

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**ЛЕВТРИНСЬКА Юлія Олегівна**



**УДК 663.93.061.35.086.2**

**ЕКСТРАГУВАННЯ КАВИ У МІКРОХВИЛЬОВОМУ  
АПАРАТІ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та  
фармацевтичних виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

Одеса 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій  
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук  
**Терзієв Сергій Георгійович**  
Одеська національна академія харчових технологій,  
кафедра процесів, обладнання та енергетичного  
менеджменту, доцент кафедри.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор  
**Дячок Василь Володимирович**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
кафедра прикладної екології та збалансованого  
природокористування, професор кафедри;


– кандидат технічних наук,  
**Гоженко Любов Петрівна**  
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук  
України, науковий співробітник.

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 в Одеській національній академії харчових технологій, за адресою: ауд. А-234, вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039.

Автореферат розісланий «\_\_\_» листопада 2017 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к.т.н., доцент

 Т.І. Нікітчина

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Протягом останнього десятиліття на ринку кави спостерігається зростання рівня споживання. За період з 2000 по 2010 рік середньорічний темп приросту споживання на українському ринку склав 23 %, що майже в 10 разів вище світового показника (2,5 %), в результаті чого Україна знаходилась у списку рекордсменів за темпами зростання споживання кави. За перше півріччя 2016 року обсяг Українського ринку кавопродуктів зріс на 8,9 %.

Кава для України – імпортований продукт, який необхідно використовувати максимально ефективно. З огляду на це, необхідні технології, які дозволять отримати більше компонентів з тієї ж кількості сировини. Виробництво розчинної кави характеризує значна енергоємність обладнання і тривалість технологічного процесу (7 ... 8 год.), втрата цінних летких смакових і ароматичних речовин, які обумовлюють якість кінцевого продукту, на стадіях подрібнення, зберігання, екстрагування і сушіння в процесі виробництва, низький вихід цільового компонента (20 ... 33 % від маси сирих зерен), і високу ціну за товар через неефективне виробництво. Тому проблема пошуку інноваційних технологій кавового виробництва є актуальною.

На кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту (ПО та ЕМ) видано статті та монографії за тематикою екстрагування з кавового шламу, кави, проводиться науково-дослідна робота у даному напрямку, створена матеріально-технічна база стендового і лабораторного обладнання, написано використанням мікрохвильових технологій. В ОНАХТ набули розвитку хвильові технології обробки харчової сировини, ефективність яких доводиться у роботах проф. Калініна Л.Г., проф. Бурдо О.Г., Терзієва В.Г. (коньякове виробництво), Осадчука П.І. і Капетули С.М. (виробництво олій), Ряшко Г.М. (виробництво кави), Ружицької Н.В. та Макиївської Т.Л. (екстрагування кавового шламу). Захищено докторську дисертацію Терзієвим С.Г. (сушіння, екстрагування з кавового шламу). Є досвід госпдогвірної співпраці з підприємствами.

Незважаючи на успішні дослідження в галузі використання мікрохвильового (МХ) поля для виробництва продуктів, поки не створені апарати для промислового використання, не до кінця відпрацьовані режими роботи апаратів. Недостатньо вивчені процеси у МХ екстракторах безперервної дії, відсутній математичний опис для таких процесів при екстрагуванні кави.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження, що подаються, виконувалися у межах госпдогвірної тематики (21/14 – «Модернізація технологічних систем сушильного обладнання та виробництва харчоконцентратів»). Результати роботи можуть бути впроваджені у такі навчальні курси: "Технологічне процеси та обладнання харчових виробництв", "Основи енергетичного менеджменту", "Інноваційні енерготехнології", "Процеси та апарати".

**Мета і завдання дослідження.** Розробити ресурсо- та енергоефективний апарат безперервної дії для екстрагування зі зерен кави в умовах дії мікрохвильового поля, визначити доцільні режими експлуатації таких екстракторів та створити аналітичний комплекс для математичного моделювання та оптимізації таких апаратів.

Відповідно до поставленої мети визначено основні завдання досліджень:

- провести математичне моделювання процесів екстрагування в МХ полі (розвиток математичної моделі д.т.н., проф. О.Г. Бурдо);
- розробити методики та стенди для експериментального моделювання гідравлічних та масообмінних процесів;
- виконати експериментальне моделювання гідравлічних процесів у масообмінних модулях екстрактора;
- виконати експериментальне моделювання процесів екстрагування у МХ полі;
- провести узагальнення експериментальних даних;
- розробити інженерні методики розрахунку процесів у МХ апараті безперервної дії та програми розрахунку;
- провести обчислювальний експеримент;
- випробувати експериментальний зразок МХ апарату безперервної дії в умовах виробництва;
- провести дегустацію зразків та надати їхню комерційну оцінку.

*Об'єкти досліджень* – механізм, кінетика й апарати для екстрагування в умовах дії МХ поля.

*Предмет дослідження* – подрібнені зерна кави різного дисперсного складу, процеси екстрагування з кавової сировини в умовах МХ поля.

*Методи досліджень* – теорія подібності, експериментальні дослідження з використанням контрольно-виміральної апаратури, методи енергетичного аудиту й менеджменту. Математичне моделювання з використанням комп'ютерної техніки і прикладних програмних пакетів (Microsoft Excel, об'єктно-орієнтована мова програмування Delphi).

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі сформульовані й доведені такі наукові положення.

1. Реалізація послідовних стадій: промивка виснажених кавових зерен вихідним екстрагентом, вичерпання цільових компонентів з капілярних структур зерен і зміцнення екстракту дозволить створити ефективний МХ апарат безперервної дії.

2. Використання на стадії зміцнення екстракту та вичерпання цільових компонентів МХ енергії дозволить ініціювати потужний бародифузійний потік цільових компонентів з об'єму зерен, що дасть можливість при температурах процесу до 100 °С забезпечити практично повне вилучення цільових компонентів, знизити енергоємність апарату, підвищити його продуктивність, забезпечити безперервність технології екстрагування і підвищити якість готового продукту.

У результаті комплексу аналітичних, експериментальних і виробничих досліджень вперше:

- визначено гідравлічні характеристики та режими течії в масообмінних модулях екстрактору при зміні гідромодуля і витрати екстрагенту, дисперсності (еквівалентного діаметру часток), товщини шару подрібнених зерен кави;

- отримано співвідношення в безрозмірних числах подібності для розрахунку гідродинамічних режимів у МХ апараті безперервної дії;

- визначено залежності впливу потужності МХ поля і температури, гідродинамічних умов у екстракторі, дисперсності, на характер зміни концентрацій розчину

й значення коефіцієнтів масовіддачі для безперервних режимів екстрагування з подрібнених зерен кави;

- обґрунтовано тризонну модель розподілу температур та концентрацій у МХ апараті безперервної дії та отримано співвідношення в безрозмірних числах подібності для розрахунку інтенсивності масопереносу у МХ апараті безперервної дії при виробництві розчинної кави з подрібнених зерен кави;

- експериментально підтверджено можливість отримання рідкого концентрату екстракту кави з вмістом сухих речовин понад 50 % на виході МХ апарату безперервної дії.

- визначено резерви вилучення цільових компонентів з подрібнених зерен кави при екстрагуванні у вакуумному МХ екстракторі;

- визначено резерви підвищення концентрації екстракту кави методом блокового виморожування .

У роботі розширено уявлення:

- методом «аналізу розмірностей» отримано структури рівнянь в узагальнених змінних для розрахунку гідравлічних процесів у модулях екстрактора та комбінованих процесів екстрагування з капілярно-пористого тіла кавової сировини в умовах об'ємного МХ підведення енергії в безперервних режимах системи «зерна кави – вода»;

- методами експериментального моделювання отримані термограми за висотою у МХ апараті безперервної дії при повному завантаженні;

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Досліджений спосіб одержання кавових екстрактів під впливом МХ поля в умовах протитечійного руху екстрагенту та твердої фази істотно інтенсифікує внутрішні процеси масообміну, дозволяє скоротити втрати смакоароматичних речовин в екстракті, поліпшити якість готового продукту, знизити втрати цільових компонентів з відходами, знизити кількість витрат енергії, вести процес екстрагування при робочих температурах до 100 °С та атмосферному тиску. Дослідно-промисловий зразок МХ апарату безперервної дії безперервної дії забезпечує інтенсифікацію процесу й дозволяє збільшити вихід готової продукції за рахунок додаткового вилучення водорозчинних речовин з капілярно-пористої структури кавових зерен. Отримані на виході екстракти характеризуються підвищеним вмістом сухих речовин (50 ... 60 %) та можуть використовуватися, як аналогічний розчинній каві продукт, що дозволить виключити енерговитрати на етап сушіння екстракту.

Комп'ютерна програма розрахунку МХ апарату безперервної дії, заснована на результатах експериментального моделювання кінетики взаємодії подрібнених кавових зерен і води, може бути застосована для проектування подібних систем у широкому діапазоні зміни параметрів. Програми «EXTRACTOR.1» та «EXTRACTOR.2» впроваджено на ПАО «Енні Фудз», м. Одеса та ГАЛКА Лтд, м. Львів. Розроблений спосіб одержання рідкого концентрату кави в умовах дії МХ поля дозволяє одержувати концентрований екстракт кави при зниженні витрат цільових компонентів і зменшенні питомих витрат енергії в процесі екстрагування та за рахунок виключення етапу сушіння. Якість продукту підтверджують акти дегустації.

**Особистий внесок здобувача.** Разом із науковим керівником (д.т.н., доц. С.Г. Терзієв) сформулював наукові положення та концепції наукових досліджень. Автор планував експеримент, здійснював аналіз експериментальних даних, інтерпретував і узагальнював отримані результати. Самостійно узагальнив результати цих робіт. Сформулював основні положення та висновки. Спільно з науковим керівником, проведено обговорення результатів досліджень та математичний опис процесів. У наукових працях здобувачеві належать планування дослідної роботи, організація експерименту та його реалізація, обробка результатів досліджень. Брав участь у проектуванні нових зразків техніки (МХ вакуумний екстрактор), одержанні інноваційних неенергоємних кавопродуктів. Займався впровадженням інноваційних зразків техніки та продуктів у харчоконцентратній галузі України.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу і науковців Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) в 2014 ... 2017 роки; на Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» (Одеса, 2014 і 2016 р.), на Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2015 і 2017 р.); на регіональних науково-практичних конференціях «Енергія. Бізнес. Комфорт» (Одеса, 2014, 2015, 2016 р.) на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених і студентів міжнародною участю «Проблеми формування здорового способу життя у молоді» (Одеса, 2014, 2015, 2016 р.); на міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (Київ, 2016 р.); на всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні аспекти розвитку техніки енергетики та транспорту в АПК» (Вінниця, 2017 р.), на Міжнародній науково-практичній конференції «Хімічна технологія та інженерія» (Львів, 2017 р.). Інноваційні розробки також було представлено на Х Ювілейній міжнародній виставці «Аналітика. Лабораторія. Біотехнології. НІ-ТЕСН» (Київ, 2017).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковані у 27 друкованих працях (4 - самостійно), включаючи 6 робіт у фахових виданнях МОН України, 5 статей у журналах, включених до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття у журналі індексованому базою даних *Scopus*, 3 статті у міжнародних виданнях, 2 статті у науково-практичних виданнях, тези 16 доповідей на наукових конференціях, з них 6 – на міжнародних.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків.

Дисертаційна робота викладена на 142 сторінках основного тексту, містить 58 рисунків (29 сторінок), 21 таблицю (17 сторінок), п'яти додатків (32 сторінки). Список використаних літературних джерел містить 181 найменування (14 сторінок) вітчизняних і закордонних авторів.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета, завдання досліджень,

наукова новизна, наукові положення, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів роботи та публікації за матеріалами дисертації.

У першому розділі «Сучасний стан виробництва розчинної кави ті шляхи інтенсифікації процесу екстрагування в процесах виробництва кавопродуктів» наведена загальна характеристика технології виробництва розчинної кави й проблеми цих технологій, тенденції ринку кави, специфіка сировини й готового продукту, ефективність використання сировинних та енергетичних ресурсів. Проаналізовано устаткування для екстрагування. Розглянуто сучасні апарати для екстрагування та методи інтенсифікації процесу екстрагування. Подано аналіз наукових основ масопереносу при екстрагуванні з пористих матеріалів, які ґрунтуються на фундаментальних роботах Аксельруда Г.А., Белобородова В.В., Гончаренко Г.К., Гребенюка С.М., Ключкіна В.В., Лисянського В.М., Понамарєва В.Д., Рудобашти С.П. та інших. Розглянуто досягнення з проблем екстрагування у відомих наукових школах України: «Львівської політехніки» (Гумницький Я.М., Семенішин Є.М., Дячок В.В.), Інституту технічної теплофізики НАН України (Іваницький Г.К., Гоженко Л.П.), Національного університету харчових технологій (Малежик І.Ф., Зав'ялов В.Л., Запорожець Ю.В.), Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя (Вітенько Т.М.), Львівської академії ветеринарної медицини (Білонога Ю.Л.). Показано перспективи інтенсифікації процесу екстрагування на основі МХ технологій. Проаналізовано розвиток техніки для МХ екстрагування у світі. Поставлено завдання переведення виробництва розчинної кави на еко-індустріальні принципи. Сформовано програму досліджень (рис. 1).



Рис.1. Програма досліджень.

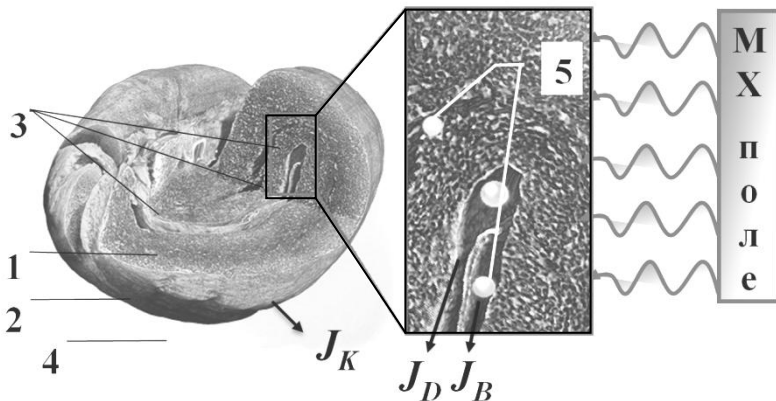
У другому розділі «Методи моделювання процесів масопереносу в системі «сировина-екстрагент» за умов підведення мікрохвильової енергії» наведено струк-

турні моделі виробництва розчинної кави.

Методи математичного моделювання передбачали детерміновані підходи. Використовувалися теорія подібності та метод «аналізу розмірностей».

Надано методику визначення гідродинамічної ситуації у масообмінних модулях МХ апарату безперервної дії.

У основу досліджень покладено математичну модель МХ екстрагування сформульовану С.Г. Терзієвим. В умовах впливу МХ поля розподіл концентрацій на межі «тверде тіло - розчинник» виглядає наступним чином (рис.2).



Масовий потік  $J_D$  лімітується дифузійним опором твердої фази, загальний масовий потік  $J_K$  долає послідовно опору масопереносу в умовах обмеженого простору капіляра та конвективної дифузії, при цьому масовий потік  $J_B$ , що виникає внаслідок бародифузії, повинен подолати дифузійний опір на порядок нижче того, який долає масовий потік  $J_K$ . В умовах бародифузійного потоку виникають труднощі поділу

Рис. 2. Фізична схема масових потоків: 1 – внутрішня область зернівки; 2 – зовнішня область зернівки; 3 – капіляри зернівки; 4 – екстрагент; 5 – парові бульбашки.

потоків  $J_D$ ,  $J_K$  и  $J_B$ , оскільки явище бародифузії вносить збурення в усі зазначені складові процесу масопереносу цільового компонента в системі «кавова сировина - екстрагент».

Тому загальний потік маси можна записати як:

$$J_M = \beta_E (C_{mek} - C_P), \quad (1)$$

де  $\beta_E$  – ефективний коефіцієнт масовіддачі, що враховує внутрішньо, зовнішньо- та бародифузійні процеси.

Наведено методики експериментального моделювання масопереносу в системі «вода - кавова сировина» за умов дії МХ поля: визначення концентрації екстрактивних речовин у розчині та граничні концентрації у твердій фазі, наведено результати тарування вимірювальної апаратури, зроблено оцінки погрешностей вимірів. Показано методику визначення коефіцієнту масовіддачі. Розглянуто методику узагальнення результатів експериментів.

У третьому розділі «Експериментальні дослідження, результати експериментів та їхнє узагальнення» наведено результати досліджень гідравлічних процесів у модулях МХ апарату безперервної дії, визначення граничних концентрацій у твердій фазі, кінетики екстрагування за умов зміни режимних параметрів. Визначено основні фактори, що впливають на процес екстрагування – температура ( $T$ , °C) та потужність ( $N$ , Вт) МХ випромінювання, гідромодуля ( $\zeta$ ), об'ємної витрати екстрагенту ( $V_p$ , кг/с), еквівалентного розміру часток ( $d_e$ , мм), товщини шару продукту ( $\sigma$ , мм) (табл.1).



Діапазон експериментальних досліджень гідравлічних процесів

Параметри	$\Delta P$ , Па	$V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /с	$\delta \cdot 10^3$ , м	d, мм	$\tau$ , с
min	80	1,2	8	0,63	60
max	310	5,3	27	7	720

Досліди проводились на експериментальному стенді, що складався зі штатива, на якому у горизонтальному положенні зафіксовано модуль, наповнений продуктом. Напірну ємність з гнучким трубопроводом, що поєднує ємність з модулем встановлено на постійній висоті на протязі всього досліду. Екстрагент, що пройшов через модуль збирався до мірного циліндру.

Витрата екстрагенту визначалася ваговим способом, що забезпечує задовільну точність результатів, та змінювалася за допомогою зміни положення регулюючого клапану. Час заповнення мірного циліндру визначався за допомогою секундоміру. Витрата екстрагенту впливала на рівень продукту у модулі, який визначався методом занурення штанген-циркуля, безпосередньо, під час експерименту.

Досліди проведено з використанням кавових зерен різної тонини помелу та цілих зерен. Розділення кави на фракції проведено за допомогою набору лабораторних сит. Масообмінний модуль заповнювався продуктом на 10 мм. При зміні витрати екстрагенту рівень продукту у модулі, відповідно, змінювався. Для кави різної тонини помелу властиві різні режими протікання екстрагенту (рис.3).

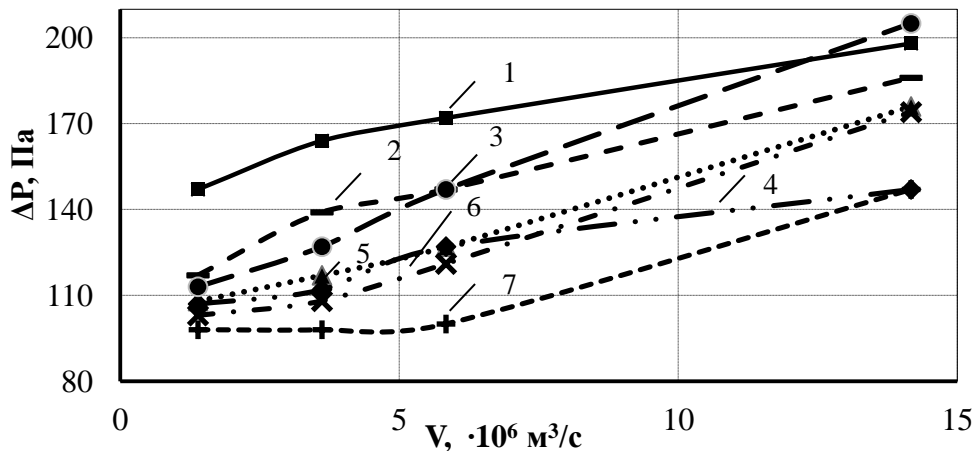


Рис. 3. Гідродинамічна ситуація у модулі в залежності від зміни швидкості руху екстрагенту та розміру часток: 1 – менше 0,8 мм; 2 – 1...2 мм; 3 – 1/2 кавового зерна; 4 – 2...2,5 мм; 5 – 1/4 кавового зерна; 6 – 2,5...3 мм; 7 – ціле кавове зерно.

Експериментально визначено пористість шару сировини в залежності від зміни еквівалентного діаметру часок продукту (табл.2) .

Таблиця 2

Зміна пористості в залежності від розмірів часток подрібнених зерен кави

d, мм	> 0,8	1...2	2...2,5	2,5...3
$\epsilon$	0,441	0,458	0,475	0,491

За методиками, викладеними в розділі 2 проведено розрахунки. Визначено числа Рейнольдса та Ейлера, еквівалентний безрозмірний діаметр часток  $D$ . Конкретизовано математичну модель гідравлічних досліджень:

$$Eu = 6836 \cdot Re^{-1,06} D^{1,2} \quad (2)$$

Рівняння (2) може використовуватись для оцінки гідродинамічної ситуації у масообмінних модулях та для проектування МХ екстракторів.

Для адекватної оцінки результатів експерименту проведено тарування системи енергопідведення за умов руху екстрагенту крізь один модуль та блок масообмінних модулів.

Визначено значення теплового потоку  $Q$  при кожному з режимів роботи МХ камери та при зміні витрати екстрагенту. Найбільший коефіцієнт корисної дії  $\eta$  використання енергії магнетрону спостерігається при меншій витраті екстрагенту та номінальній потужності магнетрону.

Основна частина дослідів була спрямована на вивчення кінетики екстрагування з кави. Дисперсність часток розмеленої кави змінювалась у діапазоні  $0,63 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-3}$  м. Експериментальні дослідження процесу масопереносу в системі «сировина - екстрагент» за умов МХ підведення енергії проводилися в діапазоні параметрів, які наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

#### Діапазон експериментальних досліджень

Маса кави в 1 модулі $G_k$ , кг	Товщина шару $\delta \cdot 10^3$ , м	Витрата екстрагенту $V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /с	Температура $t$ , °С	Питома мікрохвильова потужність $N$ , Вт/кг
0,02...0,35	4...27	1...4	20...90	270...900

З залежностей (рис.4) помітно динаміку вичерпання водорозчинних екстрактивних сухих речовин зі зерен.

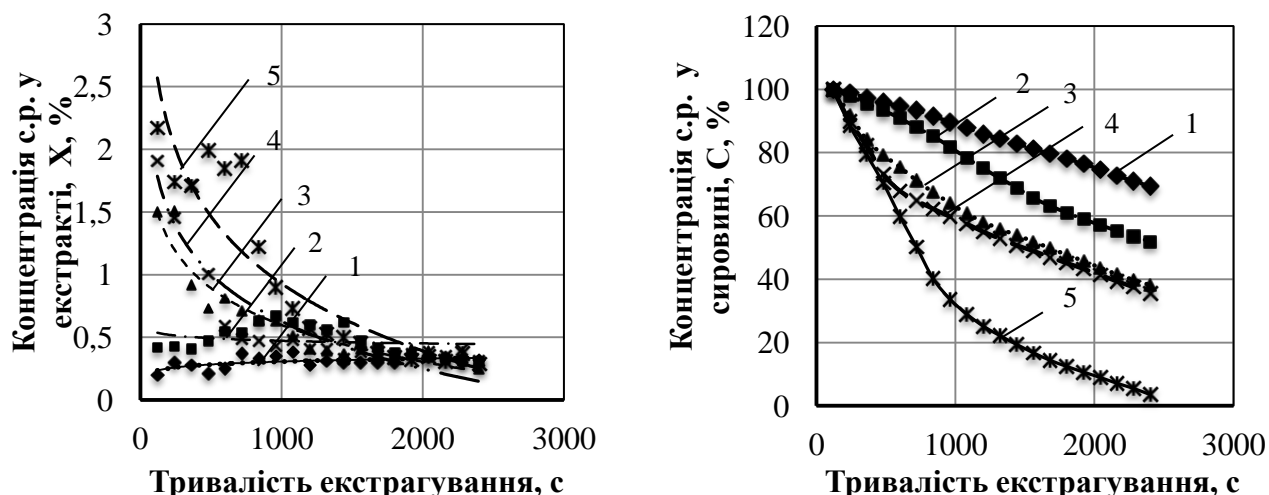


Рис. 4. Вичерпання сухих водорозчинних речовин (с.р.) у екстракті та у сировині в залежності від інтенсивності дії МХ поля: 1 – 90 Вт; 2 – 270 Вт; 3 – 450 Вт; 4 – 630 Вт; 5 – 900 – Вт.

Дослідження показали (рис.4), що підвищення питомої потужності МХ енергії з 90 до 900 Вт може підвищити вихід екстрактивних речовин з кавових зерен більш ніж у два рази і суттєво зменшити тривалість процесу екстрагування, а, отже, зменшити енергоємність процесу виробництва екстрактів кави.

З метою дослідження повноти вичерпання сухих речовин з кави при різних витратах екстрагенту проведено дослідження за питомої потужності 270 Вт ( $m=50$  г,  $\delta=1\dots 2$  мм). Результати експерименту наведено на рис. 5.

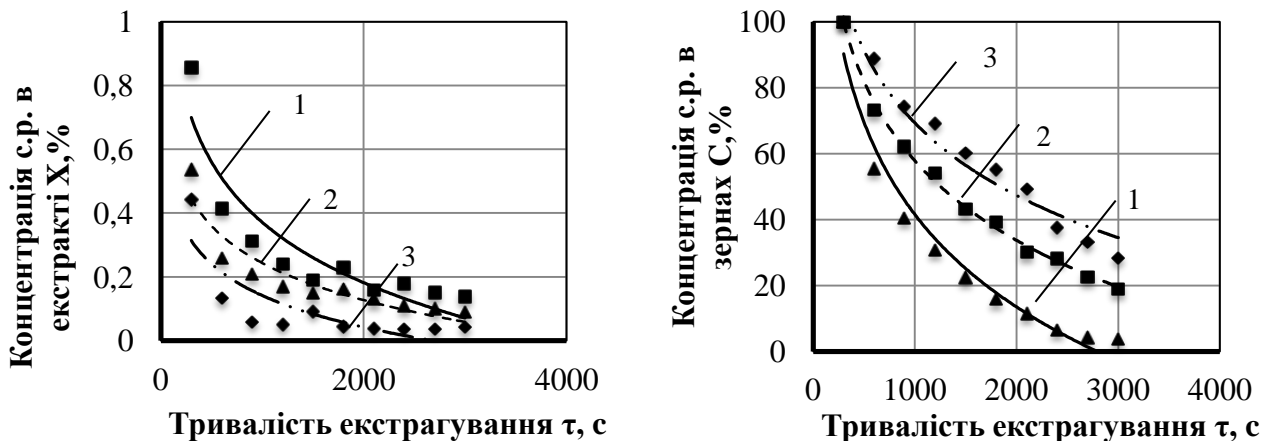


Рис. 5. Вичерпання сухих речовин з меленої кави при різних витратах екстрагенту: 1 –  $1,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с; 2 –  $4,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с; 3 –  $7,7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с.

З отриманих залежностей видно, що зі збільшенням витрат екстрагенту ми отримуємо екстракт з нижчою концентрацією сухих речовин.

На кінцеву концентрацію екстракту також суттєво впливає гідромодуль. Для оцінки його впливу проведено дослідження при використанні меленої кави ( $\delta=1\dots 2$  мм) на лабораторному стенді, який складався з МХ камери з блоком регулювання потужності та радіопроникної ємності зі зворотнім холодильником, завдяки якому зберігався постійний об'єм екстрагенту (200 мл), питома потужність – 270 Вт (рис. 5).

Використано масу меленої кави у 2, 10 і 50 г для гідромодулів 1:100, 1:20 та 1:4 відповідно. Аналіз результатів показав, що повнота вилучення сухих речовин з кави становила 20 %, 15 % і 12 %, що вказує на більш якісне вилучення водорозчинних речовин при використанні більшого гідромодуля. Проте, при великому гідромодулі концентрація сухих речовин у екстракті нижча.

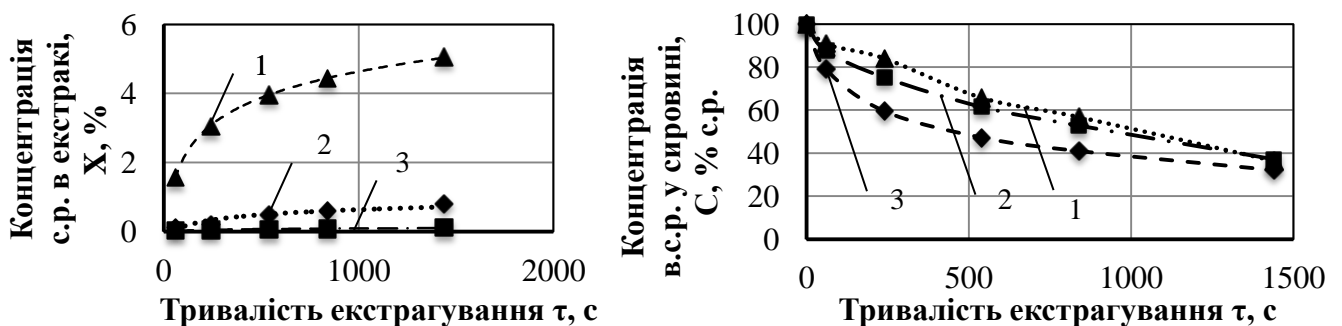


Рис. 6. Екстрагування з використанням різного гідромодуля: 1 – 1:4; 2 – 1:20; 3 – 1:100.

При проведенні екстрагування в умовах безперервного руху екстрагенту складно оцінити значення гідромодуля, більш доцільно оцінювати вплив завантаження масообмінного модуля.

Проведено серію дослідів з різною товщиною шару продукту у масообмінно-

му модулі МХ апарату безперервної дії (рис. 7). При тонкому шарі площа контакту фаз більша та більший об'єм екстрагенту контактує з продуктом, при більшому шарі продукту рух екстрагенту ускладнюється, що впливає на ефективність використання сировини.

Для дослідів використано мелену каву з розміром часточок 0,63...1 мм. Вага продукту у касетах становила 100, 75, 50 та 20 г. Екстрагування проводилося при витраті екстрагенту 6,4 кг/год ( $1,66 \cdot 10^{-3}$  кг/с) та потужності МХ випромінювання 490 Вт/год (50 %). Температура екстракту на вході 12...14 °С. Вилучено 30,3 г (30,3 % с.р.), 23,4 г (31,2 % с.р.), 16,32 г (32,6 % с.р.) та 8,96 (35,8 % с.р.).

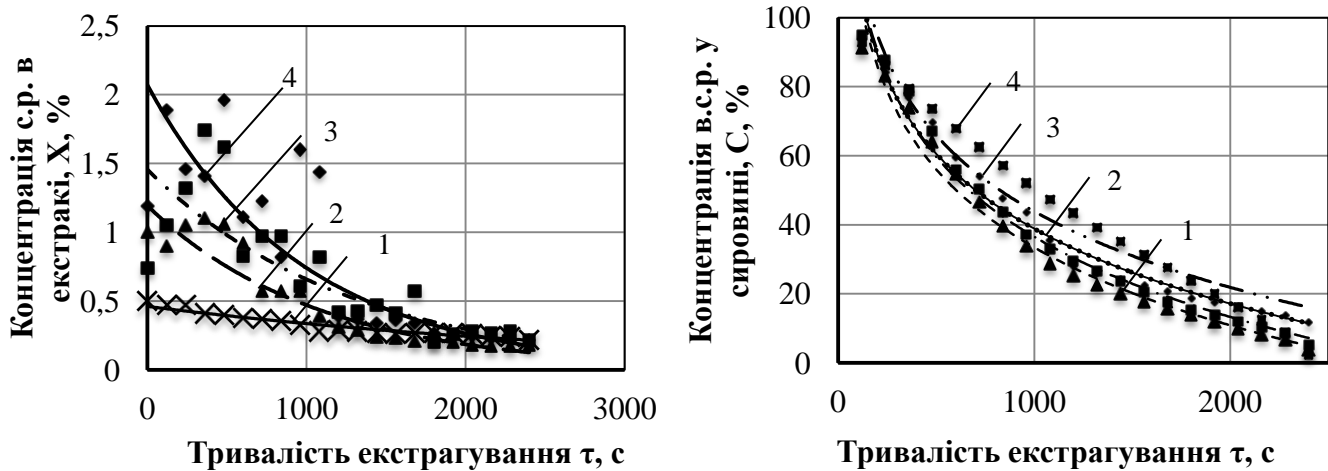


Рис. 7. Вплив товщини шару продукту на вміст сухих речовин в екстракті та зернах кави: 1 – 4 мм; 2 – 7 мм; 3 – 10 мм; 4 – 20 мм.

При виборі товщини шару продукту в модулі необхідно враховувати те, що завеликий шар продукту може перешкоджати руху екстрагенту, а замалий – зумовлювати низьку концентрацію сухих речовин у готовому екстракті, у результаті чого будуть виникати проблеми подальшої обробки екстракту та неефективного використання енергії.

Розмір часток, або дисперсність сировини – фактор, від якого залежить питома площа поверхні, що контактує з екстрагентом, відповідно, він впливає на швидкість переходу розчинних компонентів до екстракту.

Експеримент проводився з використанням 50 г меленої кави сорту Арабіка різного помелу. За допомогою набору лабораторних сит подрібнені зерна кави були розділені за дисперсністю: 2,5...2 мм; 2...1 мм; 1...0,8 мм; 0,8...0,63 мм. Частки меншого розміру не використовувалися через особливості будови масообмінних модулів екстрактора. Кінетика процесу показана на рис. 8.

Зі зменшенням розміру часток меленої кави підвищується вихід екстрактивних речовин з сировини до екстракту, це пояснюється збільшенням площі контакту фаз у системі тверде тіло-екстрагент, більшою відкритістю капілярів, у яких містяться екстрактивні речовини. Для крупних часточок дроблених кавових зерен характерний повільний перехід екстрактивних речовин до екстракту.

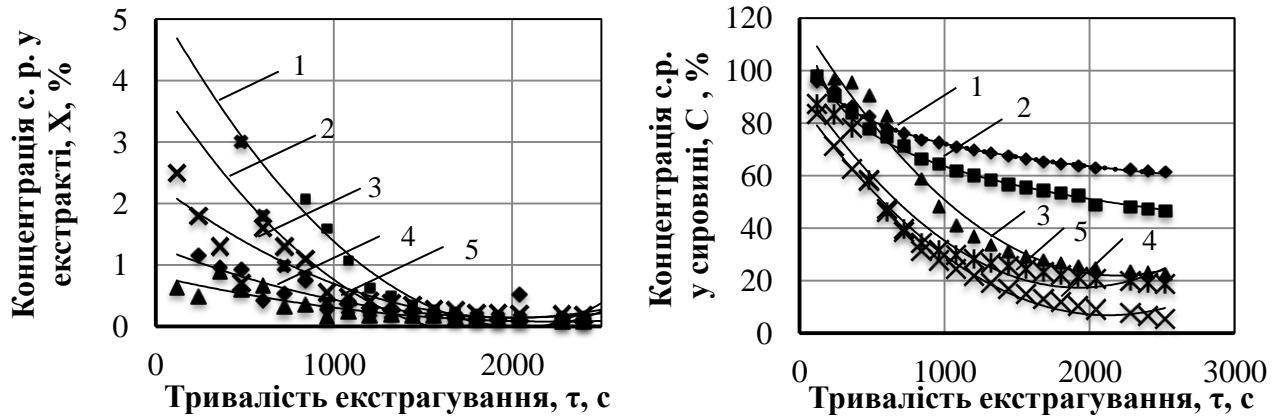


Рис. 8. Вплив дисперсності на вміст сухих речовин в екстракті та зернах кави: 1 – 0,63 ... 0,8 мм; 2 – 0,8 ... 1 мм; 3 – 1 ... 2 мм; 4 – 2 ... 2,5 мм; 5 – 2,5 ... 3 мм.

Отримані дані експериментальних залежностей оброблено за допомогою програмного пакету *Microsoft Excel* з метою оцінки ефективності процесу, визначення значень відповідних коефіцієнтів масовіддачі. Приклад розрахунку коефіцієнту  $\beta$  для умов проведених дослідів представлений в табл.4. та 5. Аналогічні розрахунки були проведені для всіх серій дослідів при інших умовах.

Таблиця 4

#### Розрахунок параметрів потоку під впливом мікрохвильового поля

$C_3, \%$	$X_{тек}, \%$	$J \cdot 10^4, \%/с$	$\Delta \tau, с$	$\delta \cdot 10^3, м$	$Re$
при $N=450$ Вт/кг					
91,13	1,19	73,91	120	4	36,35
92,87	0,74	59,44	120	7	26,82
93,93	1	50,57	120	10	21,22
94,96	0,5	41,93	120	20	19,50

У розрахунках використовувалися такі дані: висота каналу –  $8 \cdot 10^{-3} \dots 27 \cdot 10^{-3}$  м, ширина каналу  $13,5 \cdot 10^{-2}$  м.

Таблиця 5

#### Розрахунок параметрів масовіддачі під впливом мікрохвильового поля

$\Delta C, \%$	$w \cdot 10^4, м/с$	$Vp \cdot 10^6, м^3/с$	$C_3, \%$	$\beta \cdot 10^8, м/с$
при $N=450$ Вт/кг				
8,87	13,2	1,17	91,13	5,23
7,13	9,91	0,72	92,87	4,23
6,07	7,54	0,98	93,93	2,41
5,04	5,86	0,49	94,96	2,04

Після обробки результатів отримано значення коефіцієнту масовіддачі (рис. 9) в залежності від швидкості руху екстрагента всередині екстрактора.

При збільшенні товщини шару меленої кави у масообмінному модулі в 1,75... 4 рази коефіцієнт масовіддачі збільшується в 1,2 ... 2,5 разів, відповідно.

Обробка масиву експериментальних даних дозволяє рекомендувати для розрахунку інтенсивності масопереносу під час екстрагування з мелених зерен кави в умовах дії МХ поля наступне співвідношення:

$$St_m = 0,0027 (Re)^{-0,86} (Sc)^{0,43} (\Pi)^{0,35} (Bu)^{0,42} (D)^{1,2} \quad (3)$$

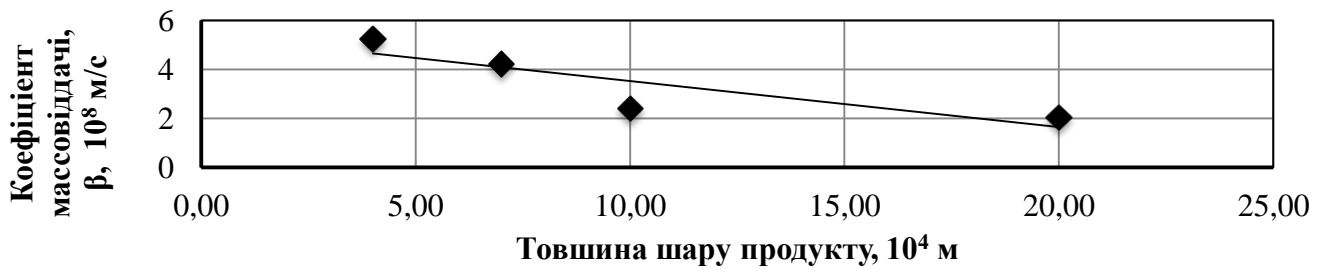


Рис. 9. Залежність коефіцієнту масовіддачі від товщини шару продукту.

Далі наводиться графік залежності експериментальних  $St_{\text{мехр}}$  від розрахункових  $St_{\text{mtheor}}$  даних для безперервного режиму обробки (рис. 10).

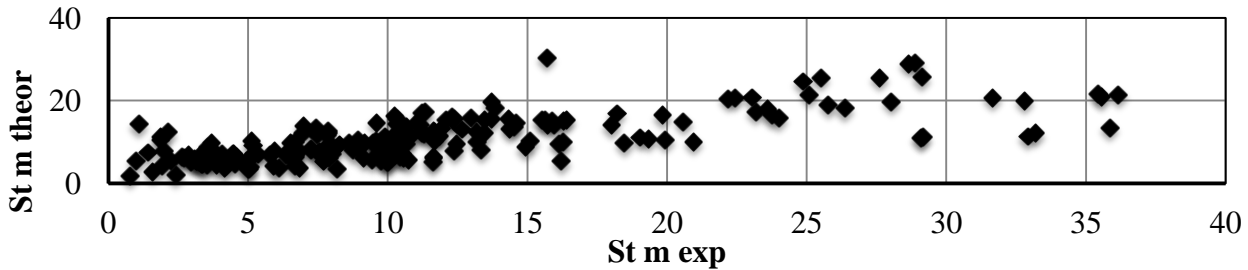


Рис. 10. Співвідношення розрахункових і експериментальних даних.

Максимальна відносна помилка розрахунку за співвідношенням (3) складає 38,98 % і спостерігається при великих значеннях числа Стантона.

**У четвертому розділі** «Інженерні методики розрахунку та оптимізація мікрохвильового протитечійного екстрактора» сформовано загальну структуру розрахунку МХ апарату безперервної дії, інженерні методики розрахунку теплофізичних властивостей розчину, гідродинамічних розрахунків апарату, алгоритми розрахунку матеріальних та енергетичних балансів, розрахунку кінетики масопереносу, інженерні методики розрахунку концентраційних полів, розрахунку МХ апарату безперервної дії.

У цьому ж розділі подано результати комп'ютерного моделювання. У основу комп'ютерного експерименту покладено рівняння інтенсивності масопереносу з кавової сировини за умов дії МХ поля та запропонована інженерна методика розрахунку МХ апарату безперервної дії.

Проведення комп'ютерного експерименту дає можливість виробити технологічні рекомендації, щодо ведення процесу екстрагування за умов дії МХ поля. Основні інструменти для проведення експерименту – комп'ютерна техніка та пакет прикладних програмних пакетів *Microsoft Excel* та програма «EXTRACTOR.1» написана мовою програмування Pascal, в середовищі Borland Delphi 7.0.

Аналіз експерименту показав, що найбільший вплив на процес екстрагування за умов дії МХ для розробки рекомендацій по режимам проведення даного процесу надають такі технологічні та режимні параметри: вихідна потужність магнетронів, продуктивності за сировиною й екстрагентом, а також висота шару сировини в одиничному масообмінному модулі .

Проведено виробничі випробування зразку МХ апарату безперервної дії. Визначено розподіл температур за висотою апарата, проведено запуск та дослідження екстрагування при різному завантаженні масообмінних модулів. Експериментальні дослідження підтвердили вірність гіпотези, щодо впливу завантаження модуля на концентрацію екстракту. На виході було отримано екстракт з концентрацією сухих речо-

вин 29 %. Згідно результатів випробувань було розроблено прогнозний графік, представлений на рис. 11. Згідно з прогнозом, при збільшенні завантаження до 300 г можливо отримати рідкий концентрат кави з утримання сухих водорозчинних речовин 50 ... 60 %.

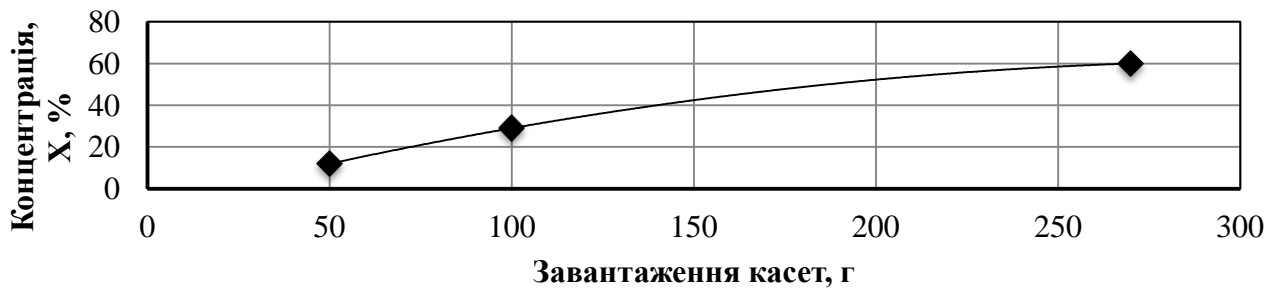


Рис. 11. Графік з прогнозуванням результату для різного завантаження масообмінних модулів.

Після завершення проходження модуля за всією висотою МХ апарату безперервної дії було проведено оцінку ефективності вилучення сухих речовин. Верхній модуль блоку, який пройшов за всією висотою екстрактора було видалено, а отриманий шлам перевірено на вміст сухих речовин за стандартною методикою.

Відібрані 100 грамів вологого шламу, вологовміст якого становив 84,6 % поміщено до лабораторного МХ екстрактора зі зворотним холодильником і в нерухомому шарі довилучено екстрактивні компоненти. На рис. 12 представлено результати екстрагування сухих речовин зі шламу, отриманого після проходження модуля за всією висотою МХ апарату безперервної дії.

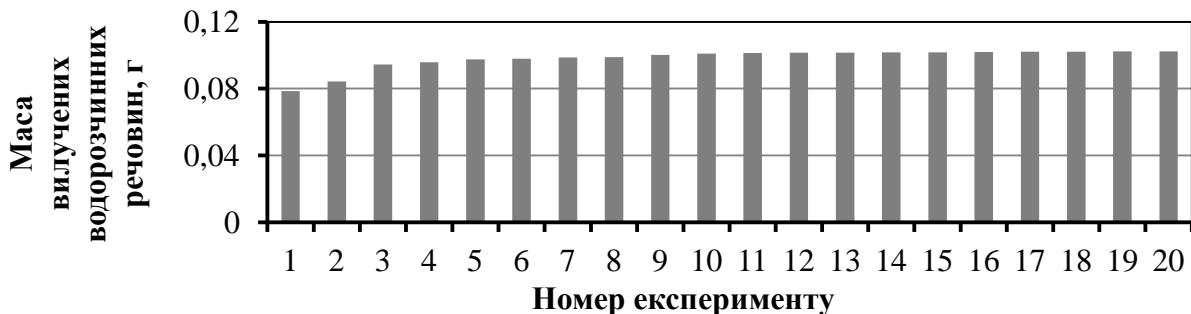


Рис. 12. Процес довилучення екстрактивних речовин з отриманого шламу кави.

Згідно із результатами експерименту, у шламі залишалося 0,65 % екстрактивних речовин, що добре узгоджується з метою, яку було поставлено у дослідженні. Можна говорити про те, що дана технологія й апарат ресурсоефективні та дозволяють підвищити резерви використання сировини.

Отриманий на виході з апарату концентрат кави з вмістом сухих речовин 50 ... 60 % – сучасний аналог сухої розчинної кави. Виключення етапу сушіння дозволить значно підвищити енергоефективність.

Застосування математичних методів оптимізації МХ апарату безперервної дії ускладнюється характером математичних моделей установки, складною структурою масових і теплових потоків. У зв'язку з цим, вважаємо доцільним провести оптимізацію з використанням засобів обчислювальної техніки, а також проаналізувати вплив конструктивних і режимних параметрів апарату на техніко-економічні показники установки. Наступним етапом – провести серію комп'ютерних експериментів

для визначення оптимальних режимів функціонування екстрактора для різних продуктивностей установки.

Значущими показниками для оцінки економічної ефективності, у даному випадку, вважаються капітальні витрати на виготовлення установки, річне споживання електроенергії та вартість продукції. Це враховується при пошуку функціоналу економічної ефективності  $Z$ :

$$Z = \max (Ц \cdot D - K_y - C_{ey} \cdot P_{ey}), \quad (4)$$

де  $P_{ey}$  – річне споживання енергії, кВт·год.;  $C_{ey}$  – вартість одиниці енергії, грн/кВт·год;  $K_y$  – вартість установки, грн;  $D$  – кількість сировини збереженої за рахунок додаткового вилучення:  $D = G_{ocm} \cdot (C_n - C_{ocm}) \cdot k_{ze}$  ( $k_{ze}$  – коефіцієнт що враховує втрати екстрактивних речовин із твердими відходами по відношенню до вихідної сировини (сирим зернам кави) і дорівнює 1,3.). Оптимізація установки - це пошук максимального значення цільової функції  $Z$ . З функції оптимізації  $Z$  (4) і математичних моделей установки, наведених вище, визначено, що параметрами, які оптимізуються є: висота шару продукту у масообмінному модулі  $\delta$ , температура нагрівання екстрагенту  $t$ , гідромодуль  $q$ , розміри масообмінного модуля ( $L, B, h$ ), кількість модулів за висотою установки  $n$ .

Для вирішення задачі оптимізації обрано класичний ітераційний метод поординатного спуску Гаусса-Зейделя, який зводить задачу пошуку найбільшого значення функції декількох змінних до багаторазового рішення одномірних завдань оптимізації.

Для виконання цього завдання, застосовано програму «EXTRACTOR.2», яка написана мовою програмування Pascal, в середовищі Borland Delphi 7.0. Виявляється, що більш економічними є масообмінні модулі довжиною 0,94 м. Так, даний розмір модуля МХ екстрактора забезпечує 32 % підвищення функціоналу по відношенню до дослідно-промислової установки.

Надалі для апаратів з модулями довжиною 0,9 м було проведено розрахунки функціоналу при різній ширині модуля й отримано дані координати локального оптимуму за параметром, що оптимізується. Максимум економічної ефективності функціоналу досягається при значенні ширини масообмінного модуля екстрактора 350 мм. Аналогічно проведено аналіз впливу всіх змінних параметрів за кожною координатою локального оптимуму. Максимум економічної ефективності функціоналу досягається кількості масообмінних модулів 15 шт та при значенні висоти масообмінного модуля екстрактора менше 1 мм, виходячи з конструктивних міркувань, дана величина була прийнята 8 мм. З метою аналізу впливу режимних параметрів апарату: гідромодуль системи «подрібнені зерна кави - вода»  $q$  і температури нагріву екстрагента  $t$  в МХ апараті безперервної дії на техніко-економічні показники проводився комп'ютерний експеримент.

Результати даних розрахунків впливу основних режимних параметрів апарату наведені на рис. 13, 14. Зі збільшенням гідромодуля від 1 до 3 спостерігається підвищення функціоналу економічної ефективності  $Z$  (рис. 13). Однак подальше збільшення гідромодуля не приводить до подальшого зростання економічної ефективності, але знижує концентрацію екстрактивних речовин в екстракті, тому доцільно прийняти оптимальне співвідношення між сировиною і екстрагентом в масообмінних модулях 1: 3.



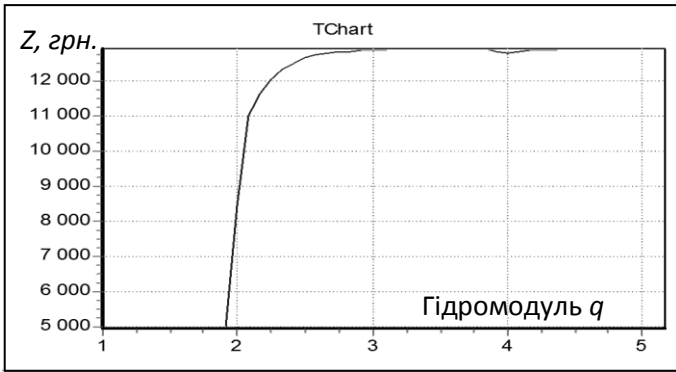


Рис. 13. Вплив гідромодуля системи «кава - вода»  $q$  на функціонал економічної ефективності  $Z$ .

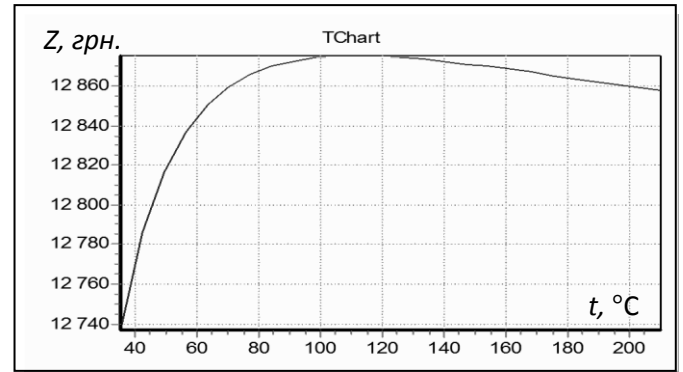


Рис. 14. Вплив температури нагрівання екстрагента  $t$  на функціонал економічної ефективності  $Z$ .

Гідромодуль менше 3 негативно позначається на техніко-економічних характеристиках установки. Видно, що максимум економічної ефективності функціоналу досягає при значенні температури екстрагента близько  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Магнетрони повинні забезпечувати ефективне ведення процесу при мінімальних економічних витратах. В даному випадку, можливо, виявити загальні тенденції впливу продуктивності та потужності, що підводиться, МХ інтенсифікаторів на конструктивні і економічні параметри самого апарату.

У додатках подано методики проектування МХ екстракторів, економічної оцінки організаційних і технічних заходів енергоменеджменту. Таблиці визначених чисел подібності та коефіцієнтів масовіддачі. Наведено протоколи аналізу якості виробленої продукції (рідкий концентрат кави отриманий у МХ апараті безперервної дії після випарювання у МХ випарному апараті), скріншот головного вікна програми «EXTRACTOR.1» та «EXTRACTOR.2» для проведення розрахунку параметрів процесу екстрагування, акти виробничих випробувань, впроваджень і дегустацій на підприємствах «ГАЛКА», «Укркава», «Енни Фудз».

Досліджено резерви вилучення екстрактивних речовин з кави за умов розрідження у вакуумному МХ екстракторі (рис. 15).

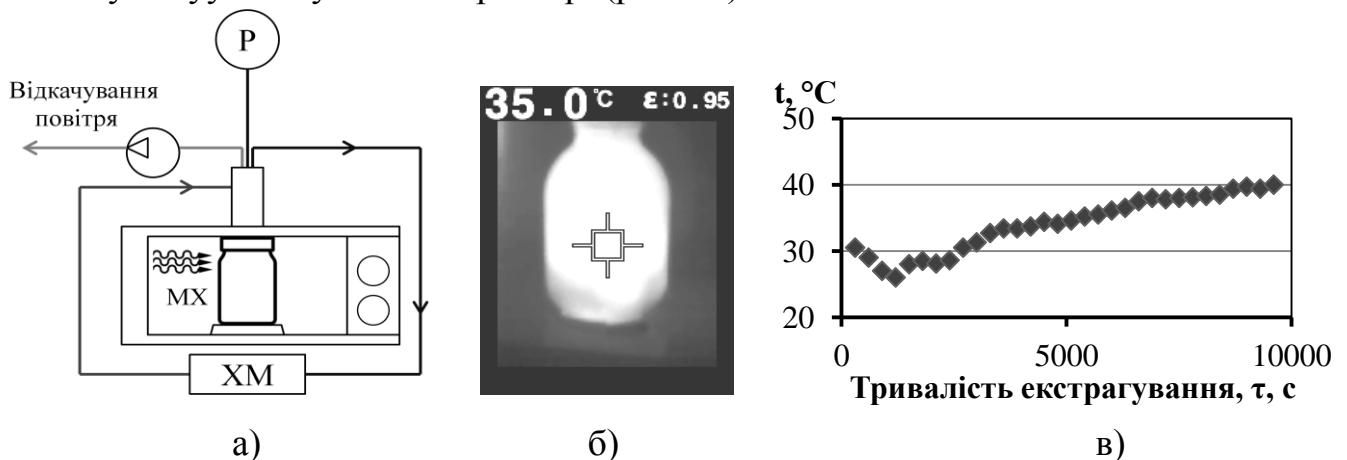


Рис. 15. Екстрагування за умов розрідження: а) схема установки; б) температура у екстрагувальній ємності при розрідженні 20 кПа; в) упродовж експерименту.

За рахунок створення розрідження в ємності для екстрагування можливо здійснювати процес при нижчих температурах. Процес здійснювався за температур 25 ...

50 °С і супроводжувався інтенсивним кипінням. При використанні гідромодуля 1: 4 вдалося вилучити 22 % сухих речовин з зерен кави масою 260 г за 2 етапи. Екстрагування відбувалося при тиску 20 кПа і температурах 25 ... 40 °С, концентрація сухих речовин у екстракті становила 3 ... 4 % с.р. При збільшенні тиску до 70 кПа температура підвищилася до 75 ... 80 °С, концентрація екстрактивних речовин у екстракті 7 ... 8 %. Ефекти низькотемпературного кипіння, які сприяють активному перемішуванню шару часточок меленої кави, при поєднанні з ефектом механодифузії дозволяє отримати екстракт кави за цілковито інакших умов. При використанні гідромодулю 1:4 до екстракту перейшло 32 % екстрактивних речовин, чого не вдалося досягти іншими методами (термостатування, МХ екстрагування при атмосферному тиску).

Кріоконцентрування, на відміну від випарювання, дозволяє повністю зберегти аромат продукту, що є дуже важливим при виробництві кавопродуктів та кавових концентратів. Досліджено можливість концентрування екстракту кави 7...8 % с.р. до концентрації понад 20 % для зручності подальшої обробки та зберігання. Для досліді було використано: екстракт з початковою концентрацією – 7,6 °brіx , об'єм екстракту 15,08 л (рис. 16).

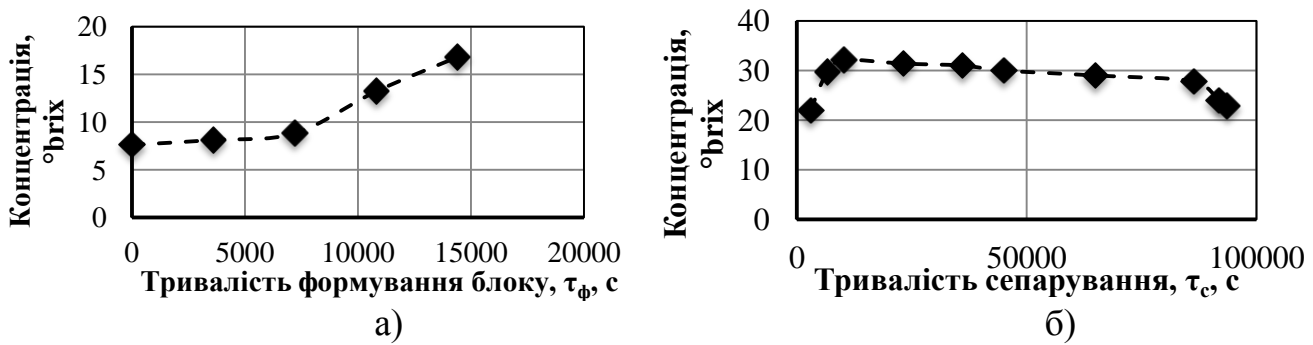


Рис. 16. Формування блоку льоду з екстракту кави (а) та сепарування концентрату (б).

Застосовуючи метод кріоконцентрування вдалося підвищити концентрацію з 7,6 до 32 °brіx. Кріоконцентрування, на відміну від випарювання, дозволяє зберегти аромат продукту повністю, що дуже важливо для кави, тому цей метод може розглядатися, як альтернатива розпилювальному сушінню та випарюванню.

## ВИСНОВКИ

1. Комплексним показником інтенсивності процесу екстрагування є ефективний коефіцієнт масовіддачі  $\beta_e$ , який є функцією від 12 параметрів. З використанням методики аналізу розмірностей число значущих змінних знижено з 12 до 3.
2. З використанням теорії подібності отримано математичні моделі гідравлічних та масообмінних процесів у диференціальній формі, виділено еквівалентний розмір часток кави  $D$ , як окремий фактор у математичній моделі і який дорівнює 1,2.
3. Експериментально визначено гідростатичний тиск у масообмінних модулях, числа Рейнольдса та Ейлера при протіканні екстрагенту крізь шар продукту, при зменшенні дисперсності часток меленої кави менше 1 мм мають місце процеси псевдозрідження.

4. У порівнянні з термостатуванням, за температури 60 °С, ефективність екстрагування у МХ полі зростає приблизно у 1,5 рази. Збільшення питомої потужності з 72,5 до 821,6 Вт/кг/кг підвищує вихід сухих речовин у 3 рази та суттєво скорочує тривалість процесу. Визначено вплив витрати екстрагенту, збільшенням еквівалентного діаметру часток, товщини шару на вихідну концентрацію сухих речовин у екстракті.

5. Визначено коефіцієнти масовіддачі при зміні режимних параметрів: при підвищенні потужності з 72,5 до 821,6 Вт/кг він зростає приблизно у 10 разів, при збільшенні витрати екстрагенту зростає пропорційно, при збільшенні товщини шару у 5 разів – зменшується приблизно у 4 рази, при збільшенні еквівалентного діаметру часток з 3 до 0,8 коефіцієнт зменшується у 2 рази. Результати експериментів узагальнено у вигляді математичних моделей у критеріальній формі.

6. Розроблені інженерні методики дозволили визначити параметри, що впливають на функціонал економічної ефективності: річне споживання енергії, вартість одиниці енергії; вартість установки, кількість сировини, збереженої за рахунок додаткового вилучення.

7. Моделювання та оптимізація за допомогою пакету програм EXTRACTOR дозволили запропонувати типорозмірний ряд екстракторів. Максимум економічної ефективності відповідає: масообмінним модулям довжиною 0,94 м, висотою 0,9 м, шириною 350 мм, кількості масообмінних модулів 15 шт та при значенні висоти масообмінного модуля екстрактора 1...8 мм, гідромодулі «сировина-екстрагент» 1:3 та температурі близько 100 °С.

8. Виробничі випробування підтвердили ефективність конструкції мікрохвильового апарату безперервної дії за виходом готового продукту – до 50 % с.р. у екстракті на виході та за використанням сировини – залишкова концентрація у твердій фазі на виході 0,65 %.

9. Програмний пакет для оптимізації екстракторів впроваджено на підприємствах «Енні Фузд» та «ГАЛКА Лтд», акти дегустації концентрату кави отриманого на мікрохвильовому апараті безперервної дії підтверджують його високі смакоароматичні властивості та якість.

#### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.

1. Левтринська Ю.О., Зиков О.В., Терзієв С.Г. Математичне моделювання та оптимізація мікрохвильового протитечійного екстрактора // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2017. Т.81, вип. 1. С. 157-163. **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, в співавторстві розроблено математичну модель, підготована стаття до друку.
2. Левтринська Ю.О., Терзієв С.Г. Испытания микроволнового экстрактора в условиях производства / Ю.О. Левтринська, С.Г. Терзієв // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2017. Т.81, вип. 1. С. 120–124. **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.
3. Терзієв С.Г., Левтринська Ю.О., Зиков О.В. Оптимізація поточних мікрохвильових екстракторів кави // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. № 3(98). С. 106-111. **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.
4. Терзієв С.Г., Левтринська Ю.О. Дослідження гідравлічних і масообмінних процесів при мікрохвильовому екстрагуванні кави // Харчова промисловість. 2017. № 21. С.127-134. **Особистий**

**внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.

5. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes / Oleg Burdo, Valentyna Bandura, Aleksandr Zykov, Igor Zozulyak, Julia Levtrinskaya, Elena Marenchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 4/11(88). P. 34-42. **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, в співавторстві розроблено математичну модель підготована стаття до друку.

6. Микроволновые технологии интенсификации массообменных и теплових процессов при переработке растительного сырья / Левтринская Ю.О. та ін. // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. Т.80, вип. 1. С. 67–73. **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.

7. Using of the wave technologies in intensification processes of heat and mass transfer / Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J., Marenchenko, E. // EUREKA: Physics and Engineering. 2017. 4, 18–24. doi: 10.21303/2461-4262.2017.00399 **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.

8. Бурдо О.Г., Бандура В.Н., Левтринская Ю.О. Электротехнологии адресной доставки энергии при обработке пищевого сырья // Электронная обработка материалов. 2017. №53(3). С. 64-72. **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.

9. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Левтринская Ю.О. Энергетика экоиндустрии производства пищевых концентратов // Научный информационно-аналитический инженерный журнал «Problemele energeticii regionale (Проблемы региональной энергетики)». 2015. №3 (29). С.112-118. **Особистий внесок здобувача:** проведено літературний пошук, підготована стаття до друку

10. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Левтринская Ю.О. Энергетические проблемы экономики Украины // Энергетика: економіка, технології, екологія. 2015. №4. С. 66-73. **Особистий внесок здобувача:** проведено літературний пошук, запропонував використати методи енергетичного менеджменту для системного аналізу тепло технологій, проаналізовано результати аудиту, підготована стаття до друку

11. Терзиев С.Г., Левтринская Ю.О., Бурдо О.Г. Совершенствование теплотехнологий производства кофе // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2015. Т.2, вип. 47. С. 81-87. **Особистий внесок здобувача:** проведено літературний пошук, підготована стаття до друку

12. Левтринская Ю.О., Терзиев С.Г. Производственные испытания макета микроволнового противоточного экстрактора кофе // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології» 4 – 8 вересня 2017 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2017. С. 200-204. **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку

13. Левтринская Ю.О., Зиков А.В., Терзиев С.Г. Математичне моделювання процесу екстрагування в мікрохвильовому полі та оптимізація протитечійного екстрактора з підводом електромагнітної енергії // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології» 4 – 8 вересня 2017р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2017. С. 367-374. **Особистий внесок здобувача:** проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку

14. Левтринская Ю.О., Терзиев С.Г. Виробничі випробування пілотного зразка мікрохвильового проточного екстрактора // Збірник тез доповідей Міжнародної наукової конференції «Хімічна технологія та інженерія» 26 – 30 червня 2017р. /Нац. університет «Львівська політехніка». Львів, 2017. С. 194-195. **Особистий внесок здобувача:** проведено літературний пошук, підготована стаття до друку

15. Терзиев С.Г., Левтринська Ю.О. Дослідження гідравлічних процесів в мікрохвильовому протитечійному екстракторі // Програма і матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» присвячена 65-річчю кафедри процесів і апаратів харчових виробництв НУХТ, 8-10 листопада / Нац. університет харч. технол. Київ, 2016. С. 84-85. **Особистий внесок здобувача:** розроблено

*схему експериментальної установки, методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів, підготована стаття до друку*

16. Терзієв С.Г., Левтринская Ю.О. Гідравліка у модулях мікрохвильового // Матеріали XVI Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання» 5 – 9 вересня 2016 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. С. 360-367. **Особистий внесок здобувача:** *розроблено схему експериментальної установки, методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів, підготована стаття до друку*

17. Терзієв С.Г., Левтринская Ю.О., Бурдо О.Г. Повышение эффективности теплотехнологий производства кофе // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології» 7 – 11 вересня 2015 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2015. С. 166-173. **Особистий внесок здобувача:** *сформульовано наукове протиріччя, поставлені завдання для моделювання процесів, підготована стаття до друку*

18. Левтринская, Ю.О. Эффективное использование сырья с помощью микроволновых технологий на примере получения кофейного экстракта // Збірник матеріалів IX Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю «Проблеми формування здорового способу життя у молоді» 30 вересня – 2 жовтня 2016 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. С. 239-240. **Особистий внесок здобувача:** *проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку*

19. Терзієв С.Г., Левтринська Ю.О. Удосконалення теплових технологій розчинної кави // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт.» 1 грудня 2016. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. С. 3-5. **Особистий внесок здобувача:** *проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.*

20. Терзієв С.Г., Левтринская Ю.О. Особенности потребления энергии при микроволновом экстрагировании из растительного сырья // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт.» 1 грудня 2016. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. С. 9-21. **Особистий внесок здобувача:** *проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.*

21. Терзієв С.Г., Левтринская Ю.О. Бизнес-перспективы внедрения инновационных проектов в технологию растворимого кофе // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт.» 1 грудня 2016. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. С. 19-20. **Особистий внесок здобувача:** *проведені експериментальні дослідження та їх аналіз, підготована стаття до друку.*

22. Терзієв С.Г., Левтринська Ю.О. Прогноз структуры потребления энергии в мире до 2040 г. // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт.» 12 листопада 2015. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. С. 5-6. **Особистий внесок здобувача:** *проведено літературний пошук, підготована стаття до друку*

23. Бурдо О.Г., Левтринська Ю.О., Терзієв С.Г. Этапы выхода Украины из энергетического кризиса // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт.» 12 листопада 2015. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2015. С. 16-18. **Особистий внесок здобувача:** *проведено літературний пошук, підготована стаття до друку*

24. Терзієв С.Г., Левтринська Ю.О. Технологии глубокого использования сырья при производстве кофепродуктов // Матеріали науково-практичної конференції «Енергія. Бізнес. Комфорт.» 12 листопада 2015. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. С. 50-51. **Особистий внесок здобувача:** *сформульовано наукове протиріччя, поставлені завдання для моделювання процесів, підготована стаття до друку*

25. Левтринская Ю.О. Эффективное использование сырья с помощью микроволновых технологий на примере получения кофейного экстракта // Збірник матеріалів VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю «Проблеми формування здорового способу життя у молоді» 10 – 11 листопада 2015 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2015. С. 323-324. **Особистий внесок здобувача:** *сформульовано наукове протиріччя, поставлені завдання для моделювання процесів, підготована стаття до друку*

26. Левтринская, Ю.О. Потенциал отходов производства растворимого кофе, как сырья для производства биоэтанола // «Енергія. Бізнес. Комфорт.» 20 листопада 2014. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2014. С. 27. **Особистий внесок здобувача:** проведено літературний пошук, підготована стаття до друку

27. Левтринская Ю.О. Использование микроволновых технологий, энергетическая эффективность при производстве кофепродуктов // Збірник матеріалів VII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю «Проблеми формування здорового способу життя у молоді» 4 – 5 листопада 2014 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2014. С.258-259. **Особистий внесок здобувача:** проведено літературний пошук, підготована стаття до друку

## АНОТАЦІЯ

Левтринська Ю.О. Екстрагування кави в мікрохвильовому апараті безперервної дії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв, Одеська національна академія харчових технологій, Одеса 2017.

У роботі представлено апарат, що дозволяє отримати концентрат кавового екстракту при атмосферному тиску і температурах не вище 100 ° С, що позитивно впливає на якість продукту. В апараті реалізовані протитечійний рух твердої фази та екстрагента. Обґрунтовано структуру рівняння в узагальнених змінних для протитечійного руху твердої фази й екстрагенту в мікрохвильовому полі. Досліджено гідралічні процеси у масообмінних модулях апарату. Порівняння екстрагування традиційним тепловим способом і в мікрохвильовому полі, підтверджує, що при дії останнього підвищується загальний вихід екстрактивних речовин. Узагальнення експериментальних досліджень масообміну дозволило визначити ступеня в критеріальному рівнянні для числа Рейнольдса -0,86, числа Шмідта 0,43, Бурдо 0,35, безрозмірною проникності 0,42, еквівалентного діаметра частинок кави 1,2. Складено інженерні методики розрахунку апарату. Комп'ютерне моделювання дозволило провести оптимізацію конструктивних і режимних параметрів. При виробничих випробуваннях апарату отримано концентрат кавового екстракту. Згідно з актами дегустації, отриманий продукт має високу якість, смакоароматичні властивості, що перевершують звичайний розчинну каву. У відпрацьованій твердій фазі залишається не більше 0,65 % екстрактивних речовин. Також проведено екстрагування кави в умовах дії мікрохвильового поля в камері з розрідженням. Для додаткового підвищення концентрації екстракту кави використано метод блочного виморожування.

**Ключові слова:** екстрагування, масообмін, коефіцієнт масовіддача, мікрохвильове поле, розчинна кава, протитечія, бародифузія.

## АННОТАЦИЯ

Левтринская Ю.О. Экстрагирование кофе в микроволновом аппарате непрерывного действия. – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических

и фармацевтических производств, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса 2017.

В работе представлен аппарат, позволяющий получать инновационный продукт – жидкий концентрат кофейного экстракта. Аппарат предназначен для водного экстрагирования при атмосферном давлении и температурах не выше 100 °С, что положительно влияет на качество экстракта. В аппарате реализованы противоточное движение твердой фазы и экстрагента, стадии промывки зерен водой, насыщения экстракта и исчерпания целевых компонентов. Массообменные модули выполнены из радиопрозрачного материала и в них реализовано многослойное течение экстрагента через слой продукта.

Задачи моделирования гидродинамических и массообменных процессов в условиях противотока твердой фазы и экстрагента при воздействии микроволнового поля, не могут быть решены аналитически, ввиду неопределенности всех компонентов массового потока целевых компонентов. Методами теории подобия и анализа размерностей обоснована структура уравнения в обобщенных переменных для процесса экстрагирования из измельченных зерен кофе в условиях противоточного движения твердой фазы и экстрагента при воздействии микроволнового поля. Для данного случая число Стантона массообменного выражается в зависимости от чисел Рейнольдса, Шмидта, Бурдо, безразмерной проницаемости и эквивалентного диаметра частиц измельченного кофе. Суммарный массовый поток состоит из диффузионного потока из зерен, конвективного диффузионного потока от их поверхности и бародиффузионного потока, возникающего при воздействии микроволнового поля. Разделение составляющих потока затруднено. Для оценки эффективности экстрагирования предложено использовать коэффициент массоотдачи.

Экспериментально изучены гидравлические процессы в массообменных модулях микроволнового аппарата непрерывного действия. Определены режимы течения при изменении расхода экстрагента и эквивалентного диаметра частиц измельченного кофе. Установлено, что при использовании мелко размолотого кофе (менее 1 мм) имеют место процессы псевдооживления. Рассчитаны значения чисел Рейнольдса и Эйлера для гидравлических процессов в микроволновом аппарате непрерывного действия. Результаты обобщены в виде математической модели гидравлических процессов. При исследовании массообменных процессов определены условия фазовых равновесий в системе «измельченные кофейные зерна – вода». Установлено максимальное содержание растворимых экстрактивных веществ в кофейных зернах высшего сорта Арабика при воздействии микроволнового поля. Проведено сравнение процессов экстрагирования традиционным тепловым способом и при воздействии микроволнового поля, подтверждено, что при действии последнего значительно повышается общий выход экстрактивных веществ. Интенсификация процесса экстрагирования в микроволновом поле связана с явлением бародиффузии, впервые описанным проф. Бурдо О.Г., что подтверждают результаты проведенных экспериментов.

В статических условиях определено влияние гидромодуля. В условиях непрерывного движения экстрагента через слой продукта установлены кинетические зависимости влияния интенсивности воздействия микроволнового поля, расхода экстрагента, толщины слоя продукта в массообменном модуле, дисперсности твердой

фазы. В результате обобщения экспериментальных данных определены показатели степени числа Рейнольдса -0,86, числе Шмидта, Бурдо, безразмерной проницаемости и эквивалентного диаметра частиц кофе.– 0,43, 0,35, 0,42, 1,2. Сравнение расчетного и экспериментального числа Стантона массообменного показывает удовлетворительное согласование, не превышающее 40 %. Составлены инженерные методики расчета микроволнового аппарата непрерывного действия и разработаны режимы для проведения его производственных испытаний. Проведено компьютерное моделирование с использованием прикладного пакета программ EXTRACTOR и MS Excel. Программа EXTRACTOR.1 позволяет определять влияние режимных и конструктивных параметров микроволнового аппарата непрерывного действия на концентрацию экстракта на выходе и удельную мощность. С помощью программы EXTRACTOR.2 возможно проводить оптимизацию экстракторов, выполнять поиск максимума функционала экономической эффективности. По результатам вычислительного эксперимента проведена оптимизация конструктивных и режимных параметров и разработан типоразмерный ряд микроволновых аппаратов непрерывного действия. Программное обеспечение внедрено на предприятиях Енни Фудз и ГАЛКА Лтд.

При запуске микроволнового аппарата в режиме противоточного движения экстрагента и твердой фазы проведены исследования влияния загрузки массообменных модулей на концентрацию экстракта на выходе. Производительность аппарата – 16 кг/ч. Получен концентрат кофейного экстракта – жидкий кофе. Экспериментально подтверждено, что возможно получить на выходе концентрат экстракта кофе с содержанием сухих веществ выше 50 %. Исключение энергозатратного этапа сушки экстракта позволит снизить расходы на производство продукта, без снижения его качества. Исследование эффективности использования твердой фазы показало, что в полученном после прохождения по всей высоте экстрактора шламе остается не более 0,65 % экстрактивных веществ по сравнению с 4...5 % при традиционном способе. Согласно актам дегустации, образцов концентрата кофейного экстракта, полученный продукт имеет высокое качество, вкусоароматические свойства, превосходящие обычный растворимый кофе.

В рамках дополнительных исследований проведено экстрагирование кофе в условиях действия микроволнового поля в камере с разрежением. В условиях вакуума реализован режим низкотемпературного кипения, экстрагирование произведено при температурах не выше 50 °С. Для дополнительного повышения концентрации экстракта кофе использован метод блочного вымораживания. При обработке экстракта с содержанием сухих веществ близко 8 % получен 32 % - ный концентрат.

**Ключевые слова:** экстрагирование, массообмен, коэффициент массоотдачи, микроволновое поле, растворимый кофе, противоток, бародиффузия.

## ABSTRACT

Levtrinskaya J.O. Extraction of coffee in a microwave continuous operation. - The manuscript.

Thesis for competition the scientific degree of Ph.D. in technical science specialty 05.18.12 – Processes and equipment for food, microbiological and pharmaceutical industries, Odessa national academy of food technologies, Odessa 2017.



The present thesis is dedicated to the research extractor that allows to obtaining a concentrate of coffee extract at atmospheric pressure and temperatures lower than 100 °C, which positively affects for the product quality. The extractor has backflow motion of the solid phase and extragent. The structure of the equation in generalized variables for the backflow motion of the solid phase and the extractant in the microwave field is substantiated. Hydraulic processes in masstransfering modules of the extractor are investigated. Comparison of extraction by traditional heat and in the microwave field, confirms that the action of microwaves increases the total yield of extractives. The generalization of experimental studies of mass transfer enabled the degree in the criterion equation for the Reynolds number -0.86, the Schmidt number 0.43, the Burdo number 0.35, the dimensionless parametrical permeability of 0.42, the equivalent diameter of the coffee particles 1.2 determined. The engineering methods of calculation of the extractor are designed. Computer simulation allowed to design and mode parameters optimization. During production tests, the coffee extract concentrate was obtained. According to the tasting, the product obtained is of high quality, taste-aromatic properties that overcome the usual soluble coffee. In the spent solid phase no more than 0.65 % of extractives remain. Also, extraction of coffee in the conditions of the microwave field in a chamber with a dilution is carried out. The method of block freezing is used to further increase the concentration of coffee extract.

**Key words:** extraction, mass transfer, mass transfer coefficient, microwave field, soluble coffee, backflow, barodiffusion.





Підписано до друку 03.11.2017 р. Формат 60×90/16. Папір офсет. Друк офсет.  
Умов. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Замовл. № 415

---

Видавничій центр ОНАХТ, 65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112