

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Середній показник споживання кави в Україні є близько 1,5 кг на рік на одну людину. Найбільша частка в структурі ринку кавової продукції припадає на розчинну каву – біля 40 % загального обсягу продажу.

При виробництві розчинної кави шлам складає 60...65 % вихідної сировини. На 1 т готової продукції припадає 1,5...2 т шламу. Отже в Україні на рік викидається близько 1,5...2 тис. т шламу. Нестерилізований шлам чинить екологічно небезпечну ситуацію, забруднюючи навколишнє середовище. В той же час кавовий шлам містить 7...12 % олії, 60...75 % целюлози та лігніну, 5...7 % білків та 3...5 % смакоароматичних речовин (кофеоль). Всі ці компоненти після певної обробки можуть знайти застосування як у харчовій промисловості, так і в інших галузях народного господарства. Олія кави містить 45 % лінолевої кислоти, що робить її багатим джерелом поліненасичених жирних кислот.

Вирішення задач економічно доцільних технологій комплексної переробки та утилізації відходів виробництва дозволить суттєво підвищити ефективність харчо-концентратного виробництва, зменшити витрати енергії, знизити навантаження на довкілля та отримати нову гаму продуктів та матеріалів. Виявлено, що такі прогресивні технології, як інфрачервоне сушіння рослинної сировини та мікрохвильове екстрагування олій у харчових виробництвах дозволяють досягти високої енергоефективності процесів та якості продуктів і мають допомогти вирішити завдання ефективної переробки шламу кави.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалась на кафедрі процесів, апаратів та енергетичного менеджменту Одеської національної академії харчових технологій в рамках держбюджетної тематики науково-дослідних робіт (5/09 – П «Новітні енергетично ефективні харчові технології та нанотехнології в АПК» №0109U000400) та в рамках госпдоговірної тематики (9/10 – «Вдосконалення режимів екстрагування та розробка технології утилізації шламу кави»).

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є обґрунтування доцільних шляхів переробки шламу кави, режимів технологічних процесів сушіння та екстрагування олії при переробці шламу кави.

Для досягнення поставленої мети визначені основні завдання дослідження:

- обґрунтування принципової схеми переробки шламу кави;
- обґрунтування доцільності залучення бародифузійних технологій до процесів сушіння та екстрагування;
- визначення механізмів дії мікрохвильового поля;
- дослідження кінетики процесу сушіння шламу в залежності від початкового вологовмісту, температури, продуктивності сушарки та потужності поля;
- визначення питомих енергетичних витрат процесу сушіння шламу;
- дослідження кінетики процесу екстрагування олії зі шламу в залежності від характеру розчинника, температури, гідромодулю, діаметру часток та потужності поля;
- визначення питомих енергетичних витрат процесу екстрагування шламу;

- розробка інженерних методів розрахунку сушарки та екстрактора з електромагнітним інтенсифікатором;
- дослідження експериментальних зразків сушарки та екстрактора з електромагнітним інтенсифікатором та обґрунтування технологічних параметрів процесу.

Об'єкт дослідження – технологія переробки відходів виробництва кавопродуктів, комбіновані процеси та обладнання для сушіння та екстрагування олії зі шламу кави в умовах впливу інфрачервоного випромінення та мікрохвильового поля.

Предмет дослідження – шлам кави та олія кави, механізм та кінетика сушіння та екстрагування, апарат для екстрагування в умовах мікрохвильового поля.

Методи дослідження – теорія подібності, методи теплофізичного експерименту, фізичні методи аналізу структури розчинів, експериментальні дослідження, аналітичні дослідження з використанням комп'ютерних технологій.

Наукова новизна одержаних результатів. Висунуто гіпотезу, згідно з якою специфіку масопереносу в умовах традиційної конвективної дифузії та бародифузії, що виникає із твердої фази сировини під впливом мікрохвильового поля, можна визначити використанням ефективного коефіцієнту масовіддачі відносно рушійної сили між концентраціями цільового компонента у твердій фазі та в екстрагенті.

Вперше проведено сушіння шламу кави інфрачервоним випроміненням. Отримано кінетичні залежності для процесів ІЧ-сушіння шламу кави у нерухомому та рухомому шарі.

В роботі розширено уявлення про бародифузію при екстрагуванні олії відносно нового об'єкту – шламу кави.

Розроблено методику узагальнення експериментальних даних з урахуванням комбінованої кінетики внутрішньо- та зовнішньодифузійних процесів переносу. В роботі вперше:

- методом «аналізу розмірностей» обґрунтована структура рівняння в узагальнених змінних для розрахунку комбінованих періодичних процесів екстрагування зі шламу кави.
- розроблено методи експериментального моделювання, які дозволяють визначити коефіцієнт масовіддачі в умовах виникнення бародифузії і узагальнити результати експериментів;
- визначені граничні значення вилучення олії та ароматичних речовин зі шламу кави в умовах мікрохвильового підведення енергії;
- визначена залежність впливу потужності мікрохвильового поля, температури, характеру розчинника, співвідношення твердої та рідкої фаз у екстракторі на значення коефіцієнту масовіддачі, співвідношення в безрозмірних числах подібності для розрахунку інтенсивності масопереносу у екстракторах з мікрохвильовим інтенсифікатором періодичної дії.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано схему утилізації та переробки кавового шламу у цінний продукт – олію кави. Процеси ІЧ-сушіння та екстрагування у мікрохвильовому полі рекомендуються для суттєвої інтенсифікації дифузійних процесів масообміну. Визначено рівняння для розрахунку екстракційного обладнання періодичної дії для екст-

рагування шламу кави у мікрохвильовому полі. Показано, що запропонована мікрохвильова обробка шламу під час екстрагування забезпечує зменшення тривалості та енергоємності процесу. Результати дослідження впроваджуються на ПАТ «ЄННІ ФУДЗ», м. Одеса.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці методик дослідів, проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, обробці та аналізі отриманих результатів ІЧ-сушіння шламу кави та екстрагування олії з висушеного шламу в умовах мікрохвильового поля. Розроблені методики математичної обробки отриманих результатів. Сформульовані основні положення та висновки. Постановка завдань, обговорення та обґрунтування результатів досліджень і математичного опису процесів проводились спільно з науковим керівником к.т.н. Терзієвим С.Г.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на 8 наукових конференціях, зокрема, на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми розвитку харчових виробництв, готельного, ресторанного господарств і торгівлі (Харків, 2011); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2011), Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційність розвитку сучасного аграрного виробництва» (Львів, 2011); 72-й науковій конференції науково-викладацького складу академії (Одеса, 2012 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції «ІТЕ-2012» (м. Харків, НТУ ХП); XIV Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2012 р.); V Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Проблеми формування здорового способу життя у молоді»; 73-й науковій конференції науково-викладацького складу академії (Одеса, 2013 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 17 друкованих праць, з них 8 – у фахових виданнях України, тези 4 доповідей на зарубіжних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, що включає 105 найменувань (11 стор.), 2 додатки (4 сторінки).

Роботу викладено на 122 сторінках, які включають 52 рисунки (21 сторінка), 18 таблиць (6 сторінок).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і завдання досліджень, наведена наукова новизна, практичне значення та особистий внесок автора, представлена апробація результатів, публікації автора.

В першому розділі «Стан проблеми та шляхи підвищення ефективності використання сировини у виробництві кавапродуктів» проведено аналіз проблем, які виникають у виробництві розчинної кави, при утилізації шламу кави. Обґрунтовано актуальність одержання олії кави як продукту переробки шламу. Доведено, що необхідними етапами в технологіях вилучення олії зі шламу кави є по-перше, сушіння шламу, а по-друге екстрагування. Шлам має вологість близько 80 %, а така кількість

води значно зменшує концентрацію екстрагенту та робить необхідною його регенерацію. Крім того за такої вологості шлам швидко псується. Розглянуто способи інтенсифікації процесів масопереносу при сушінні та екстрагуванні шламу кави. Обґрунтовано перспективність використання комбінованих процесів інфрачервоної та мікрохвильової дії, при яких можливо значно інтенсифікувати процеси сушіння та екстрагування.

У другому розділі «Об'єкти та методи досліджень процесів сушіння та екстрагування шламу кави» обумовлено вибір напряму досліджень, описано методики та об'єкти досліджень з екстрагування цільових компонентів із рослинної сировини. Подано методики для визначення фазової рівноваги, дослідження кінетики масообміну, визначення коефіцієнту дифузії.

Запропоновано ефективний коефіцієнт масовіддачі β_{ef} , який враховує внутрішньо-, зовнішньо- та бародифузійний процеси:

$$\beta_{ef} = \frac{\Delta M}{F \Delta C} \quad (1)$$

де ΔC – різниця концентрацій цільового компонента у твердій фазі та у розчині екстрагенту; ΔM – маса олії, що перейшла у розчин за одиницю часу; F – площа поверхні контакту фаз.

Головними факторами, що визначають інтенсивність масовіддачі є розмір часток d , густина потоку ρ та в'язкість μ , коефіцієнт дифузії D , тобто параметри, що характеризують інерційні властивості потоку. Різниця концентрацій ΔC , та гравітаційне поле g описують внесок природної конвекції. Дія бародифузії визначається потужністю мікрохвильового інтенсифікатора N , питомою теплотою пароутворення r . Також враховуються витрати продукту (G_{np}) та розчинника ($G_{роз}$). На основі методу аналізу розмірностей отримано степеневу функцію залежності коефіцієнта масовіддачі від наведених параметрів:

$$\frac{M}{c} = M^a \cdot \left(\frac{\kappa z}{M^3}\right)^b \cdot \left(\frac{\kappa z}{M \cdot c}\right)^c \cdot \left(\frac{M}{c}\right)^d \cdot \left(\frac{\kappa z}{M^3}\right)^e \cdot \left(\frac{M^2}{c^2}\right)^f \cdot \left(\frac{\kappa z \cdot M^2}{c^3}\right)^g \cdot \left(\frac{\kappa z}{c}\right)^h \cdot \left(\frac{\kappa z}{c}\right)^i \cdot \left(\frac{M}{c^2}\right)^j \quad (2)$$

Комбінації параметрів дають традиційні числа подібності Шервуда (Sh), Шмідта (Sc), параметричний комплекс співвідношення продукту та розчинника (Γ). Для врахування впливу мікрохвильового поля використовується безрозмірний комплекс, який отримано в результаті наступної комбінації:

$$\left(\frac{Nd\rho^2}{\mu^3}\right) \cdot \left(\frac{G_{роз}}{d\mu}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{d^2 r \rho^2}{\mu^2}\right)^{-1} = \frac{N}{rG_{роз}} = Bu \quad (3)$$

Фізичний зміст числа Bu полягає в тому, що встановлюється співвідношення між енергією, яка діє на розчин, і необхідною для перетворення у пару всього розчину, що знаходиться у екстракторі. Чим ближче число Bu до 1, тим більше утворюється парової фази, тим більший градієнт тисків та інтенсивніші викиди насиченого екстрагенту з капілярів, і більша турбулізація приграничного шару.

Критеріальне рівняння процесу екстрагування в умовах дії мікрохвильового поля наведено у вигляді залежності числа Шервуда (Sh) від чисел Шмідта (Sc), енергетичної дії (Bu), параметричного комплексу співвідношення продукту та розчинника (Γ), і має наступний вигляд:

$$Sh = A(Sc)^n (Bu)^m (\Gamma)^k \quad (4)$$

В третьому розділі «Експериментальні дослідження процесів сушіння та екстрагування шламу кави» наведено результати експериментальних досліджень кінетики ІЧ-сушіння шламу у нерухомому та рухомому шарі та екстрагування цільових компонентів.

На першому етапі досліджували кінетику сушіння шламу. Експерименти у нерухомому шарі проводились на лабораторному стенді (рис. 1) в широкому діапазоні параметрів (табл. 1).

Таблиця 1

Діапазон досліджень ІЧ-сушіння шламу кави

Сировина	Питома потужність ІЧ	Температура, T , °C	Завантаження, g , kg/m^2	Тривалість обробки, τ , хв
Шлам кави	2,5...10 кВт/м ²	45...130 °C	2,5...7,5	20...100

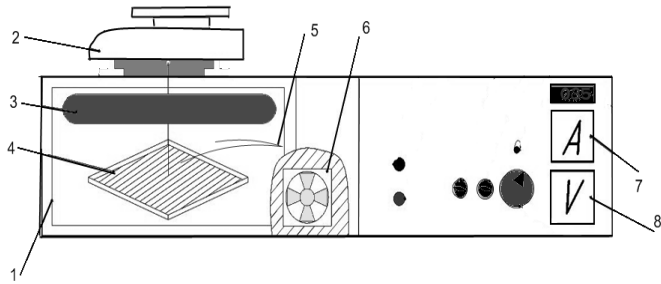
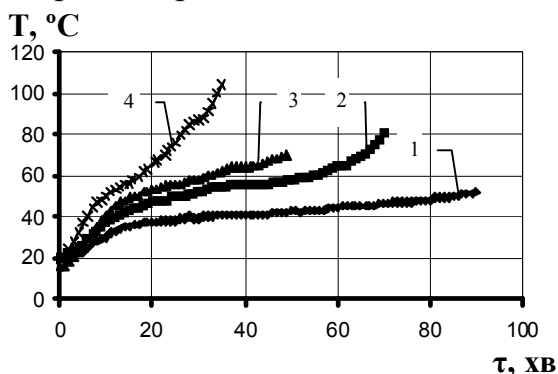
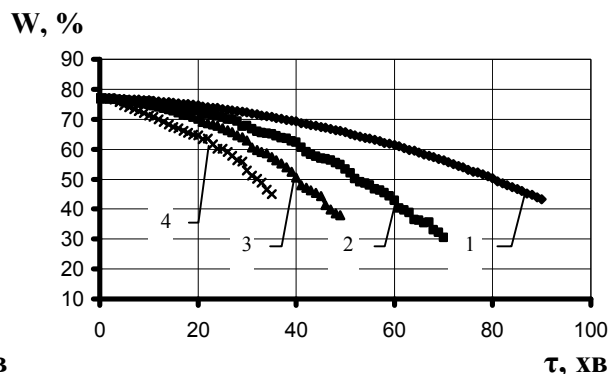


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження процесу ІЧ-сушіння в нерухомому шарі.

Експериментальний стенд складається з ІЧ-камери (1), електронних ваг (2), ІЧ-випромінювачів (3), касети з продуктом (4) системи вимірювання температури продукту та повітря в камері (5) і витрат енергії (7, 8). Рух повітря у камері забезпечується вентилятором (6). Вивчався вплив основних режимних параметрів на кінетику ІЧ-

сушіння шламу.

Вплив енергії. Вивчався вплив енергетичної потужності на швидкість та температуру процесу сушіння. Було виявлено, що шлам кави досить добре поглинає інфрачервоне проміння.

Рис. 2. Термограми процесу сушіння шламу кави: 1 – 2,5 кВт/м²; 2 – 5 кВт/м²; 3 – 7,5 кВт/м²; 4 – 10 кВт/м².Рис. 3. Зміна вологості: 1 – 2,5 кВт/м²; 2 – 5 кВт/м²; 3 – 7,5 кВт/м²; 4 – 10 кВт/м².

На термограмах спостерігається період відносно повільного зростання температури, що вказує на те, що енергія ІЧ випромінювання витрачається на випаровування води.

Вплив питомого завантаження продукту. Оскільки відомо, що інфрачервоне випромінювання має здатність проникати у продукт на певну гли-

біну, важливим параметром процесу сушіння шламу є товщина шару продукту, яка пов'язана з питомим завантаженням продукту у сушарці (рис. 4 – 5).

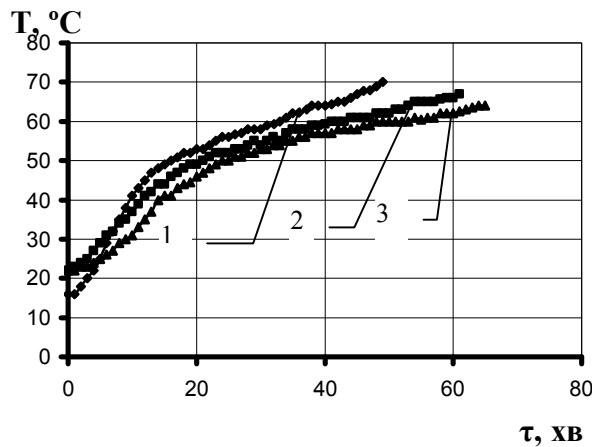


Рис. 4. Термограми процесу сушіння: 1 – 2,5 кг/м²; 2 – 5 кг/м²; 3 – 7,5 кг/м².

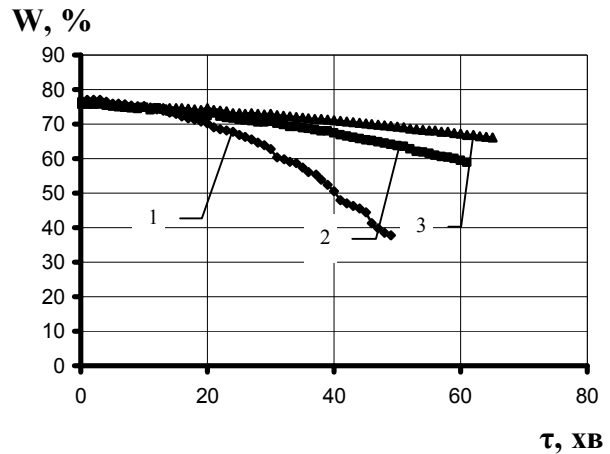


Рис. 5. Зміна вологості: 1 – 2,5 кг/м²; 2 – 5 кг/м²; 3 – 7,5 кг/м².

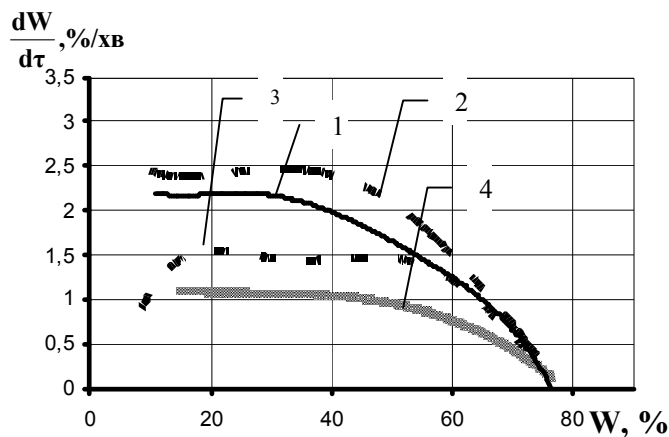


Рис. 6. Лінії швидкості процесу сушіння: 1 – 0 м/с; 2 – 0,5 м/с; 3 – 1 м/с; 4 – 2 м/с.

На швидкостях повітря більших за 0,5 м/с спостерігається зменшення швидкості сушіння (рис. 6), що вказує на втрати енергії з повітрям. Швидкість сушіння у нерухомому повітрі також знижується (рис. 6), оскільки збільшується вологовміст дифузійного середовища над продуктом та зменшується рушійна сила процесу.

На третьому етапі вивчали умови фазових рівноваг при екстрагуванні шламу кави. Визначили коефіцієнти дифузії для систем «олія кави-етанол» та «олія кави-гексан» (табл. 2.).

Таблиця 2
Значення коефіцієнтів дифузії для
олії кави при 25 °C

Система	$D \cdot 10^9, \text{м}^2/\text{с}$
Олія кави-етанол	1,13
Олія кави-гексан	1,3

Збільшення товщини шару продукту також чинить опір переносу вологи до дифузійного середовища.

Вплив швидкості руху повітря в камері. Примусова вентиляція сушильної камери з одного боку руйнує приграничний шар і зменшує концентрацію вологи у повітрі і, таким чином, збільшує інтенсивність переносу вологи з сировини до дифузійного середовища. З другого боку, із повітрям мають місце втрати теплової енергії.

Виявлено, що гранична концентрації олії у шламі складає 20,8... 20,9 %.

На четвертому етапі досліджували кінетику екстрагування олії кави спиртом та гексаном та вивчали вплив основних режимних параметрів на кінетичні залежності. Дослідження проводились у термостаті та на експериментальному стенді

(рис. 7) у широкому діапазоні параметрів (табл. 3).

Діапазон експериментальних досліджень

Стенд	Потужність, Вт	Температура, °C	Екстрагент	Гідромодуль
Термостат	250	40, 50, 60	Спирт, гексан	1:3
		68,7	Гексан, нефрас	1:3; 1:5; 1:10; 1:20
		78	спирт	1:3; 1:5; 1:10; 1:20
НВЧ-екстрактор	127	40, 50, 60	Спирт, гексан	1:3
		68,7	Гексан, нефрас	1:3; 1:5; 1:10; 1:20
		78	спирт	1:3; 1:5; 1:10; 1:20

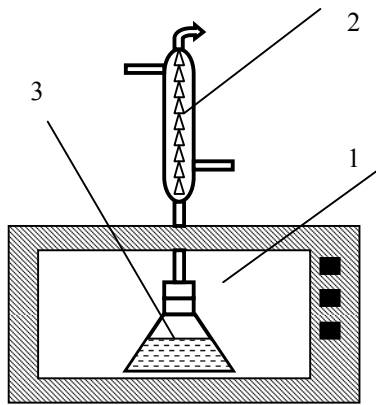


Рис. 7. Експериментальний стенд для дослідження екстрагування у мікрохвильовому полі.

Стенд складається з мікрохвильової камери (1), ємності для продукту (3) та зворотнього холодильника (2). Зворотній холодильник повертає конденсат екстрагенту у реакційну ємність, таким чином, протягом дослідів підтримується постійний гідромодуль. Стенд забезпечує регулювання потужності мікрохвильового поля, дослідів проводилися в умовах кипіння розчинника.

Вплив температури екстрагенту. Збільшення температури екстрагенту підвищує коефіцієнт дифузії. Швидкість екстрагування (рис. 8 – 9) збільшується з ростом температури. В умовах кипіння утворення пари викликає турбулізацію приграничного шару, що значно збільшує швидкість процесу.

При екстрагуванні у мікрохвильовому полі, температура залежить від витрат підведеної мікрохвильової енергії (рис. 10 – 11).

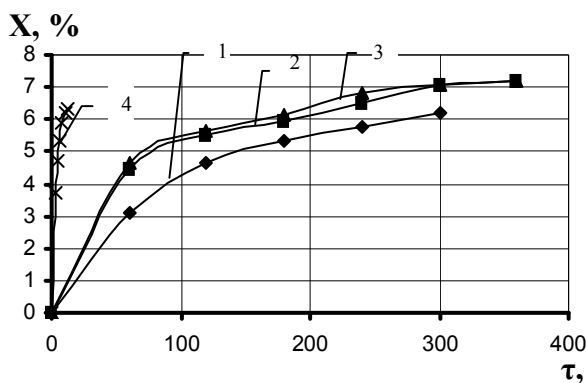


Рис. 8. Вплив температури екстрагенту (гексан) на швидкість екстрагування без дії МХ-поля: 1 - 40°C; 2 - 50°C; 3 - 60°C; 4 - 68.7 °C (кипіння).

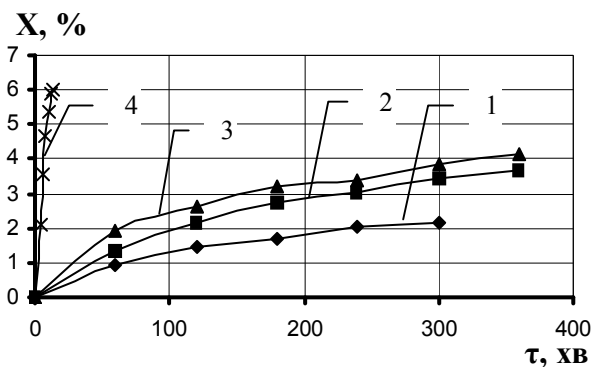


Рис. 9. Вплив температури екстрагенту (спирт) на швидкість екстрагування без дії МХ-поля: 1 - 40°C; 2 - 50°C; 3 - 60°C; 4 - 78,5 °C (кипіння).

З графіків видно, що у мікрохвильовому полі також зі збільшенням температури зростає швидкість вилучення екстрактивних речовин зі шлам, а в умовах кипіння розчинника швидкість процесу та кількість вилучених речовин значно більші,

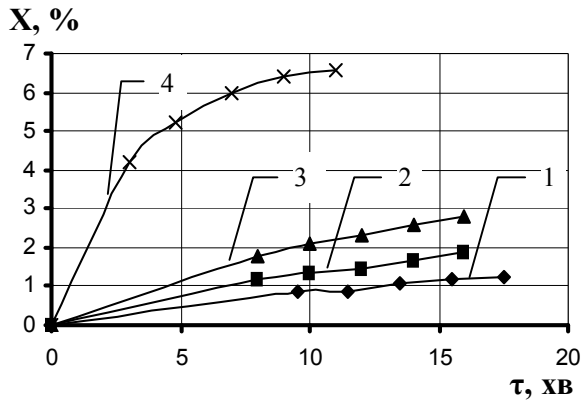


Рис. 10. Вплив температури екстрагенту (спирт) в умовах дії МХ-поля: 1 – 40° С; 2 – 50°С; 3 – 60°С; 4 – 78,5 °С (кипіння).

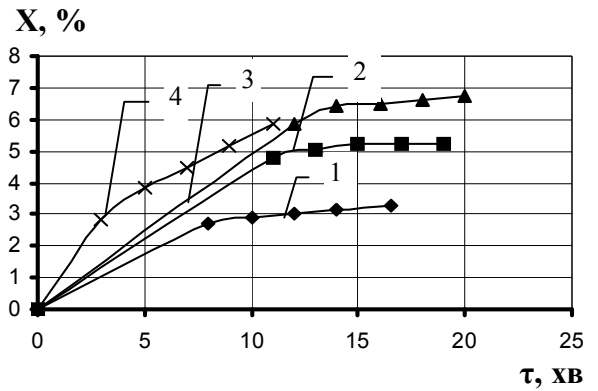


Рис. 11. Вплив температури екстрагенту (гексан) в умовах дії МХ-поля: 1 – 40° С; 2 – 50°С; 3 – 60°С; 4 – 68,7 °С (кипіння).

що пояснюється турбулізацією приграничного шару. Проте для гексану швидкість екстрагування при кипінні та при 60 °С досить близькі. Це можна пояснити тим, що енергія мікрохвиль поглинається передусім вологою, що міститься у капілярах шлам-у, а гексан нагрівається вже від шламу. Тобто парова фаза у капілярах, а відповідно, і бародифузійний потік утворюються в сировині вже при низьких температурах екстрагенту.

Вплив характеру підводу енергії. Дослідження проводились як в умовах традиційного теплового підводу енергії, так і у мікрохвильовому полі (рис. 12 – 13).

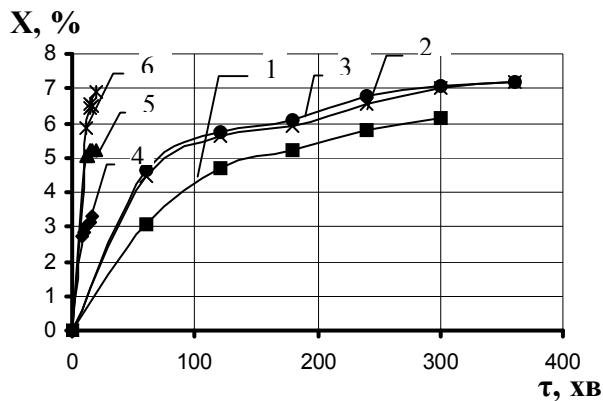


Рис. 12. Вплив характеру підводу енергії на екстрагування гексаном: 1– гексан, термостат, 40 °С ; 2 – гексан, термостат, 50 °С; 3 – гексан, термостат, 60 °С; 4 – гексан, 40 °С, в полі; 5 –гексан, 50 °С, в полі; 6 – гексан, 60 °С, в полі.

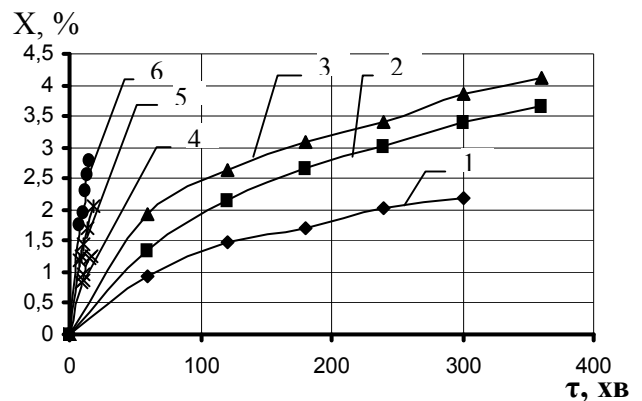


Рис. 13. Вплив характеру підводу енергії на екстрагування спиртом: 1– спирт, термостат, 40 °С ; 2 – спирт, термостат, 50 °С; 3 – спирт, термостат, 60 °С; 4 – спирт, 40 °С, в полі; 5 – спирт, 50 °С, в полі; 6 – спирт, 60 °С, в полі.

Виявлено, що тривалість процесу у мікрохвильовому полі при температурах, нижчих за температуру кипіння, приблизно у 20 разів менша, ніж у термостаті.

Вплив співвідношення твердої та рідкої фаз. Чим більший гідромодуль, тим більша різниця концентрацій екстрактивних речовин у твердій фазі та розчиннику. Проте використання великих обсягів екстрагенту збільшує витрати енергії на його виділення з екстракту та тривалість процесу відгонки. Концентрація олії у розчині зі збільшенням гідромодулю зменшується, оскільки на ту ж

саму кількість олії в сировині припадає більший об'єм розчинника. Таким чином коректно оцінити вплив співвідношення твердої фази та екстрагенту на інтенсивність процесу можна за концентрацією олії у твердій фазі – Y , %.

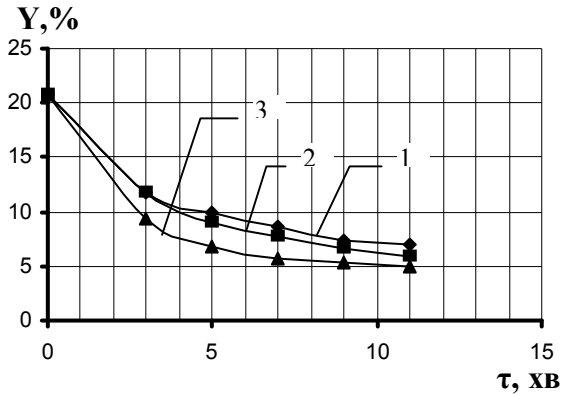


Рис. 14. Вплив гідромодулю (спирт) в МХ-полі при кипінні: 1 – 1:3; 2 – 1:5; 3 – 1:10.

На графіках (рис. 14 – 15) видно, що чим більший гідромодуль, тим швидше виснажується тверда фаза. Зменшення концентрації олії у розчиннику збільшує рушійну силу процесу.

Вплив характеру розчинника. За хімічною природою та властивостями спирт, гексан та нефрас суттєво відрізняються. Гексан та нефрас вилучають переважно ліпіди, в той час як спирт, окрім ліпідів екстрагує водорозчинні, ароматичні та барвні речовини. Крім того, гексан та нефрас є неполярними, і з мікрохвильовим полем не взаємодіють, в той час, як полярний спирт нагрівається. Досліди проводились в умовах кипіння розчинника як без дії мікрохвильового поля, так і у мікрохвильовому екстракторі (рис. 16, 17). Гідромодуль складав 1:3.

Очевидна суттєва інтенсифікація процесу екстрагування етанолом в мікрохвильовому полі, причому вилучення олії та екстрактивних речовин у мікрохвильовому полі спиртом більше ніж гексаном та нефрасом (рис. 17).



Рис. 15. Вплив гідромодулю (гексан) в МХ-полі при кипінні: 1 – 1:3; 2 – 1:5; 3 – 1:10.

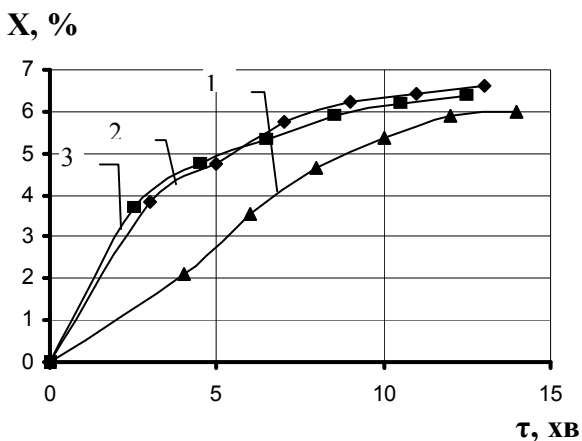


Рис. 16. Вплив характеру екстрагенту без дії МХ-поля (режим кипіння): 1 – спирт; 2 – нефрас; 3 – гексан.

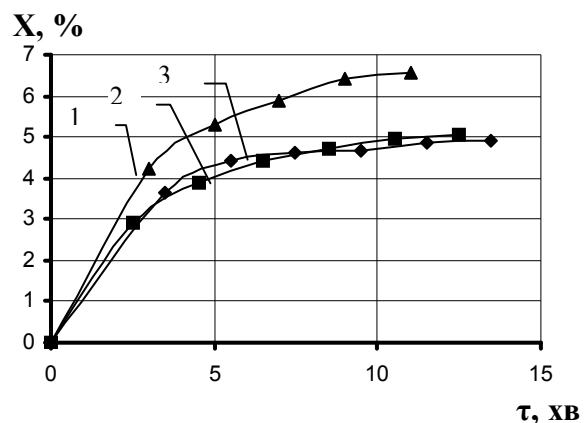


Рис. 17. Вплив характеру екстрагенту в МХ-полі (режим кипіння): 1 – спирт; 2 – нефрас; 3 – гексан.

Обробка результатів експериментальних досліджень включала визначення коефіцієнтів масовіддачі, безрозмірних чисел подібності Шервуда, Шмідта, енергети-

чної дії та гідромодулю. В результаті обробки даних отримано коефіцієнти критеріальних рівнянь для систем «олія кави-спирт» (5) та «олія кави-гексан» (6):

$$Sh = 0,006(Sc)^{0,33}(\Gamma)^{0,15}(Bu)^{0,71} \quad (5)$$

$$Sh = 0,01(Sc)^{0,33}(\Gamma)^{0,05}(Bu)^{0,32} \quad (6)$$

У четвертому розділі наведена інженерна методика розрахунку екстрактору періодичної дії з мікрохвильовим інтенсифікатором.

В основі алгоритму проектування екстрактору лежать наступні блок-схеми (рис.18):

- Блок-схема розрахунку теплофізичних параметрів етанолу та гексану (БС-ТФВ);
- Блок-схема розрахунку поточної концентрації олії в твердій фазі (БС-ПКОТФ);
- Блок-схема розрахунку інтенсивності масопереносу в системі «шлам кави-екстрагент» (БС - КМП);

У БС ПКОТФ поточна концентрація цільового компоненту визначається в залежності від максимального вмісту олії у твердій фазі $Y_{\max}$, % витрат шламу G , та поточної концентрації олії у екстракті X_i , %

$$C_{Y_i} = \frac{G \cdot Y_{\max} - V \cdot \rho_e \cdot X_i}{G - V \cdot \rho_e \cdot X_i} \cdot \rho_{ui} \quad (7)$$

В БС КМП ключовою процедурою є розрахунок ефективного коефіцієнту масовіддачі:

$$\beta_{ef} = \frac{Sh \cdot D}{d_c} \quad (8)$$

Число Шервуда визначається з критеріальних рівнянь (5), (6) відповідно до екстрагенту, який використовується.

В результаті реалізації схеми (рис. 18) зроблено проект експериментального екстрактора з мікрохвильовим інтенсифікатором для екстрагування олії зі шламу кави (рис. 19).

Екстрактор є установкою періодичної дії, у якій чергуються операції екстрагування та відгонки розчинника. Схему установки наведено на рис. 19.

Характеристики установки: об'єм розчинника 0,005...0,02 м³; маса шламу – 1,6...6 кг; тривалість екстрагування $\tau = 30...90$ хв; вихід олії – 17...20 % від маси сухого шламу, питома потужність мікрохвильового поля – 2,5...3 кВт/кг олії.

У режимі екстрагування до екстракційної камери 1 завантажуються шлам та екстрагент. Мікрохвильова енергія випромінюється магнетроном 2. Пари екстрагенту, що виділяються у процесі, через патрубок 3 поступають у холодильник 4, де конденсуються та повертаються через патрубок 5, підтримуючи постійний гідромодуль у екстракторі. При цьому вентиль на патрубку 6 закритий.

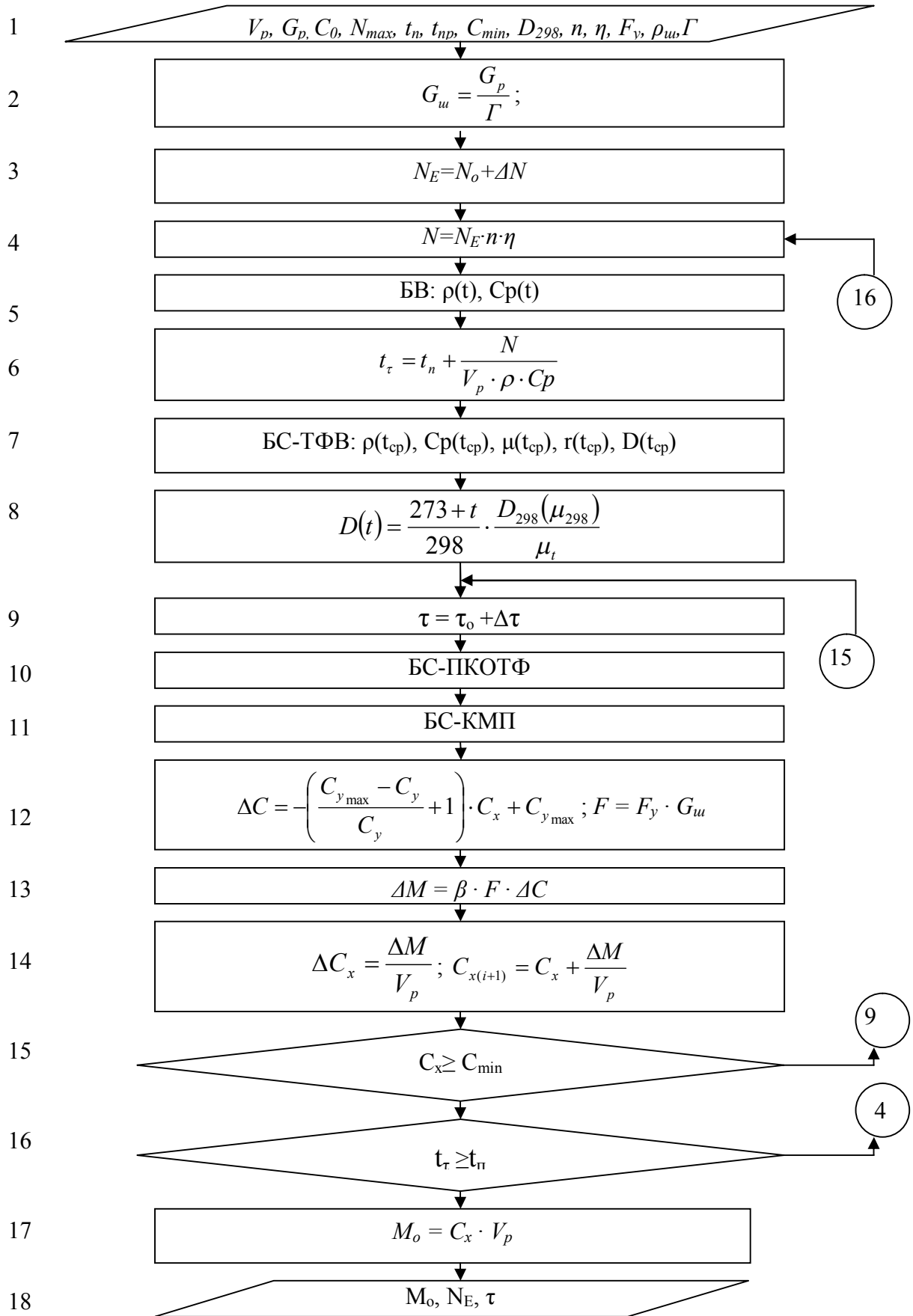


Рис. 18. Блок-схема розрахунку екстрактора з мікрохвильовим інтенсифікатором.

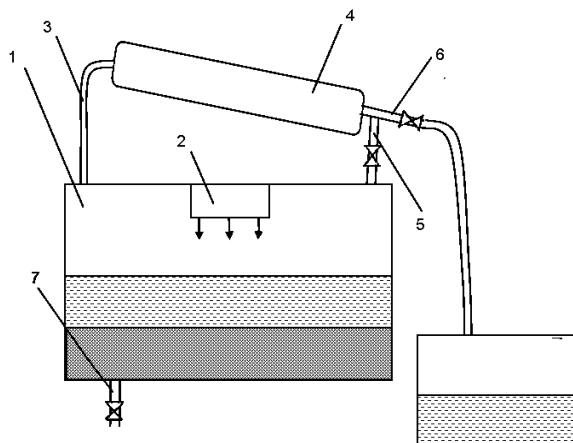


Рис. 19. Екстрактор-концентратор з мікрохвильовим генератором періодичної дії.

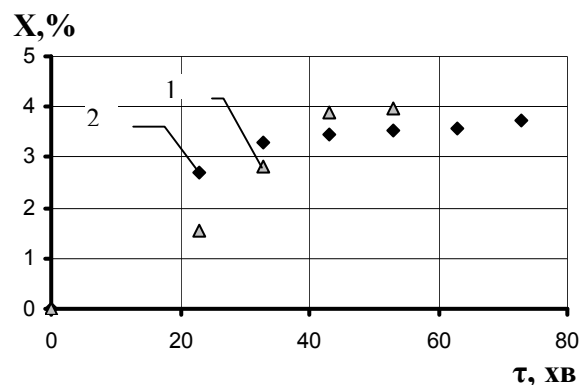


Рис. 20. Порівняння розрахункових (1) та експериментальних (2) значень концентрації олії в екстракті.

Після екстрагування екстракт фільтрується та зливається через патрубок 7. Патрубок 5 перекривається, вентиль на патрубку 6 відкривається. Зі шламу відганяється екстрагент, пари конденсуються у холодильни

ку та стікають через патрубок 6 у ємкість для екстрагенту.

Сухий шлам вивантажується з камери, до камери подається екстракт, з якого аналогічно відганяється розчинник. Готова олія стікає через патрубок 7.

Випробування зразка екстрактора проводились у режимі кипіння етанолу.

Результати порівняння експериментальних даних та розрахованих за алгоритмом (рис. 20) свідчать про адекватність розробленої інженерної методики.

Результати промислових випробувань екстрактора наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Вихід олії при екстрагуванні етанолом

(n=3, p≥0,95)

Показник	Гідромодуль	
	1:3	1:5
Маса шламу, кг	4,2	2,5
Маса екстрагенту, кг	10	10
Потужність магнетрону, Вт	3000	3000
Тривалість екстрагування, хв	32	36
Температура, °C	78,5	78,5
Питома потужність, Вт/кг	240	215
Витрати енергії, МДж/кг суміші	0,4	0,46
Тривалість відгонки, хв	53	53
Витрати електроенергії, кВт-год	4,25	4,45
Вихід олії, кг	0,57	0,37

Лінія екстрагування олії зі шламу кави (рис. 21) складається з наступного обладнання: ІЧ-сушарка 1, у якій шлам початковою вологістю 80...82% висушується до вологості 5...8%, екстрактор-концентратор 2, у якому екстрагується та концентрується олія. Сконденсований екстрагент збирається у ємкості 3, а готова олія – у ємкості 4. Екстрагент з ємкості 3 повертається до екстрактору. Сухий знежирений шлам може бути використаний в якості палива.

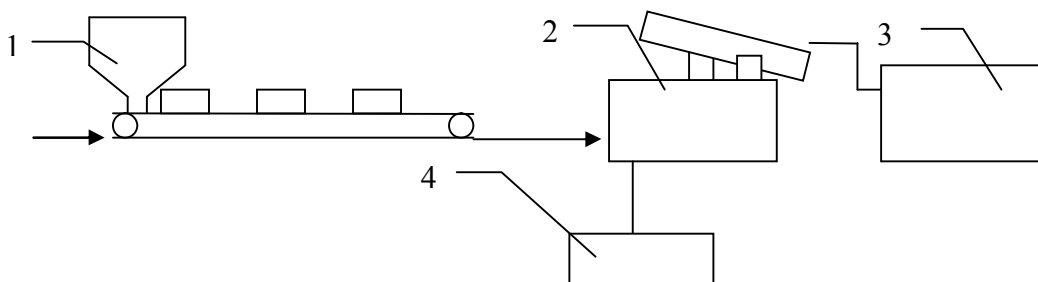


Рис. 21. Лінія виробництва олії кави.

Випробування ІЧ-сушарки. Установка складається з бункера завантаження, стрічкового конвеєра, трьох модулів ІЧ-обробки сировини. Потужність модулю ІЧ-обробки – 1,1 кВт.

%/хв

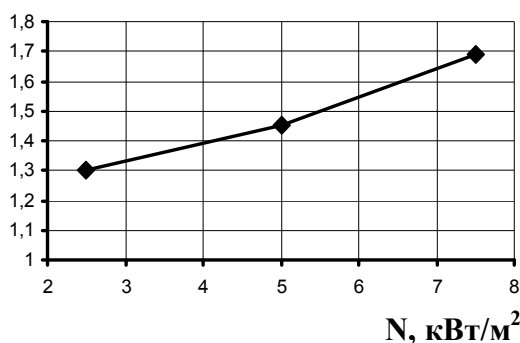


Рис. 22. вплив енергетичної потужності на швидкість ІЧ-сушіння шламу кави (завантаження 3 кг/м^2 , швидкість руху стрічки $0,13 \text{ см/с}$).

Конструкція установки передбачає можливість регулювання товщини шару, швидкості руху стрічки та потужності ІЧ-випромінювачів.

Вплив енергетичної потужності. Вивчався вплив потужності підведеної енергії на середню швидкість процесу сушіння. Досліди проводились при швидкості руху стрічки транспортеру $0,13 \text{ см/с}$ при питомому завантаженні 3 кг/м^2 на

%/хв

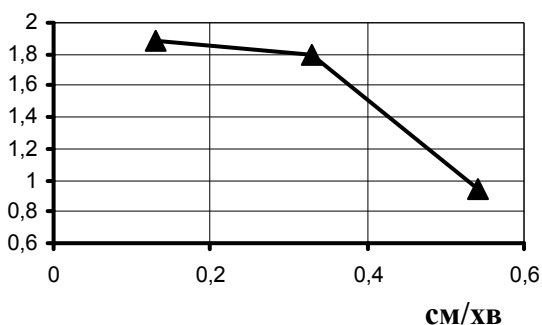


Рис. 23. Вплив швидкості руху стрічки на інтенсивність видалення вологи (завантаження $2,5 \text{ кг/м}^2$, питома потужність – 5 кВт/м^2).

%/хв

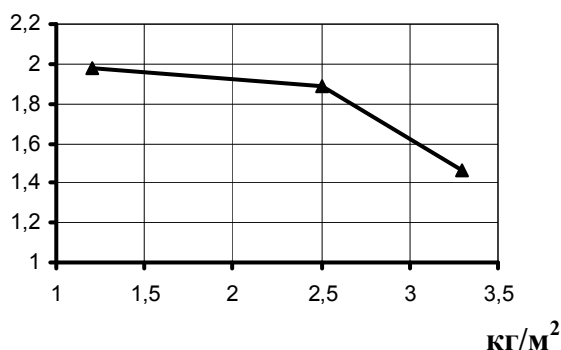


Рис. 24. Вплив питомого завантаження на швидкість видалення вологи.

одному ІЧ-модулі. Як видно з рис. 22, при збільшенні кількості підведеної енергії в три рази, швидкість видалення вологи збільшується майже у 2 рази.

Вплив швидкості руху стрічки. Швидкість руху стрічки пов'язана з тривалістю перебування шламу під дією ІЧ-проміння. Досліди проводились при питомому завантаженні $2,5 \text{ кг/м}^2$, витрати енергії складали 5 кВт/м^2 (рис. 23). Збільшення швидкості руху продукту в 3 рази, швидкість сушіння зменшується в 2 рази.

Вплив питомого завантаження. Дослідження проводились при значеннях питомого завантаження $1,2 \dots 3,3 \text{ кг/м}^2$, при швидкості руху продукту $0,13 \text{ см/с}$, при підведенні 5 кВт/м^2 енергії (рис. 24).

Різке зниження швидкості видалення вологи при завантаженні, більшому, ніж $2,5 \text{ кг/м}^2$ пояснюється тим, що ІЧ-проміння проникає у продукт на певну глибину.

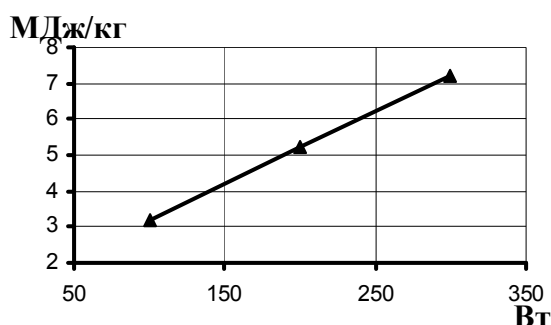


Рис. 25. Питомі енерговитрати на процес ІЧ-сушіння кавового шламу (швидкість транспортеру $0,13 \text{ см/с}$, завантаження – 3 кг/м^2).

При більшій товщині шару енергія діє не на всю масу продукту на стрічці, що веде до зниження інтенсивності процесу сушіння.

Енерговитрати на процес сушіння. Енерговитрати визначали за кількістю видаленої вологи та енергією, яку споживали ІЧ-випромінювачі.

Визначені умови, за яких енерговитрати складають $3,2 \text{ МДж/кг}$ видаленої вологи (рис. 25), в той час, як питомі енерговитрати існуючих промислових сушарок сягають не менше $4 \dots 4,5 \text{ МДж/кг}$ видаленої вологи.

ВИСНОВКИ

На основі аналітичних та експериментальних досліджень обґрунтовано схему переробки шламу кави, режими ІЧ-сушіння шламу та екстрагування олії в мікрохвильовому полі. Наукове положення роботи доведене результатами випробувань експериментального зразка екстрактора.

1. Доведено доцільність залучення мікрохвильових технологій, які ініціюють бародифузію у мікроструктурах рослинної сировини до процесу екстрагування зі шламу кави. Зменшуються дифузійні опори капілярів та спостерігається значне (до 10 разів) прискорення процесу вилучення олії зі шламу в порівнянні з традиційними технологіями. При цьому ступінь вилучення олії збільшується до 20 %.

2. В результаті експериментальних досліджень кінетики зневоложення шламу кави під дією ІЧ-випромінювання, виявлено, що швидкість сушіння як у нерухомому шарі, так і у рухомому сягає $2 \dots 2,5 \text{ %/хв}$.

3. Підтверджено суттєву інтенсифікацію процесу сушіння в умовах радіаційного підведення енергії, коли з повітря знімається функція теплоносія. Питомі енерговитрати процесу ІЧ-сушіння шламу склали $3,2 \text{ МДж/кг}$ видаленої вологи.

4. Виявлено вплив характеру екстрагенту на якість отриманої олії та на інтенсивність масопереносу у мікрохвильовому полі. Встановлено, що полярний розчинник етанол є більш ефективним екстрагентом в умовах мікрохвильового підведення енергії, ніж неполярні гексан та нефрас. Використання етанолу дозволяє отримати ароматизовану олію, а використання нефрасу та гексану – рафіновану.

5. Встановлено умови найбільш ефективного вилучення олії, а саме значення гідромодуля $1:3 - 1:5$, режим кипіння екстрагенту у мікрохвильовому полі.

6. Ключовим параметром кінетики масопереносу при екстрагуванні у мікрохвильовому полі є потужність поля, яка також зумовлює температуру процесу. Питомі енерговитрати процесу екстрагування склали $0,4 \text{ МДж/кг}$ екстракту.

7. Запропонована інженерна методика розрахунку екстракторів періодичної дії з мікрохвильовим інтенсифікатором може бути використана для комп'ютерного моделювання.

8. Результати роботи впроваджені на ПАТ «ЄННІ ФУДЗ», м. Одеса. Питомі енерговитрати розробленого екстрактора складають 7,5...12 кВт-год на 1 кг олії. Економічний ефект для підприємства за умови виробництва 1 т олії на рік складає 450...500 тис. грн.

СПИСОК ПРАЦЬ, ЩО ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ружицкая Н.В. Исследование процесса сушки кофейного шлама под действием инфракрасного излучения / С.Г. Терзиев, В.И. Саламаха, С.А. Малашевич // Наукові праці ОНАХТ, - Одеса. – 2011. – Вип. 39, Т.2. – С. 167 – 170.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.
2. Ружицька Н.В. Інтенсифікація екстрагування в технології виробництва ріпакової олії / Бандура В.М., Коляновська Л.М., Ружицька Н.В. // Вібрації в техніці та технологіях, №1(61), 2011. – С. 102 – 105.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень.
3. Ружицька Н.В. Дослідження процесу сушіння шламу кави під дією інфрачервоного випромінювання / С.А. Малашевич, Н.В. Ружицька, В.І. Саламаха, С.Г.Терзиев // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету, - Мелітополь, 2011. – Вип. 11, Т.6 – С. 153 – 158.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.
4. Ружицька Н.В. Кінетика ІЧ-сушіння шламу кави / А.А. Борщ, О.Г. Бурдо, Н.В. Ружицька, С.Г. Терзиев // Харчова наука і технологія, 2011. - №4. – С. 96 – 99.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення
5. Ружицкая Н.В. Утилизация тепловых и сырьевых ресурсов / Борщ А.А., Бурдо О.Г., Ружицкая Н.В., Терзиев С.Г. // Харчова наука і технологія, 2012. - №1. – С. 107 – 111.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.
6. Ружицкая Н.В. Энергетика пищевых нанотехнологий / Бурдо О.Г., Бандура В.Н., Ружицкая Н.В., Яровой И.И. // Інтегровані технології та енергозбереження. – №3, 2012. – С. 11 – 15.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень.
7. Ружицкая Н.В. Энергетический анализ пищевых нанотехнологий / О.Г. Бурдо, Т.Л. Макиевская, Н.В. Ружицкая, С.Г. Яровой // Наукові праці ОНАХТ, - Одеса. – 2012. – Вип. 41, Т.2. – С. 19 – 25.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації.
8. Ружицька Н.В. Кінетика екстрагування олії зі шламу кави / Н.В. Ружицька, С.Г. Терзиев // Наукові праці ТДАТУ, - Мелітополь. – 2013. – Вип. 13. – Т. 130 – 134.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.
9. Ружицька Н.В. Випробування мікрохвильових інтенсифікаторів тепломасообмінних процесів [Текст] / Н.В. Ружицька // Збірник наукових праць молодих вчених, аспірантів та студентів / ОНАХТ. – О., 2010. –Т.1 – С.111 - 112.
Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.
10. Ружицкая Н.В. Наномасштабные подходы при переработке пищевого сырья / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В. // Высокие технологии, образование, промышленность. Сборник статей одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности», - Т.3, - Санкт-Петербург, «Издательство политехнического университета», 2011 – С. 129 – 132.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації.

11. Ружицька Н.В. Ініціювання бародифузійних процесів переносу в наномасштабних елементах рослинної сировини [Текст] / О.Г. Бурдо, Н.В. Ружицька, І.І. Яровий // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», ТНТУ. – Тернопіль, 2010. – С.380 - 381.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації.

12. Ружицкая Н.В. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В. // Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011)». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 – 426.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення.

13. Ruzhitskaya N.V. Food nanotechnologies. Specificity and development directions / O. G. Burdo, V.N. Bandura, I.I. Yarovoy, N.V. Ruzhitskaya // VIII Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources” – Minsk, Belarus, September 12-15, 2011. – P. 155 – 160.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації.

14. Ружицька Н.В. Дослідження модулю стрічкової сушарки для рослинної сировини з комбінованим електромагнітним підводом енергії / Бурдо О.Г., Ружицька Н.В. Яровий І.І. // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. науково-практ. конф., 3-4 листопада 2011 р. ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2011. – С. 7 – 8.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

15. Ружицька Н.В. Дослідження процесу сушіння шламу кави під дією інфрачервоного випромінювання / Ружицька Н.В., Терзів С.Г. // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. науково-практ. конф., 3-4 листопада 2011 р. ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2011. – С. 92 – 93.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

16. Ружицька Н.В. Кінетика процесу екстрагування олії зі шламу кави / Н.В. Ружицька // Актуальні проблеми розвитку харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Тези доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 25 квітня 2012 р. : [тези у 4-х ч.] / редкол.: О.І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2012. – Ч.2. – С. 50.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення.

17. Ружицкая Н.В. Кинетика тепло- и массообменных процессов в технологии пищевых концентратов / А.А. Бориц, Н.В. Ружицкая, С.Г. Терзиев, // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену: Тезисы докладов. – Минск, 2012. – Т.2. – Ч.1. – С. 162 – 165.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення.

АНОТАЦІЯ

Ружицька Н.В. Кінетика процесів сушіння та екстрагування при утилізації шламу кави. – 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, Міністерство освіти і науки України, Одеса 2013.

Дисертаційна робота присвячена розробці обладнання для утилізації відходів виробництва розчинної кави і одержання олії кави з використанням інфрачервоного

випромінення та мікрохвильового інтенсифікатора. В ході роботи було проведено ряд досліджень процесів сушіння шламу кави в рухомому та нерухомому шарі. Визначено залежності швидкості видалення вологи зі шламу від потужності ІЧ-випромінення, завантаженням сушильної установки, швидкістю руху дифузійного середовища та продукту відносно випромінювача. Встановлено основні кінетичні характеристики процесу.

Експериментальні дослідження процесу екстрагування визначили кінетичні залежності концентрації олії від режимних параметрів та характеру екстрагенту. Встановлено, що максимальна кількість олії, що вилучається зі шламу в умовах дії мікрохвильового поля складає 20% маси шламу. Внутрішньо-, зовнішньо- та бародифузійні процеси враховуються з допомогою запропонованого в роботі ефективного коефіцієнта масовіддачі. На базі даних про вплив гідромодуля та температури на вихід олії було отримано коефіцієнти критеріального рівняння.

На основі отриманого критеріального рівняння розроблено методику розрахунку екстрактора періодичної дії з мікрохвильовим інтенсифікатором. Стендові випробування підтвердили адекватність розроблених моделей. Отримано зразки рафінованої та ароматизованої олії кави.

Результати роботи впроваджені на ПАТ «ЄННІ ФУДЗ», м. Одеса

Ключові слова: шлам кави, утилізація, сушіння, екстрагування, інтенсивність масопереносу, математична модель, мікрохвильовий інтенсифікатор.

АННОТАЦИЯ

Ружицкая Н.В. Кинетика процессов сушки и экстрагирования при утилизации кофейного шлама. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2013.

Диссертационная работа посвящена разработке оборудования для утилизации отходов производства растворимого кофе и получения кофейного масла с использованием инфракрасных технологий и микроволнового интенсификатора.

Кофейный шлам характеризуется богатым химическим составом, а кофейное масло является ценным сырьем для парфюмерно-косметической, фармацевтической и пищевой промышленности.

Выявлена необходимость предварительной сушки кофейного шлама для эффективного экстрагирования масла.

Показано, что использование инфракрасного излучения для интенсификации сушки позволяет снизить продолжительность и энергоемкость процесса, а за счет влияния микроволнового поля при экстрагировании можно получить больший выход масла при меньшей продолжительности и энергоемкости процесса, по сравнению с традиционными технологиями.

Инфракрасная сушка является одной из наиболее перспективных технологий обезвоживания. Известно, что вода характеризуется значительным поглощением во всей ИК-области спектра. При этом энергия передается непосредственно от излуча-

теля к продукту, а воздух выполняет только функцию диффузионной среды.

В ходе работы был проведен ряд исследований процессов сушки кофейного шлама в подвижном и неподвижном слое. Определены зависимости между мощностью ИК-излучения, загрузкой сушильной установки, скоростью движения диффузионной среды, скоростью движения продукта относительно излучателей и скоростью удаления влаги из шлама. Установлены основные кинетические характеристики процесса.

Проведены исследования сушки шлама в многозонной установке для ИК-сушки непрерывного действия. Определены основные характеристики установки, определены режимы при которых энергозатраты на процесс сушки составляют 3,2 МДж/кг удаленной влаги, что соответствует лучшим образцам современного сушильного оборудования.

Показано, что для экстрагирования компонентов из растительного сырья одним из перспективных направлений усовершенствования экстракционного оборудования является использование микроволновых интенсификаторов.

Процесс экстрагирования в условиях действия микроволнового поля характеризуется электродиффузионной моделью. Методом анализа размерностей была разработана структура уравнения в обобщенных переменных для расчета массообменных характеристик периодического процесса экстрагирования из пористого твердого тела в условиях действия электромагнитного поля. Для определения специфики массопереноса из растительного сырья в экстрагент в условиях возникновения бародиффузионного потока предложен эффективный коэффициент массоотдачи.

Модель процесса экстрагирования при микроволновом энергоподводе определяется зависимостью числа Шервуда от чисел Шмидта, энергетического действия и безразмерного комплекса, характеризующего соотношение твердой фазы и экстрагента. Число энергетического действия показывает соотношение между энергией излучения и энергией, необходимой для преобразования в пар всего раствора.

Экспериментальные исследования определили кинетические зависимости концентрации масла от режимных параметров и характера экстрагента. Установлено, что максимальное количества масла, извлекаемое из шлама в условиях действия микроволнового поля составляет 20% от массы шлама, что на 20% больше ранее полученных традиционными методами результатов.

Установлены зависимости концентрации масла в экстракте от температуры процесса, характера подведенной энергии, вида экстрагента, гидромодуля.

Выявлено существенное влияние характера экстрагента на кинетику процесса экстрагирования кофейного масла. Неполлярный растворитель гексан менее эффективен в микроволновом поле, поскольку не вступает во взаимодействие с ним, в то время как эффективность использования полярного этанола в условиях применения микроволнового поля значительно увеличивается. При этом качество масел, полученных при помощи гексана и этанола значительно отличается.

В результате сравнения процесса экстрагирования при традиционном нагреве и в микроволновом поле установлено, что продолжительность процесса в микроволновом поле сокращается в десятки раз.

Значительной интенсификации удалось добиться при температурах меньших чем температура кипения экстрагента.

На основании данных о влиянии гидромодуля и температуры на выход масла были получены коэффициенты критериального уравнения. Внутренне-, внешне- и бародиффузионные процессы учитываются с помощью предложенного в работе эффективного коэффициента массоотдачи.

На основе полученного критериального уравнения была разработана методика расчета экстрактора периодического действия с микроволновым интенсификатором. Для проверки адекватности предложенной методики было проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Стендовые испытания экстрактора подтвердили адекватность разработанных математических моделей. Процесс характеризуется невысокой (до 30 мин) продолжительностью и низкими энергозатратами (0,4 МДж/кг экстракта). Предложена схема линии переработки кофейного шлама, особенностью которой является проведение процессов экстрагирования и отгонки в одном аппарате.

Получены образцы рафинированного и ароматизированного кофейного масла. Ароматизированное кофейное масло отличается характерным кофейным ароматом, вкусом и интенсивной окраской.

Результаты работы внедрены на ПАО «ЭННИ ФУДЗ», г. Одесса.

Ключевые слова: кофейный шлам, утилизация, сушка, экстрагирование, интенсивность массопереноса, математическая модель, микроволновый интенсификатор.

SUMMARY

Ruzhitska N. Kinetics of coffee sludge utilization drying and extraction processes. – Manuscript.

The candidate's thesis in technical sciences, specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. – Odessa National Academy of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa.

The present thesis is devoted to the development of equipment for coffee sludge utilization using infrared radiation and microwave intensifier.

A number of researches of drying sludge in stationary and moving layer have been carried out. Moisture removal velocities dependences on IR-radiation power, drying unit load, diffusion medium and product velocities relative to radiator have been estimated. Main kinetic characteristics have been ascertained.

Extraction process experimental researches have determined kinetic relations between oil concentration and regime parameters and extractant type. It's ascertained that maximal oil amount extracted from sludge under microwave field action is 20% of sludge mass. Internal, external and barodiffusion processes are accounted by the proposed in current thesis effective mass-transfer coefficient.

The process criterial equation coefficients were received. The account method of microwave batch operation extractor is developed based on criterial equation. Benchmark tests confirmed adequacy of developed model. Samples of refined and aromatized coffee oils are received.

Keywords: coffee sludge, utilization, drying, extraction, mass-transfer intensity, mathematical model, microwave intensifier.

Підписано до друку 17.10.2013. Формат 60х84/16
Гарн. Таймс. Умов.-друк. арк. 0,9. Тираж 100
Замовл. № 471