

## ВІДГУК

доктора технічних наук, професора,  
**Зав'ялова Володимира Леонідовича**  
на дисертаційну роботу **Білого Дмитра Володимировича**  
**«Вдосконалення технологій та обладнання з переробки рослинної сировини екстракцією зрідженими газами і кріосублімаційним фракціонуванням»**  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
з галузі знань 18 – Виробництво та технології  
за спеціальністю 181 – Харчові технології

### **1. Актуальність теми.**

Сьогодні конкуренції у сфері науки, технологій та освіти визначають національну безпеку держави, рівень її економіки та життя людей. Тому виведення України на належний внутрішній і міжнародний рівень тісно пов'язано з науковим обґрунтуванням та інноваційним апаратурним оформленням технологічних процесів для поглибленого перероблення та раціонального використання сировинних ресурсів в тому числі рослинної сировини з метою отримання біологічно активних речовин.

Традиційні промислові методи виробництва, такі як дистиляція з водяною парою та екстракція органічними розчинниками, характеризуються високою енергоємністю та суттєвими технологічними обмеженнями. Термічна деструкція термолабільних комплексів при нагріванні, ризик залишкового вмісту токсичних розчинників у продукті та втрата летких ароматних сполук значно знижують біологічну цінність таких екстрактів.

Використання кріотехнологій переробки рослинної сировини, зокрема методів хладонової екстракції та кріосублімаційного фракціонування, дозволяє принципово змінити підхід до отримання функціональних харчових добавок. Впровадження таких систем вимагає глибокого вивчення кінетики масообмінних процесів, впливу кріогенних режимів на структуру біологічних матеріалів та пошуку шляхів мінімізації енерговитрат при рекуперації екстрагентів. Удосконалення технологічних схем комплексної кріопереробки вимагає розробки нових математичних моделей та оптимізації режимів роботи обладнання, що на сьогодні є недостатньо вивченим аспектом у вітчизняній харчовій інженерії. Тому представлена робота за тематикою та відповідними завданнями, що присвячена вдосконаленню технологій та обладнання з переробки рослинної сировини екстракцією зрідженими газами і кріосублімаційним фракціонуванням, є вчасною та актуальною.

Актуальність роботи доводиться також тим, що вона виконувалась у рамках тематики науково-дослідної роботи кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування Державного біотехнологічного університету.

## 2. Оцінка змісту дисертації.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить анотацію, зміст, вступ, п'ять розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У *вступі* наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульована мета, завдання, об'єкт та предмет дослідження, вказана наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, визначений особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

*Об'єктом дослідження є* процеси та технологія кріосублімаційного фракціонування та екстрагування зрідженими хладонами рослинної сировини.

*Предметом дослідження є* процеси та обладнання кріосублімаційного фракціонування та екстрагування зрідженими хладонами, рослинна сировина: амарант, лавр благородний, кмин чорний, коріандр, топінамбур, календула лікарська.

У *першому розділі* дисертації наведено критичний аналіз літературних джерел щодо стану проблеми екстрагування рослинної сировини органічного походження. Проведено порівняльний огляд традиційних методів (дистиляція, екстракція розчинниками) та сучасних підходів, що засвідчує актуальність впровадження кріотехнологій. Обґрунтовано переваги хладонової екстракції як методу, що забезпечує хімічну інертність, повне видалення розчинника, збереження кольору, аромату та біологічної цінності екстрактів. Сформульовано теоретичні передумови для комплексної переробки сировини шляхом поєднання кріосублімаційного фракціонування та екстрагування зрідженими газами.

*В розділі з інформації про апаратурне оформлення процесу доцільно виділити окремий підпункт про стан комп'ютерного та математичного моделювання гідродинаміки та масообміну відповідно до задач дисертації.*

У *другому розділі* наведено загальну характеристику об'єктів дослідження: петрушки кучерявої, топінамбура, лавра благородного, кмину чорного, календули лікарської та амаранту. Описано методики підготовки сировини (кріоподрібнення, сублімаційне сушіння) та обґрунтовано їх вплив на інтенсифікацію масообміну. Представлено обладнання для експериментальних досліджень та методики аналізу фізико-хімічних показників (газова хроматографія, спектрофотометрія, визначення числа аромату тощо). Розроблено та описано схему експериментальної установки з триступеневою кріогенною системою рекуперації розчинників.

*Разом з тим, дуже ретельно описано, що таке «петрушка», «амарант» та ін. рослинна сировина, властивість та хімічний склад. Також недоречно наводити фото морозильної камери.*

У *третьому розділі* чітко та зрозуміло поставлено задачі досліджень. Експериментально досліджено процес екстрагування біологічної сировини

зрідженими хладонами. Встановлено залежність виходу екстракту від режимних параметрів (температури 20–40 °С та тиску). Визначено енергію активації процесу та ідентифіковано близько 75% компонентів хладонових екстрактів, що підтверджує ефективність вилучення широкого спектра неполярних речовин. Підтверджено працездатність технології кріосублімаційного фракціонування для виділення фракцій з молекулярною масою до 300 а.е.м. та визначено компонентний склад отриманих сухих та водних фракцій кріосубліматів.

*Разом з тим, судячи з назви та змісту розділу він має бути як результат досліджень автора, тоді чому стільки посилань на інших авторів. Адже літогляд представлено в першому розділі?*

У *четвертому розділі* запропоновано математичну модель кінетики екстрагування, що базується на системі двох диференціальних рівнянь, які враховують змінну концентрацію на міжфазній поверхні. Отримано аналітичний розв'язок у формі рівняння кінетики, що включає визначальні числа подібності Фур'є та Біо, співвідношення об'ємів «екстрагент–сировина» та константу розподілу екстракту в розчиннику. Експериментально доведено існування оптимального режиму екстрагування, що забезпечує максимальну продуктивність за мінімальної витрати екстрагенту. Перевірка адекватності моделі за метриками RMSE та R<sup>2</sup> підтвердила її придатність для пошуку раціональних режимів промислових процесів.

*Розділ дуже інформативний, цікавий і важливий з наукової точки зору. Представлена цікава і ґрунтовна аналітика автора (рівняння (4,38-4,40)). Результати дослідів масообміну логічно зведені у таблицю 4.2. Разом з тим наведено багато математичних моделей інших авторів, які могли б бути проаналізовані в літогляді.*

У *п'ятому розділі* наведено показники безпеки хладонових екстрактів і кріосубліматів та оцінку їх органолептичних властивостей. Розроблено технологічну блок-схему комплексної кріопереробки та здійснено інженерний розрахунок азотного уловлювача, що дозволяє знизити витрати розчинника до 5% у циклі. Виконано розрахунок техніко-економічної ефективності: впровадження технології забезпечує скорочення витрат на хладон у 2 рази, зростання прибутку в 1,6–2,5 рази та скорочення періоду окупності інвестицій на 1,5–2 роки. Зауважень і побажань немає.

*Висновки* по роботі сформовані чітко, розкривають зміст отриманих результатів і показують, що автором вирішено всі завдання досліджень і досягнуто поставленої мети.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

*Список літератури* достатньо повно охоплює предметну галузь та відображає опрацювання автором значної кількості джерел.

*Додатки* до роботи містять патент України на корисну модель та акти впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво та навчальний процес, що підтверджує важливість одержаних результатів.

### **3. Мета і завдання досліджень.**

В дисертаційній роботі автором сформульована мета та завдання досліджень, що сформовані на елементах розв'язання важливої науково-прикладної проблеми розробки науково обґрунтованих підходів до вдосконалення технології та обладнання для отримання екстрактів з рослинної сировини методами екстракції у зріджених газах і кріосублімаційного фракціонування.

### **3. Наукова новизна одержаних результатів.**

Наукову новизну отриманих результатів досліджень визначають:

- теоретичне обґрунтування умов реалізації процесу кріосублімаційного фракціонування, що дозволяє прогнозувати режими селективного виділення цільових молекулярних фракцій із конденсату, а також експериментально підтверджено існування раціональних режимів фракціонування біологічної сировини;

- математичне моделювання кінетики екстрагування: вперше розроблено аналітичну модель процесу екстрагування зрідженими хладонами, яка враховує змінну в часі концентрацію речовин на міжфазній поверхні «екстрагент – частинка», довільну геометричну форму частинки сировини, співвідношення об'ємів фаз та константу розподілу фазової рівноваги;

- встановлення закономірностей масообміну: експериментально визначено енергію активації процесу (7–15 кДж/моль), яка залишається сталою в температурному діапазоні 15–40 °С, що підтверджує постійність коефіцієнта дифузії та дозволяє класифікувати екстрагування зрідженими газами як ізобарно-ізотермічний масообмінний процес;

- кількісна оцінка параметрів процесу: вперше отримано значення коефіцієнтів масообміну у середовищі хладону R406A для низки рослинних матеріалів та підтверджено високу адекватність розробленої математичної моделі з відносною похибкою експериментальних даних у межах 1–2 %;

- оптимізація технологічних параметрів: аналітично та експериментально доведено існування оптимального режиму екстрагування, що забезпечує максимальну продуктивність за виходом цільового компонента при заданих співвідношеннях об'ємів фаз та кількості циклів;

- аналітична характеристика продуктів переробки: визначено якісний та кількісний компонентний склад ліпофільних фракцій з нативною структурою біомолекул; вперше встановлено, що рідинна фракція після

кріосублімаційного фракціонування топінамбуру містить вуглеводний комплекс з концентрацією інуліну  $0,124 \pm 0,004$  г/л.

*Вважаю, що наукові результати здобувача є вагомим внеском у розвиток теорії та практики харчової інженерії, зокрема у сферу кріогенних технологій переробки біологічної сировини, та відкривають нові перспективи для промислового виробництва натуральних інгредієнтів.*

#### **4. Достовірність отриманих результатів і висновків.**

Достовірність отриманих результатів і висновків дисертаційної роботи забезпечується коректною постановкою мети та завдань дослідження, які розв'язуються послідовно із застосуванням фундаментальних положень хімічної технології, термодинаміки та теорії масообміну.

Наукова достовірність положень і рекомендацій підтверджується:

- обґрунтованістю методології: застосуванням комплексу методів, адекватних предмету дослідження, що включає як класичні методи аналізу (газова хроматографія, спектрофотометрія), так і сучасні інструменти математичного моделювання кінетики екстрагування;

- порівнянним аналізом: зіставленням теоретичних аналітичних розв'язків, отриманих шляхом моделювання, з реальними даними експериментальних досліджень на спеціалізованій установці, що дозволило підтвердити адекватність запропонованої моделі з високою точністю (відносна похибка 1–2%);

- комплексністю підходу: повнотою охоплення об'єкта дослідження — від вивчення фізико-хімічних властивостей різних видів рослинної сировини до розробки апаратно-технологічних схем та впровадження інженерних рішень у промислових умовах.

- статистичною значущістю: проведенням серії експериментальних вимірювань із подальшою статистичною обробкою даних, що забезпечує сталість та відтворюваність отриманих показників, зокрема енергії активації та масообмінних характеристик системи.

*Використання апробованих методик, сучасного програмного забезпечення для обробки даних та підтвердження ефективності технології актами впровадження на підприємствах свідчать про високий рівень достовірності висновків та їх практичну цінність для галузі.*

#### **5. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання.**

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці апаратно-технологічного комплексу та оптимізації процесів кріопереробки рослинної сировини, які дозволяють суттєво підвищити якість функціональних інгредієнтів.

Зокрема, практична цінність роботи включає:

- розробку інженерних рішень: обґрунтування та впровадження

ефективної конструкції азотного уловлювача в контурі рекуперації розчинника, що дозволило оптимізувати енерговитрати та знизити втрати хладону. Дане рішення рекомендовано до масштабування на підприємствах харчової та фармацевтичної промисловості, що спеціалізуються на випуску натуральних екстрактів;

– методики прогнозування процесів: розроблені аналітичні моделі кінетики екстрагування зрідженими хладонами, дають змогу ефективно налаштовувати промислові установки залежно від типу сировини, забезпечуючи максимальний вихід цільових фракцій при мінімальних витратах часу та екстрагенту;

– рекомендації з виробництва: визначені раціональні режими кріосублімаційного фракціонування та екстракції (температурні інтервали, співвідношення фаз, кількість циклів) успішно впроваджені у виробничі цикли на підприємствах ТОВ «М'ясний Цех» та ТОВ «Кул Фекторі».

Результати досліджень рекомендуються до використання при проектуванні нових ліній з переробки рослинної сировини, а також для модернізації існуючого обладнання з метою переходу на енергоефективні кріотехнології.

## **6. Особистий внесок здобувача.**

Вивчення кваліфікаційної роботи та опублікованих праць дає підставу погодитись, що особистий внесок дисертанта в основні положення роботи містить обґрунтування ідей і їх технологічна та конструктивна реалізація, дослідження і висновки щодо теоретичного та експериментального обґрунтування досліджуваних процесів, принципових схем та режимів експлуатації розробленої апаратури.

Слід погодитись, що здобувачем особисто здійснено обґрунтування для системного комплексного дослідження, та вдосконалення технологій та обладнання з переробки рослинної сировини екстракцією зрідженими газами і кріосублімаційним фракціонуванням.

Внесок у підготовку кожної публікації зі співавторами відображений в роботі і є визначальним. Робота виконана під керівництвом д.т.н., проф. Потапова В.О., к.т.н., доц. Петренко О.В. та є результатом самостійних досліджень Білого Д.В. У співавторстві здобувачем опубліковано статті за темою дисертації, які наведено в переліку. Отже, особистий внесок здобувача, що заявлений у вступі дисертації не викликає сумніву.

## **7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях.**

Дисертаційна робота має чітку логічну структуру, що відповідає сучасним вимогам до наукових праць. Основні теоретичні положення,

висновки та практичні рекомендації є обґрунтованими та послідовно впливають із результатів експериментальних досліджень, викладених у відповідних розділах роботи. Матеріал викладено з дотриманням принципів наукової послідовності та технічної грамотності.

**Дисертація відповідає принципам академічної доброчинності.** По всьому тексту роботи простежується виражений авторський стиль. У дисертації не виявлено використання наукових результатів інших авторів без належних посилань на відповідні джерела. Усі запозичені положення, формули, методики та дані інших дослідників супроводжуються посиланнями на першоджерела у бібліографічному списку.

Основні наукові результати, отримані здобувачем, у повному обсязі викладені в опублікованих наукових працях. Публікації достатньою мірою відображають наукову новизну та практичну цінність дисертації, а також підтверджують апробацію отриманих даних на профільних наукових заходах. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 21 наукових працях, у тому числі: 3 статті, що включено до міжнародної наукометричної бази даних Scopus; 1 стаття, що включено до переліку фахових видань України; 3 статті в іноземних виданнях; 14 тез у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій. Вимоги щодо кількості та якості публікацій виконано.

## **8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

*До першого розділу.*

1. Деякі посилання на джерела (зокрема, закордонні стандарти щодо хладонів) потребують актуалізації з урахуванням останніх редакцій екологічних протоколів.

2. В розділі з інформації про апаратурне оформлення процесу доцільно виділити окремий підпункт про стан комп'ютерного та математичного моделювання гідродинаміки та масообміну відповідно до задач дисертації.

3. Деякі частини розділу, наприклад, опис проблеми кінематичної невідповідності рушіїв трактора, викладені занадто детально, що відволікає від основного фокусу на постановці задач дослідження та аналізі конкретної проблеми.

*До другого розділу.*

4. Не наведено обґрунтування вибору діапазону температур при сублімаційному сушінні для різних видів рослинної сировини (наприклад, амаранту порівняно з топінамбуром).

*До третього розділу.*

4. В аналізі складу екстрактів (ідентифіковано ~75% компонентів) не зовсім чітко пояснено вплив решти 25% неідентифікованих сполук на якісні характеристики готового продукту.

*До четвертого розділу.*

6. У моделі кінетики екстрагування прийнято припущення про сталу константу розподілу фазової рівноваги. Було б доцільно вказати межі зміни цієї константи для різних типів сировини, оскільки вона є критичним параметром.

7. Рисунки, що ілюструють порівняння моделі з експериментальними даними, доцільно було б підписати із зазначенням конкретних значень похибки для кожної серії дослідів.

*До п'ятого розділу.*

8. При розрахунку економічної ефективності не в повному обсязі враховано капітальні витрати на придбання та монтаж азотного уловлювача, що могло б дещо скоригувати розрахунковий період окупності.

*До загальних висновків роботи.*

9. Деякі висновки (зокрема щодо порівняння компонентного складу фракцій) мають частково описовий характер і їх доцільно було б доповнити узагальненими кількісними показниками для всіх досліджених об'єктів.

Зазначені зауваження не є принциповими, істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її загальної наукової і практичної цінності.

## 9. Висновки.

Представлена дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові науково-обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка має важливе значення для галузі знань 18 – Виробництво та технології. Тема і зміст дисертації відповідають спеціальності 181 – Харчові технології.

З огляду на актуальність теми, наукову обґрунтованість положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, її наукову новизну та практичну цінність, повноту викладу результатів у фахових наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю що робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (зі змінами), порядку присудження ступеня доктора філософії затвердженого Кабінетом Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 03.05.2024 № 507), а її автор, Білий Дмитро Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 18 – Виробництво та технології за спеціальністю 181 – Харчові технології.

### Офіційний опонент:

професор кафедри процесів і апаратів харчових виробництв Національного університету харчових технологій МОН України, д.т.н., проф.



Володимир ЗАВ'ЯЛОВ