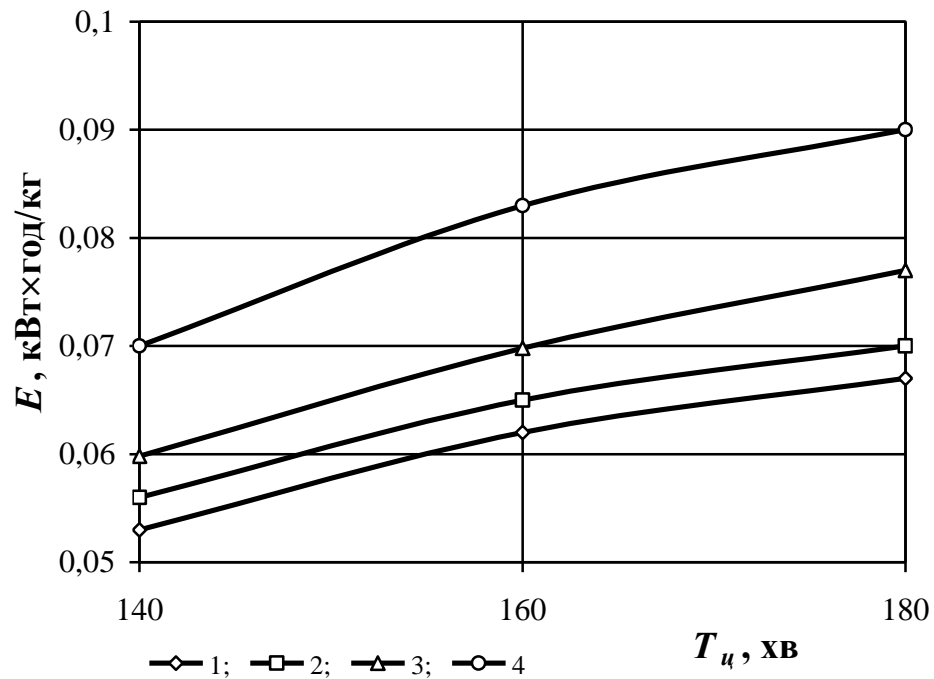


Рис. 3.4. Вплив тривалості циклу ( $T_u$ ) на енергоємність виробництва ( $E$ ) за умови різної температури обсмаження солоду ( $t_c$ ): 1 –  $t_c=150$  °C; 2 –  $t_c=165$  °C; 3 –  $t_c=180$  °C; 4 –  $t_c=195$  °C.

Відповідно до графічних залежностей на рис. 3.4, зі збільшенням тривалості від 140 до 180 хв. спостерігається зростання на 26-29 % енергоємності процесу обсмаження, незалежно від температури процесу. Таким чином, збільшення як температури так і тривалості процесу виробництва спричиняють зростання енергоємності отримання готового продукту, оскільки витрачається більше енергії нагрівальних елементів при більшій тривалості їх використання. Дослідження, подані на рис. 3.3-3.4 проводились при частоті обертання 5 об/хв. та ступені заповнення барабана на рівні 0,8.

Отримали рівняння регресії досліджень впливу температури обсмаження солоду та тривалості циклу на питомі витрати енергії:

$$E_{t_c T_u} = 0,2955 - 0,0044t_c + 0,0011T_u + 1,26 \cdot 10^{-5}t_c^2 + 3 \cdot 10^{-6}t_c T_u - 3,75 \cdot 10^{-6}T_u^2, \quad (3.5)$$

де  $t_c$  – температура обробки продукту, °C;

$T_u$  – тривалість циклу, хв.

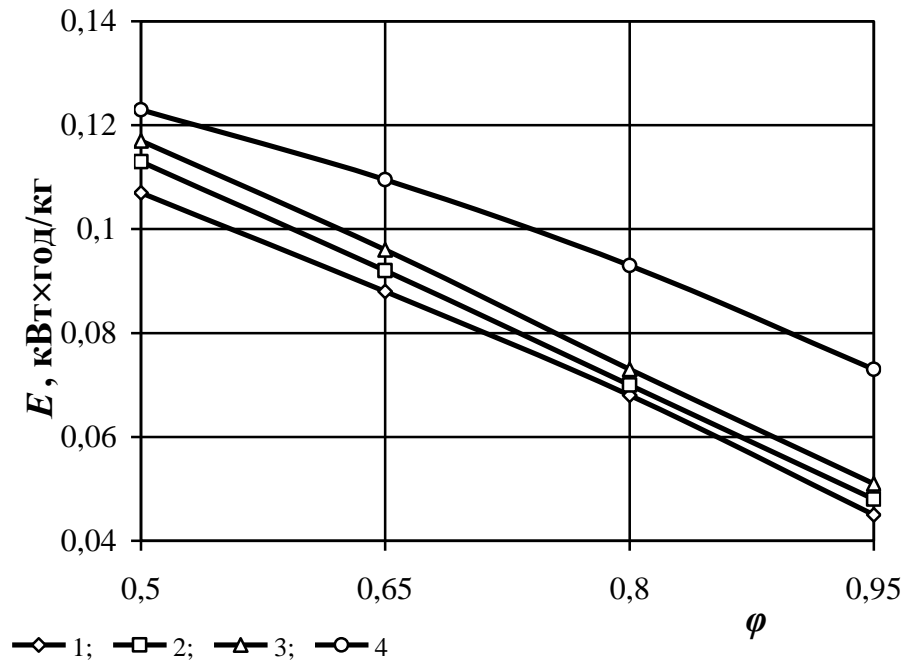


Рис. 3.5. Вплив ступеня заповнення барабана ( $\varphi$ ) на енергоємність виробництва ( $E$ ) за умови різної температури обсмаження солоду ( $t_c$ ): 1 –  $t_c=150^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_c=165^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_c=180^\circ\text{C}$ ; 4 –  $t_c=195^\circ\text{C}$ .

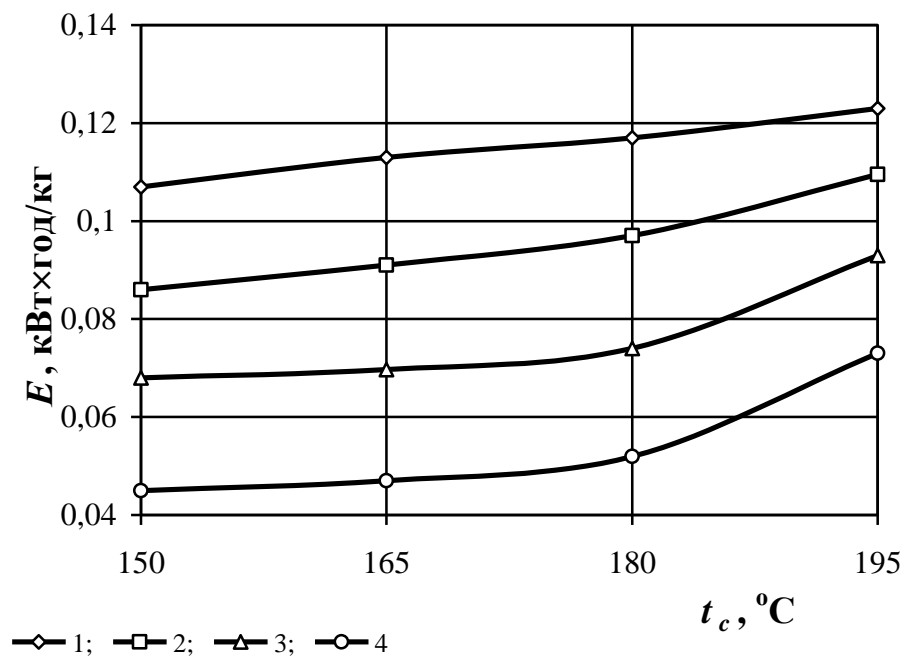


Рис. 3.6. Вплив температури обсмаження солоду ( $t_c$ ) на енергоємність виробництва ( $E$ ) за умови за умови різного ступеня заповнення барабана: 1 –  $\varphi=0,5$ ; 2 –  $\varphi=0,65$ ; 3 –  $\varphi=0,8$ ; 4 –  $\varphi=0,95$ .

Аналіз графічних залежностей, зображених на рис. 3.5-3.6, вказує що температура робочого процесу ( $t_c$ ) та ступінь заповнення ( $\varphi$ ) порожнини барабана має суттєвий вплив на енергоємність технологічного процесу при використанні розробленого виготовлювача карамельного солоду. Так, за рахунок максимального наповнення барабана ( $\varphi=0,95$ ) можна досягнути зниження витрат енергії у 2,4 рази при температурі 150 °С та у 1,7 рази при температурі 195 °С, за умови однакової тривалості процесу обсмаження ( $T_u=180$  хв.) та частоти обертання барабана ( $n=5,0$  об/хв).

Суттєве зростання енергоємності процесу спостерігається в діапазоні температур від 180 до 195 °С, особливо за умови значного заповнення робочого простору барабана. Так, при заповненні барабана на 80-95%, у вказаному діапазоні температур енергоємність зростає на 27-43%, порівняно із 7-13% в діапазоні зміни температур від 150 до 180 °С.

Отримали рівняння регресії досліджень впливу температури обсмаження солоду та ступені заповнення барабана на питомі витрати енергії:

$$E_{t,\varphi} = 0,5283 - 0,0043t_c + 0,1725\varphi + 1,29 \cdot 10^{-5}t_c^2 + 0,0005t_c\varphi - 0,0347\varphi^2, \quad (3.6)$$

де  $t_c$  – температура обробки продукту, °С;

$\varphi$  – ступінь заповнення об'єму барабану.

Аналіз рівняння (3.6) вказує на значущість розглянутих факторів температури процесу та ступені заповнення барабана на енергетику виробництва карамельного солоду.

Тому, в подальших дослідженнях необхідно встановити вплив розглянутих факторів технологічного процесу на показники якості готового продукту.

### 3.2. Встановлення впливу технологічних параметрів запропонованого обсмажувача на якісні показники карамельного солоду

Одним із показників якості карамельного солоду вважається вміст карамельного зерна у готовому продукті. Цей показник визначає вміст часточок карамельного солоду належної якості до загальної кількості отриманого карамельного солоду під час обсмажування.

Дослідження вмісту карамельного зерна у готовому солоді при використанні розробленого виготовлювача, залежно від технологічних режимів роботи, подано на рис. 3.7-3.8.

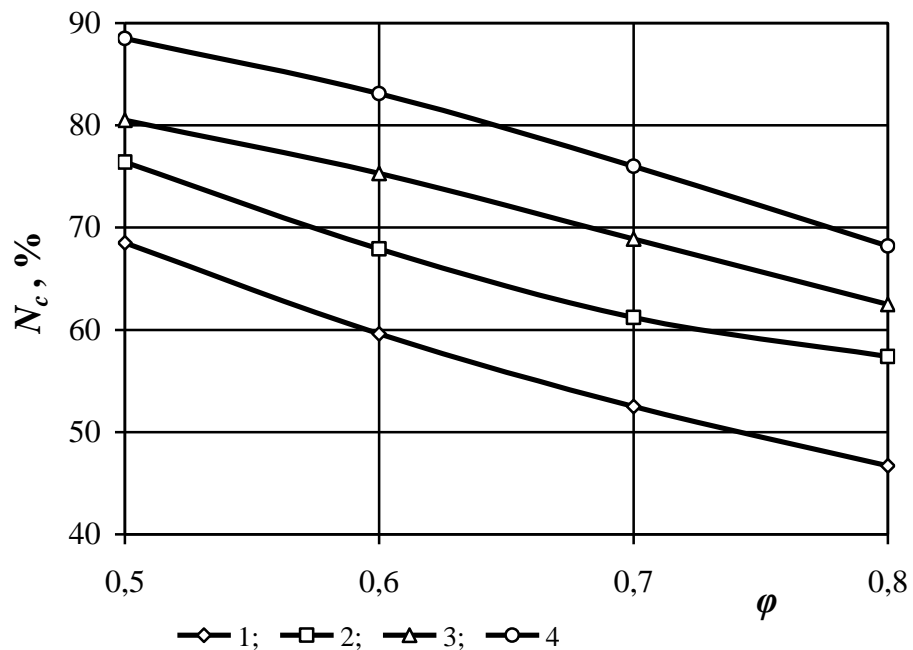


Рис. 3.7. Вплив ступеня заповнення барабана ( $\varphi$ ) на вміст карамельного зерна у готовому солоді ( $N_c$ ) за умови різної частоти обертання ( $n$ ): 1 –  $n=2,0$  об/хв; 2 –  $n=3$  об/хв; 3 –  $n=4$  об/хв; 4 –  $n=5$  об/хв.

Дослідження проводились при температурі  $165^\circ\text{C}$  та тривалості технологічного процесу 160 хв. Результати оцінки графічних залежностей (рис. 3.7) вказують на значний вплив ступені заповнення барабана на якісний склад

карамельного солоду. Так, незалежно від частоти обертання барабана, вміст карамельних часточок знижується зі зростанням ступені заповнення робочої порожнини барабана. Це можна пояснити зниженням інтенсивності обробки тепловим середовищем продукту із-за великої його кількості.

За умови однакового температурного режиму та тривалості обсмаження продукту, найвищий вміст карамельного зерна у готовому солоді спостерігається при ступені заповнення барабана на рівні  $\varphi=0,5$  та частоті обертання барабана на рівні  $n=5$  об/хв.

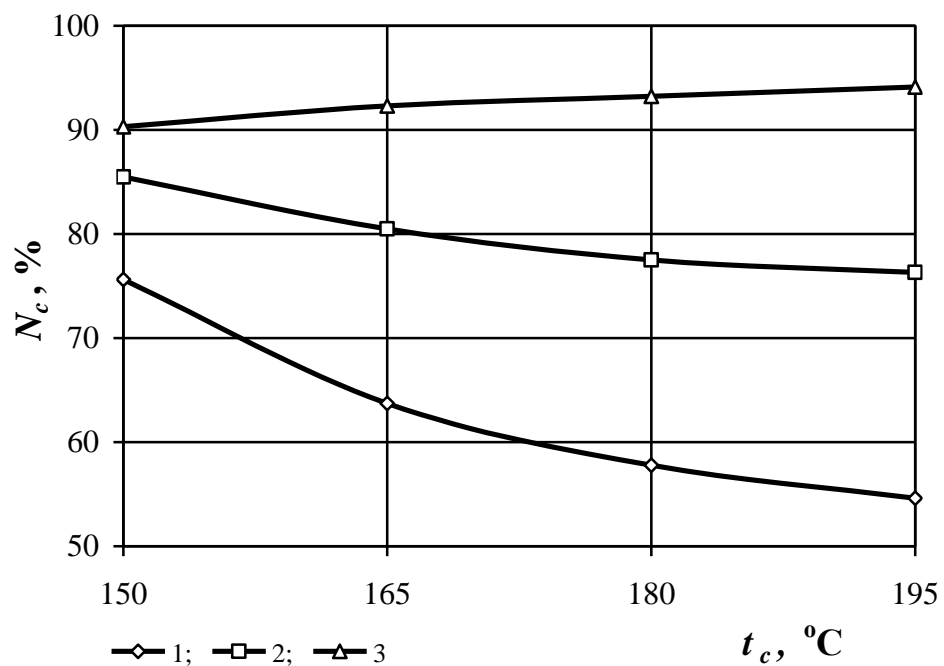


Рис. 3.8. Вплив температури обсмаження солоду ( $t_c$ ) на вміст карамельного зерна у готовому солоді ( $N_c$ ) за умови різної тривалості циклу: 1 –  $T_u=140$  хв.; 2 –  $T_u=160$  хв.; 3 –  $T_u=180$  хв.

Графічна залежність на рис. 3.8 вказує на недоцільність обрання швидкого завершення процесу обсмажування, особливо при використанні високих температур. Так, зі зростанням температури обробки продукту від 150 до 195 °C якість готового продукту знижується на 21%. Це можна пояснити недостатнім тепловим впливом при заданій частоті обертання ( $n=5$  об/хв) та

ступені завантаження барабана ( $\varphi=0,5$ ). Зі зростанням тривалості технологічного процесу зростає якість отриманого карамельного солоду. Тривалість обсмаження можна обмежити на рівні 180 хв. та температури 180°C, оскільки подальше збільшення температури обробки майже не впливає на якість продукту, а витрати енергії зростатимуть.

За результатами проведених досліджень отримали рівняння регресії з врахуванням усіх факторів впливу на отримання якісного продукту:

$$N_c = -49,9 + 8,6n - 81,14\varphi + 0,38t_c + 0,46T_u, \quad (3.7)$$

де  $t_c$  – температура обробки продукту, °C;

$T_u$  – тривалість циклу, хв.;

$n$  – частота обертання барабана, об/хв;

$\varphi$  – ступінь заповнення об'єму барабану.

Достовірність отриманого рівняння (3.7) перевірили за допомогою критерія Фішера [20], значення якого менше за табличне. Це підтверджує адекватність рівняння та значущість застосованих змінних факторів для оцінки ефективності розробленого виготовлювача карамельного солоду.

### 3.3. Висновки до розділу 3

1. В процесі аналізу технологічного процесу виробництва карамельного солоду встановлено, що до основних технологічних параметрів що впливають на енергетичну ефективність процесу належать частота обертання барабана; температура оброблення солоду; тривалість процесу та ступінь заповнення барабана.

2. Встановлено, що на енергоємність технологічного процесу суттєвий вплив чинить ступінь заповнення внутрішнього простору барабана. При цьому, частота обертання барабана не має суттєвого впливу. Доведено зниження у 4

рази енергоємності технологічного процесу при зростанні ступені заповнення барабана продуктом від 0,5 до 0,95. Пояснити це можна тим, що місткість барабана максимально заповнена продуктом обробки, відомо, що чим вищий вміст барабана виготовлювача солоду за один цикл роботи тим менша енергоємність процесу обсмажування за однакових температурних умов та тривалості процесу обсмаження.

3. Виконана оцінка впливу технологічних параметрів виготовлювача карамельного солоду на якість отриманого кінцевого продукту. Встановлено, що при найнижчій із досліджених тривалості обробки продукту ( $T_y=140$  хв.) якість готового продукту знижується на 21% зі зростанням температури обробки продукту від 150 до 195 °С. Це викликано недостатнім тепловим впливом при заданій частоті обертання та ступені завантаження барабана. При вищій тривалості технологічного процесу спостерігається зростання показника якості виготовленого карамельного солоду.



## ВИСНОВКИ

1. Виконана оцінка технологій виробництва пива вказала на необхідність оснащення невеликих броварень виготовлювачами карамельного солоду задля розширення асортименту. Серед технічних засобів виробництва карамельного солоду широке поширення набуло обладнання барабанного типу. Проте значні габарити та енергоємність технологічного процесу не дозволяє використовувати серійне обладнання для умов невеликих виробництв.

2. Запропонована конструкція виготовлювача карамельного солоду для умов невеликого виробництва, обсягом до 300 кг за один цикл. У внутрішній порожнині барабана розташований шнек, що сприяє інтенсифікації перемішування завдяки протилежному до лопатей барабана спрямування витків. Через отвори у порожнистому валу шнека до барабана подається пара під тиском 150 кПа, яка інтенсифікує процес теплообміну завдяки вищому ніж у повітря коефіцієнту тепловіддачі. Тому пришвидшується процес обсмажування, а це впливає на зниження витрат енергії.

3. Доведено, що енергоємності процесу суттєво зростання при збільшенні температури обробки продукту від 180 до 195 °С та високому ступені заповнення барабана. Встановлено, що за умови заповнення барабана на 80-95%, енергоємність виробництва карамельного солоду зростає на 27-43%, що значно більше ніж в діапазоні температур 150-180 °С – лише 7-13% зростання. Отримане рівняння регресії що описує вплив температури обсмаження солоду та ступені заповнення барабана на питомі витрати енергії.

4. Дослідженнями встановлено значний вплив ступені заповнення барабана на якісний склад карамельного солоду. При збільшенні ступені заповнення робочої порожнини барабана в досліджуваних межах знижується вміст карамельних часточок у готовому продукті. Доведено зниження інтенсивності обробки тепловим середовищем продукту із-за великої його кількості у барабані за умови однакового температурного режиму та тривалості обсмаження продукту. Найвищий вміст карамельних часток у готовому солоді

спостерігається при ступені заповнення барабана на рівні  $\varphi=0,5$  та частоті обертання барабана на рівні  $n=5$  об/хв.

5. Доведено втрату якості готового продукту (на 21%) при незначній тривалості технологічного процесу ( $T_y=140$  хв.) та високій температурі обробки солоду (180-190 °С). Це викликано недостатнім тепловим впливом при заданій частоті обертання та ступені завантаження барабана. Встановлено, що за умови тривалості обсмаження на рівні 180 хв. при температурі обробки 180°С отримують максимальний вихід карамельних часток (93 %).

6. Отримане рівняння регресії яке дозволяє врахувати вплив усіх факторів технологічного процесу на отримання карамельного солоду високої якості при мінімальних витратах енергії. Адекватність отриманого рівняння підтверджено за допомогою критерія Фішера, значення якого менше за табличне.

7. Встановлено, що раціональними конструкційно-технологічними параметрами запропонованого виготовлювача карамельного солоду є наступні: частота обертання барабана та шнека  $n=5$  об/хв; ступінь заповнення барабана  $\varphi=0,5$ ; тривалість технологічного процесу  $T_y=165-180$  хв.; температура процесу обсмажування  $t_c=175-180$  °С. За таких параметрів досягається найменша енергоємність технологічного процесу ( $E=0,0108$  кВт×год/кг) при високій якості готового продукту. Енергетична складова розробленого виготовлювача карамельного солоду: потужність на привод барабана – 0,5 кВт; потужність генератора пари – 2 кВт; потужність електричних нагрівачів – 12 кВт.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Домарецький В. А. Технологія солоду та пива : підручник. К.: Інкос, 2004. 426 с.
2. Технологія виробництва пива. Технологічна схема виробництва ячмінного солоду. URL : <https://foodtechnology.pro/tehnologiya-vyrobnytstva-pyva>
3. Пивоваріння – мистецтво і наука. URL : <https://apk.hlr.ua/articles/5-predlozhenij-i-sovetov-ot-hlr-dlya-kraftovoj-pivovarni>
4. BVM-050: пивоварні BREWMASTER 50L. URL : <https://eshop.czechminibreweries.com/uk/product-category/bbs/bsb/bbm-050/>
5. BVM-200: пивоварні BREWMASTER 200L. URL : <https://eshop.czechminibreweries.com/uk/product-category/bbs/bsb/bbm-200/>
6. Wolfgang Kunze. Technologie Brauer und Mälzer. Versuchs Lehranstalt Brauerei, 2016. 900 p.
7. Куц А. М., Кошова В. М. Технологія бродильних виробництв : конспект лекцій. К.: НУХТ, 2011. 156 с.
8. Климчук В. А.. Аналіз обладнання для виробництва карамельного солоду. *Студентські читання–2021* : матеріали науково-практичної конференції. 15 листопада 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 189–191.
9. Обсмажувальна піч для ячменю, жита, солоду. URL : <https://tehnolog.com.ua/uk/catalog/barley>.
10. Марценюк О. С., Мельнік Л. М. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. К. : НУХТ, 2011. 407 с.
11. Медведський О. В., Климчук В. А. Удосконалення конструкції виготовлювача карамельного солоду. *Студентські читання–2022* : матеріали науково-практичної конференції. 30 листопада 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 5–7.
12. Лабай В. Й. Тепломасообмін. Львів: Тріада Плюс, 2004. 260 с.

13. Теплотехніка : підручник / Б. Х. Драганов, О. С. Бессараб, А. А. Долінський та ін.; за ред. Б.Х. Драганова. К.: ІНК ОС, 2005. 504 с.
14. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка. К., 2001. 320 с.
15. Гнатишин Я. М., Кришталович В. І. Теплотехніка: навч. посіб. К.: Знання, 2008. 364 с.
16. Бурдо О. Г., Калинин Л. Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах : ученик. Одесса: Друк, 2008. 348 с.
17. Вища математика із застосуванням інформаційних технологій : підручник / В. П. Іващенко, Г. Г. Швачич, В. С. Коноваленков, Т. М. Заборова, В. І. Христян. Дніпро, 2013. 425 с.
18. Процеси та апарати харчових виробництв : підручник / А. М. Поперечний О. І. Черевко, В. Б. Гаркуша та ін. К. : Центр учбової літератури, 2007. 304 с.
19. Медведський О. В., Климчук В. А. Визначення показників енергетичної ефективності виготовлювача карамельного солоду. *Біоенергетичні системи* : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 21–23.
20. Аністратенко В. О., Федоров В. Г. Математичне планування експериментів в АПК : навч. посібник. К. : Вища шк., 1993. 375 с