

ВІДГУК

**офіційного опонента доктора технічних наук,
професора Атаманюка Володимира Михайловича**

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 за спеціальністю 181 Харчові технології, галузі знань 18 Виробництво та технології

Актуальність теми дисертаційної роботи. Тема дисертаційної роботи Білого Д.В. є актуальною, враховуючи сучасні світові тенденції щодо підвищення якості функціональних харчових продуктів та попиту на натуральні інгредієнти з високим вмістом біологічно активних речовин. На сьогодні промислове виробництво рідких харчових добавок з рослинної сировини переважно базується на методах дистиляції з водяною парою та екстракції органічними розчинниками (гексаном, петролейним ефіром, спиртом, ацетоном тощо). Попри поширеність, ці методи мають суттєві технологічні обмеження: внаслідок впливу високих температур та тривалого термічного навантаження під час дистиляції відбувається руйнування термолабільних молекулярних комплексів, що критично знижує біологічну цінність кінцевого продукту.

Використання органічних розчинників також не є бездоганним: реакційна здатність сполук розчинників може призводити до деградації цінних компонентів рослинної сировини. Крім того, технологічний процес видалення залишків розчинників з екстракту неминуче супроводжується випаровуванням найлегших і найцінніших летких сполук, а повна очистка продукту від токсичних залишків розчинників залишається складним і витратним завданням.

Перспективним шляхом вирішення цих проблем є впровадження кріотехнологій переробки рослинної сировини. Дослідження, спрямовані на обґрунтування та оптимізацію кріогенних методів екстракції, мають вирішальне значення для збереження природного складу рослинних матеріалів та мінімізації термічної деструкції нутрієнтів. Запропонований у роботі підхід до застосування кріотехнологій є інноваційним, оскільки дає змогу максимально зберегти нативний стан термолабільних сполук, виключити використання токсичних розчинників та значно підвищити якісні показники готових харчових добавок.

Окрім технологічного аспекту, впровадження кріотехнологій сприяє підвищенню економічної ефективності підприємств харчової галузі завдяки створенню продуктів з вищою доданою вартістю, що відповідає сучасним вимогам сталого виробництва, раціонального використання природних ресурсів та забезпечення населення високоякісними харчовими продуктами..

Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних тем: НДР № 0121U114569 за напрямками «Дослідження та удосконалення процесів та обладнання для електромагнітної та холодильної обробки харчових продуктів», НДР № 0124U00044 – «Удосконалення тепло-масообмінних процесів та обладнання для холодильної й електромагнітної обробки харчової сировини», які виконувались у Державному біотехнологічному університеті, що додатково підтверджує актуальність та практичну цінність отриманих здобувачем результатів.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота Білого Д.В. викладена на 244 сторінках та складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури і додатку. Робота ілюстрована 45 таблицями та 43 рисунками. Список використаних джерел містить 326 найменувань.

Робота містить критичний огляд джерел літератури за темою дисертації та великий об'єм експериментального матеріалу, який одержаний з використанням стандартних та апробованих методів досліджень.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, показано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також подано дані про апробацію, публікації та особистий внесок дисертанта у проведених дослідженнях.

У першому розділі проведено критичний аналіз джерел літератури, присвячених основним принципам та особливостям методів екстрагування рослинної сировини органічного походження. Проведено порівняльний огляд традиційних і сучасних технологій, з визначенням їх переваг та недоліків. Обґрунтовано вибір хладонової екстракції як найбільш перспективного методу вилучення ліпідних фракцій пряно-ароматичної сировини, що забезпечує збереження біологічної цінності, кольору, аромату та смакових властивостей продукту. Проаналізовано фізико-хімічні характеристики хладонів та принципи роботи промислового обладнання. Обґрунтовано вибір сублімаційного сушіння як ефективного підготовчого етапу та кріосублімаційного фракціонування як методу, що дає змогу досягти комплексної переробки сировини з отриманням цільових твердих та рідких фракцій.

У другому розділі наведено загальну характеристику об'єктів дослідження: петрушки кучерявої, топінамбура, лавра благородного, кмину чорного, календули лікарської та амаранту. Описано методики підготовки сировини до комплексної переробки, зокрема кріоподрібнення та сублімаційного сушіння, а також їх вплив на ефективність подальшого екстрагування. Детально

представлено обладнання та методики проведення експериментальних досліджень процесів кріосублімаційного фракціонування та екстрагування зрідженими хладонами. Описано сучасні аналітичні методи визначення фізико-хімічних показників (газова хроматографія, спектрофотометрія, визначення числа аромату тощо), які забезпечили високу точність отриманих даних.

У третьому розділі експериментально досліджено процес екстрагування на установці з триступеневою кріогенною системою рекуперації розчинників. Показано вплив режимів процесу (температури та тиску) на вихід екстракту та визначено енергію активації процесу. Проведено детальний аналіз складу ліпідних фракцій, ідентифіковано приблизно 75% компонентів, що підтверджує здатність методу вилучати широкий спектр неполярних речовин. Теоретично досліджено та експериментально підтверджено працездатність технології кріосублімаційного фракціонування для виділення цінних фракцій із молекулярною масою до 300 а.е.м., а також визначено компонентний склад отриманих сухих та водних фракцій кріосубліматів.

У четвертому розділі запропоновано математичну модель кінетики екстрагування у вигляді системи диференціальних рівнянь, яка враховує змінну концентрацію речовин на міжфазній поверхні. Отримано аналітичний розв'язок рівняння кінетики, що включає визначальні масообмінні числа подібності (Фур'є, Біо), співвідношення об'ємів «екстрагент–сировина» та константу розподілу фазової рівноваги. Аналітично визначено та експериментально підтверджено існування оптимального режиму екстрагування, що забезпечує максимальну продуктивність за мінімальної витрати екстрагенту. Проведено перевірку адекватності моделі, що дає змогу використовувати її для прогнозування та оптимізації промислових процесів екстракції.

У п'ятому розділі надано оцінку показників безпеки, органолептичних та фізико-хімічних властивостей отриманих хладонових екстрактів і кріосубліматів. Розроблено технологічну блок-схему комплексної кріопереробки рослинної сировини. Виконано інженерний розрахунок установки для хладонової екстракції з впровадженням азотного уловлювача, що дає змогу підвищити ефективність процесу та суттєво знизити енерговитрати. Проведено розрахунок економічної ефективності, результати якого підтверджують технологічну доцільність та комерційну привабливість впровадження запропонованих методів кріопереробки у харчовій, косметичній та фармацевтичній галузях.

Отримані результати підтвердили, що впровадження розробленої технології комплексної кріопереробки рослинної сировини, яка поєднує кріосублімаційне фракціонування та екстрагування зрідженими хладонами, є не

лише економічно вигідним, але й технологічно доцільним рішенням для промислових масштабів. Запропонований підхід дає змогу перетворювати сировину на високоякісні багатокомпонентні суміші, мінімізуючи втрати біологічно активних речовин та забезпечуючи екологічну безпеку виробництва.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи є коректно обґрунтованими та базуються на фундаментальних закономірностях процесів масоперенесення та термодинаміки складних систем. Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням апробованих методик аналізу фізико-хімічних характеристик рослинної сировини та екстрактів, зокрема методів газової хроматографії та спектрофотометрії, які забезпечили високу точність ідентифікації компонентного складу. Для системного опрацювання, статистичної обробки та узагальнення великих масивів експериментальних даних було використано сучасне програмне забезпечення: PTC MathCAD, MS Excel та мову програмування Python. Крім того, експериментальні дослідження підтверджені зіставленням розрахункових даних із результатами, отриманими на спеціалізованій установці з екстракції зрідженими хладонами в умовах, наближених до промислових. Достовірність і обґрунтованість одержаних результатів також підтверджується їх апробацією на міжнародних конференціях (2019–2025 рр.).

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично обґрунтовано умови реалізації кріосублімаційного фракціонування, що дає змогу прогнозувати режими селективного виділення певних молекулярних фракцій з конденсату в процесі сублімації та експериментально підтверджено існування такого раціонального режиму;
- експериментально визначено енергію активації процесу екстракції, яка лежить в межах від 7 до 15 кДж/моль та залишається сталою у температурному діапазоні 15-40°C, що свідчить про сталість коефіцієнта дифузії та дає змогу віднести процес екстрагування зрідженими газами до класичного ізобарно-ізотермічного масообмінного процесу;
- Вперше розроблено аналітичну модель процесу екстрагування зрідженими хладонами, яка враховує змінну в часі концентрацію на міжфазній поверхні екстрагент-частинка, довільну геометричну форму частинки, задане співвідношення об'ємів екстрагент – сировина та константу розподілу фазової рівноваги системи;
- підтверджено адекватність розробленої моделі, яка описує експериментальні данні кінетики екстрагування з відносною похибкою 1...2%. Вперше отримано значення коефіцієнтів масообміну у середовищі хладону R406A для досліджених рослинних матеріалів;

- вперше аналітично та експериментально підтверджено існування оптимального режиму екстрагування зрідженими газами, який забезпечує максимальну продуктивність за виходом цільового компонента за певних співвідношень об'ємів розчинник – сировина та кількості циклів процесу екстракції;
- визначено компонентний склад ліпофільних компонентів з нативною структурою найбільш цінних біомолекул та число аромату хладонових екстрактів;
- вперше встановлено, що рідинна фракція отримана в процесі кріосублімаційного фракціонування топінамбуру містить вуглеводний комплекс з концентрацією $0,124 \pm 0,004$ г/л, що підтверджує більш ефективне вилучення інуліну з сировини.

Практична значимість одержаних результатів дисертаційної роботи.

Узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень процесу кріопереробки рослинної сировини дало змогу розробити апаратно-технологічну схему, яка доводить високу ефективність поєднання кріосублімаційного фракціонування та хладонової екстракції для повного вилучення гідрофільних і ліпофільних компонентів. Отримані дані дають змогу визначити оптимальні технологічні режими, що забезпечують максимальну продуктивність за умови збереження високої якості кінцевого продукту: розмір частинок сировини 200–300 мкм, температура 20–40 °С, співвідношення розчинник–сировина 1,5/1–2,8/1, тривалість екстракції 40–60 хв під час 3–4 циклів.

Розроблені методики та інженерні рішення, зокрема впровадження азотного уловлювача в контурі рекуперації розчинника, дають змогу знизити втрати хладону до 5% у кожному циклі. Це суттєво зменшує енергетичні витрати та підвищує екологічну безпеку виробництва. Отримані результати дають змогу прогнозувати наступні економічні показники – технологія дає змогу скоротити витрати на хладон щонайменше у 2 рази, підвищити прибутковість виробництва в 1,6–2,5 рази та скоротити період окупності інвестицій на 1,5–2 роки.

Запропоновані розробки можуть бути ефективно використані на реальному виробництві для оптимізації процесів екстракції та фракціонування. Завдяки прогнозуванню параметрів процесу можна ефективно налаштовувати промислові установки, що дає змогу знижувати собівартість продукції, підвищувати продуктивність та зменшувати витрати на обробку сировини. Такі підходи можуть бути застосовані на підприємствах харчової, косметичної та фармацевтичної промисловості, що сприяє поліпшенню технологічних процесів та раціональному використанню ресурсів.

Практична значимість дисертаційної роботи підтверджена актами впровадження у виробництво на підприємствах ТОВ «М'ясний Цех», ТОВ «Кул

Фекторі», а також актом впровадження в навчальний процес Державного біотехнологічного університету.

Повнота викладення основних результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні результати досліджень опубліковані у 21 наукових працях із них: 3 індексуються у наукометричних базах даних Scopus, 1 – у фахових виданнях України, 3 – в іноземних, 14 публікацій тез доповідей на всеукраїнських та міжнародних конференціях, і 1 патент України на корисну модель.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації:

1. У розділі 3 ідентифіковано приблизно 75% компонентів хладонових екстрактів. Бажано було б детальніше обґрунтувати природу та властивості решти 25% неідентифікованих сполук, а також пояснити, чи впливають вони на органолептичні та безпекові характеристики кінцевого продукту.

2. У розділі 4 запропонована модель кінетики екстрагування яка базується на системі диференціальних рівнянь. Однак, під час опису верифікації моделі доцільно було б навести порівняльний аналіз похибок для різних видів сировини, оскільки фізико-хімічні властивості об'єктів дослідження (від петрушки до амаранту) суттєво відрізняються.

3. У розділі 4 під час розрахунку економічної ефективності в п'ятому розділі основна увага приділена ефективності азотного уловлювача та скороченню витрат розчинника. Доцільно було б також оцінити вплив енерговитрат на процес кріосублімаційного фракціонування під час переходу від лабораторної установки до промислового масштабу.

4. У тексті зазначено, що розмір частинок сировини після кріоподрібнення становить від 10 до 500 мкм, проте у практичних рекомендаціях оптимальним визначено розмір 200...300 мкм. З дисертації не зовсім зрозуміло, як саме надмірне подрібнення (менше 100 мкм) впливає на гідродинамічний опір шару сировини в екстракторі та чи не виникає через це каламутність екстракту.

5. У розділі 3 та 4 для опису процесів використовуються терміни «кріосублімаційне фракціонування» та «екстрагування зрідженими хладонами». Варто було б чіткіше розмежувати внесок кожного з цих процесів у досягнення кінцевого виходу цільових компонентів під час аналізу кінетичних закономірностей.

6. Запропонована математична модель кінетики (Розділ 4) базується на припущенні, що «основний опір процесу масопередачі зосереджений всередині твердої фази». Проте під час екстракції зрідженими газами за кінцевого відношення «екстрагент-сировина» у режимі настоювання зовнішньодифузійний опір у прикордонному шарі рідини також може бути суттєвим. Чому автор знехтував наявністю зовнішнього масообміну?

Зазначені зауваження мають дискусійний характер, вони не знижують наукову і практичну цінність дисертаційної роботи і не впливають на загальну позитивну оцінку.

Висновки щодо дисертаційної роботи.

Результати аналізу дисертаційної роботи, анотації, опублікованих наукових праць дають підстави вважати, що дисертаційна робота Білого Д.В. «Вдосконалення технологій та обладнання з переробки рослинної сировини екстракцією зрідженими газами і криосублімаційним фракціонуванням» є завершеним науковим дослідженням.

За актуальністю, рівнем наукової новизни отриманих результатів, їхньою значимістю для науки та практики 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.

Професор кафедри хімічної інженерії
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., професор

Володимир АТАМАНЮК

Підпис професора Атаманюка В.М.
ЗАСВІДЧУЮ:
Вчений секретар Національного університету
«Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ