

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАКЦІЇ СОНЯШНИКОВОЇ МАКУХИ В СЕРЕДОВИЩІ CO₂

Безбах І. В.¹, д.т.н., доцент, Бандура В. М.², д.т.н., професор, Безбах С. В.¹, аспірант,
Тараненко Є. Ю.¹, аспірант, Казани В. З.¹, аспірант

¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Анотація. Зростання населення у світі та Європі, збільшення потреби в їжі та зростаюча тенденція не-м'ясного харчування, створюють умови для сталого попиту на рослинні білки. По амінокислотному складу білки соняшникового шроту перевершують інші рослинні білки і можуть використовуватися в харчових технологіях, що становить величезний практичний інтерес.

Соняшниковий шрот багатий поліфенольними сполуками, серед яких хлорогенова кислота, яка займає близько 70 % від інших поліфенолів. Хлорогенова кислота утворює комплекси з білками і її важко відокремити повною мірою.

Використання надкритичної екстракції з CO₂ соняшникової макухи обмежено.

Мета дослідження: дослідити процес надкритичної екстракції CO₂ та отримати з соняшникової макухи білковий концентрат нейтрального смаку і кольору з низьким вмістом поліфенолів.

Ядро насіння соняшника було віджато із застосуванням технології холодного віджиму (температура продукту не вище 45°C). Протестовано біомасу у вигляді подрібненої макухи (розмір частинок різних фракцій $d_4 = 1...5$ мм) та пелюсток соняшникової макухи (пелюстки до 10 см). Екстракцію проводили чистим CO₂, та з етанолом (96 %) як співрозчинником.

Досліджено кінетику при екстрагуванні соняшникової макухи в середовищі надкритичного CO₂. Отримано білковий концентрат (вміст білку 56,2...57,2 %) високої якості з нейтральним запахом та кольором. Використання низькотемпературних режимів екстрагування дає можливість зберегти нативні властивості білку.

Вміст хлорогенової кислоти в сухому залишку: при екстракції чистим CO₂ – 34 мг/100 г; при екстракції зі співрозчинником – 14 мг/100 г.

Ключові слова: білковий концентрат, надкритична екстракція, соняшникова макуха

Вступ. Зростання населення у світі та Європі, збільшення потреби в їжі та зростаюча тенденція не-м'ясного харчування, створюють умови для сталого попиту на рослинні білки.

Потреба світового ринку в білках та амінокислотах у 2013 році становила близько 7,8 мільйонів тонн на рік з очікуваним зростанням 5,5...6,0 % на рік як мінімум до 2025 року. Рослинні білки займають близько 14 % ринку, а амінокислоти – 25 %.

У 2014 році світовий ринок рослинних білків оцінювався приблизно в один мільйон тонн і \$7,7 мільярдів з очікуванням зростання до \$10 мільярдів у 2020 році. Соеві продукти домінують із 78 % ринку.

Через серйозну нестачу білка в багатьох частинах світу насіння олійних культур все ширше використовується в харчуванні людини.

Як відомо з класифікації: макуха – механічно пресоване ядро, вміст олії 7...20 %; шрот – хімічно знежирена макуха, вміст протеїну до 40 %; концентрат – шрот зі вмістом протеїну 40...80 %; ізолят – концентрат зі вмістом протеїну вище 80 % [1].

Шрот соняшнику зазвичай використовується як білкова добавка для тварин. Багаторічні дослідження соняшникового шроту показали, що по амінокислотному складу білки шроту перевершують інші рослинні білки і можуть використовуватися в харчових технологіях, що становить величезний практичний інтерес. Спроби отримання харчового білка із соняшникового шроту зіткнулися з багатьма проблемами.

По-перше, для харчових цілей з соняшника потрібно максимально видалити лушпиння, по-друге, соняшниковий шрот багатий не тільки білками, а й поліфенольними сполуками, серед яких хлорогенова кислота, яка займає близько 70 % від інших поліфенолів. Деякі фахівці відносять хлорогенову кислоту до антиживильних сполук. Хлорогенова кислота утворює комплекси з білками і її важко відокремити повною мірою. Хлорогенова кислота у лужному середовищі швидко окислюється і набуває зеленого кольору, що є першою перешкодою при отриманні харчового білку.

Процеси екстракції у парфумерній, косметичній, фармацевтичній, харчовій промисловості значною мірою залежать від розчинників, більшість з яких мають нафтове походження.

Проблеми при екстрагуванні наступні: величезне споживання енергії та значні витрати розчинників, низькі виходи цільового компоненту.

Розчинники для екстракції – переважно леткі органічні сполуки, одержані з невідновлюваних ресурсів, в основному на основі нафти, шкідливі як для здоров'я людини, так і для навколишнього середовища. Одним із таких широко використовуваних розчинників є н-гексан, продукт фракційної перегонки нафтових сумішей. Основною перевагою таких розчинників є простота виробництва та хімічні властивості. Тим не менш, гексан виробляється з викопних джерел і нещодавно був класифікований як CMR 3, що означає, що він є репротоксичною речовиною категорії 2 відповідно до Європейських директив і правилами реєстрації, оцінки, дозволу та обмеження хімічних речовин (REACH).

Проведені дослідження авторами [2] свідчать, що екстрагування олії з ріпаку в умовах мікрохвильового поля має перевагу при застосуванні в якості розчинника етилового спирту, як полярного, нетоксичного та більш безпечного (на відміну від гексану).

У роботі [3] досліджувалися можливості скорочення тривалості процесу екстракції насіння сої етанолом. Одержали більший вихід цільового компоненту, збільшилась кількість токоферолу в готовому продукті.

Тому необхідно розглядати альтернативні розчинники, такі як зріджені гази або їх комбінацію зі співрозчинниками.

Аналіз літературних даних та формулювання проблеми. Одна з проблем, яку мають вирішити інноваційні методи і технології екстрагування це максимально вилучити корисні продукти із сировини [4].

Зріджені гази є селективними екстрагентами в відношенні каротиноїдів, жирних і ефірних олій, терпеноїдів і інших з'єднань ліпофільної природи. Використовування зріджених газів дозволяє здійснювати процес без термічного впливу і зберегти в нативному стані термолабільні з'єднання, підвищити вихід цільових компонентів.

Перспективними для екстрагування компонентів з рослинної сировини є зріджені гази: діоксид вуглецю, пропан, бутан, рідкий аміак, хладони (хлорфторпохідні вуглеводнів) і ін. Зріджений діоксид вуглецю добре витягує ефірні олії і гірше жирні олії та інші гідрофобні речовини.

Хладон 11 (CCl_3F), хладон 12 (CCl_2F_2) і хладон 22 (CHClF_2) вилучають ефірні і жирні олії, каротиноїди, терпеноїди і інші природні речовини [5]. Більшість зріджених газів має властивості неполярних розчинників, хоча самі є гідрофільними з'єднаннями. Гідрофільні речовини гарно екстрагуються зрідженими газами з високою діелектричною проникністю (аміак, метил хлористий, метиленоксид і ін).

У ІТТФ НАН України розроблено установку [6] для екстрагування БАР (біологічно активних речовин) з рослинної сировини зрідженими газами. У якості екстрагента використовується хладон R12. Такий вибір екстрагента обумовлений тим, що одним з цільових продуктів екстрагування є жирні олії. Крім того, критична температура розчинення для хладону R12 достатньо низька, що дозволяє працювати на менших температурах і тисках в системі екстрагування.

У основі принципу дії експериментальної установки для вилучення БАР лежить циркуляційне екстрагування. На установці проводили екстракцію з плодів шипшини. В результаті було отримано масло шипшини.

Але в роботі не було поставлено задач по екстрагуванню з соняшнику олії та хлорогенової кислоти. Крім того для хладонів не зрозуміло, коли вони будуть відмінені чи дозволені законодавством, наскільки вони шкідливі для організму людини. Залишаються питання по масштабуванню таких установок.

Надкритичні флюїди (НКФ) є альтернативою, що добре зарекомендувала себе в порівнянні з традиційним методом екстракції органічними розчинниками [7]. Вуглекислий газ (CO_2) є найбільш широко використовуваною надкритичною рідиною, оскільки він інертний, нетоксичний, негорючий, дешевий, поширений, легко видаляється з продукту і має помірні критичні властивості (надкритична точка $T=31,1^\circ\text{C}$, $P=7,39\text{ МПа}$).

Дослідники [8] порівняли екстракти, отримані при екстракції майорану з використанням надкритичного CO_2 (50 $^\circ\text{C}$ /45 МПа) та екстракції етанолом в апараті Сокслета. Виходи екстракції склали 9,1 та 3,8 % відповідно. У надкритичному екстракті міститься 21 % ефірної олії, а в спиртовому екстракті всього 9 % летких масляних речовин.

В роботі [9] описується здатність бутанолу видаляти феноли кольору (хлорогенову і кавову кислоти) і олігосахариди зі шроту соняшнику без помітної денатурації білка. Подальше осадження білкового екстракту при pH 5,0 дало безбарвний ізолят білка (93,5 %). Амінокислотний склад соняшникового шроту, концентрату та ізоляту був подібним. Але бутанол є пожежонебезпечною та токсичною речовиною, тому використання його для екстракції в харчовій промисловості обмежене.

Пошук нових розчинників відродив інтерес до використання зріджених газів як екстракційних розчинників, таких як н-пропан [10], н-бутан [11] та диметиловий ефір [12]. Цим газам потрібен відносно низький тиск (<1 МПа), щоб залишатися в рідкому стані. Але вони є вибухонебезпечними тому використання для екстракції в харчовій промисловості обмежене.

У дослідженні [13] вивчалася надкритична CO_2 екстракція хлорогенової кислоти з ядер соняшникового насіння з використанням етанолу як співрозчинника. Визначено вплив режимних параметрів на процес. Ядра висушували (до 5 мас. %), що може призводити до додаткових витрат енергії на процес екстрагування. Авторами не проводилося попереднє механічне знежирення. Ядра подрібнювали до 0,841...0,507 мм, що може ускладнювати проходження екстрагента через шар продукту. Завдання отримати білковий концентрат та збереження нативних властивостей білка дослідниками не ставилося.

Використання надкритичної екстракції з CO_2 таких продуктів як соняшникова макуха обмежено. Але цей метод потребує подальшого розвитку, так як він: низькотемпературний, неруйнівний для білків, дозволяє частково видалити хлорогенову кислоту з соняшникової макухи.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження: дослідити процес надкритичної екстракції CO_2 та отримати з соняшникової макухи білковий концентрат нейтрального смаку і кольору з низьким вмістом поліфенолів.

Завдання:

- визначити вплив режимних параметрів на кінетику процесу надкритичної екстракції соняшникової макухи чистим CO_2 та з використанням співрозчинника (етанолу);
- оцінити вміст хлорогенової кислоти в сухому залишку.

Матеріали та методи дослідження. Ядро насіння соняшника було віджато на пресі Dulong ZYJ05 400W (Китай). Застосовувалась технологія холодного віджиму (температура продукту не вище 45°C). Було протестовано біомасу у вигляді подрібненої макухи (розмір частинок різних фракцій $d_4 = 1 \dots 5$ мм) та пелюсток соняшникової макухи (пелюстки до 10 см). Екстракцію проводили чистим CO_2 , та з етанолом (96 %) як співрозчинником. Вуглекислий газ (CO_2) чистоти 99,9% поставлено компанією GROHE (Німеччина). Експерименти виконано на лабораторній установці безперервної дії EXTRATEX (Франція) об'ємом екстрактора 25 літрів. Експерименти проводились на базі ТОВ «Потоки».

Принципова схема надкритичної екстракції CO_2 на рис. 1.

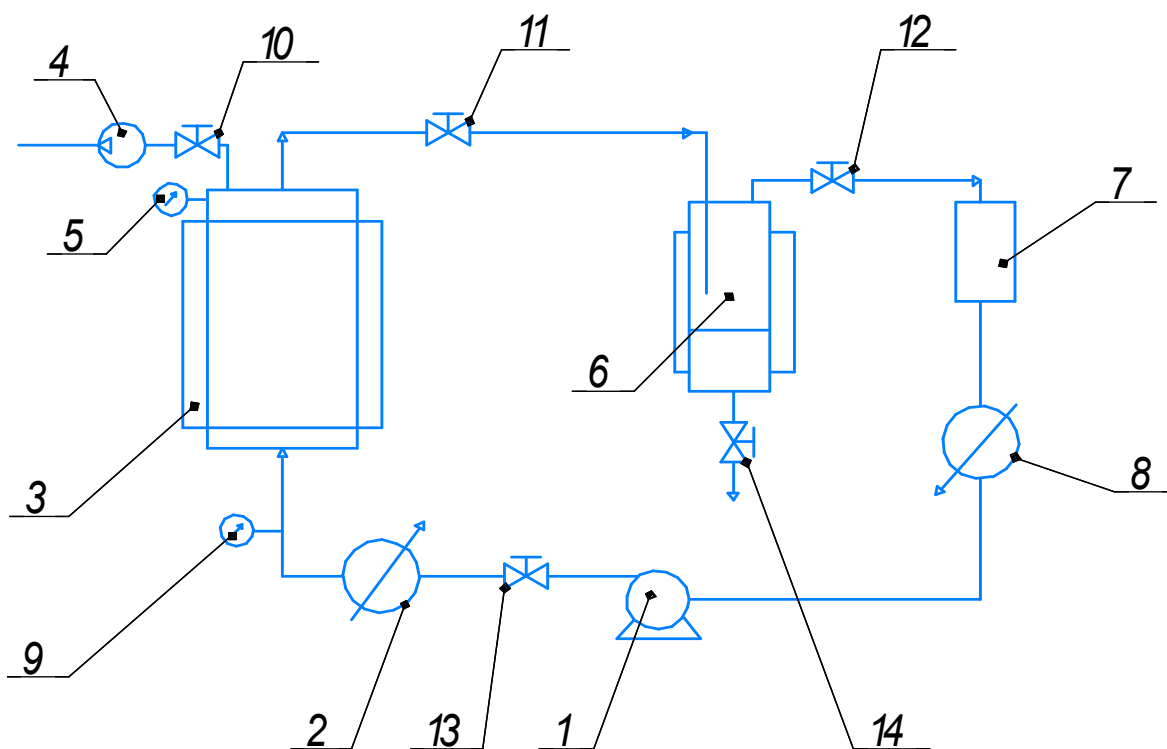


Рис. 1 – Принципова схема надкритичної екстракції CO_2

Установка складається з: компресору 1, теплообмінника 2, екстрактору 3, вакуум насоса 4, манометра 5, ресивера 6, фільтра 7, конденсатора 8, манометра 9.

До установки також входять запірні арматури (10, 11, 12, 13, 14) та трубопроводи.

Установка працювала наступним чином. Компресор 1 перекачував зріджений CO_2 у теплообмінник 2 для досягнення надкритичного стану. Екстрактор 3 заповнювався біомасою. Вакуумна система 4 застосовувалась на початку процесу екстрагування перед подачею екстрагента в екстрактор. До складу цієї системи входить вакуумний насос 4, датчик тиску 5, трубопровідна та запірні арматура.

В екстракторі надкритична фаза насичувалася розчинними сполуками з біомаси. Потім суміш екстракту і CO_2 прямувала до сепаратора 6, де суміш розділялась за рахунок підведення тепла. Газоподібний CO_2 подавався до конденсатора 8, де переходив у рідкий стан.

Циркуляція екстрагента проводилась багаторазово до виснаження сировини. У випарнику отримували концентрований розчин екстрактивних речовин. Витрати CO_2 контролювали через ротаметр (MFG Co. Ltd., Великобританія). Температуру контролювали на зовнішній поверхні екстрактору за допомогою вмонтованих мідь-константанових термопар. Експерименти без співрозчинника проводили в наступному діапазоні.

Таблиця 1

Умови експериментальних досліджень

N	Продукт	Олійність початкова, %	Олійність кінцева, %	Вміст протеїну початковий, %	Вміст протеїну кінцевий, %	Температура, °C	Тиск, МПа	Витрата CO ₂ , г/хв
1	Подрібнена макуха	7,5	1,6	53,2	56,7	50	30	50
2			2,4		56,2			200
3			1,5		57,2			500
1	Пелюстки	7,5	1,6	53,2	57	70	60	833
2			1,8		56,8	50		

Для роботи зі співрозчинником було використано установку, що включає два сепаратори (рис. 2).

Під час випробування зі співрозчинником два сепаратори працювали при однаковій температурі та тиску (6 МПа, 50 °C). Екстракт в основному збирався в першому, це була суміш олії та етанолу. Через дві години тиск у першому сепараторі підвищували до 12 МПа підтримували температуру 50°C. Мета полягла в тому, щоб залишати надкритичний стан у першому сепараторі, але при більш м'яких умовах, щоб осадити ліпіди та спробувати зберегти етанол дуже розчинний у надкритичній фазі. Другий сепаратор підтримувався в газоподібних умовах для остаточної рекуперації етанолу.

Відповідно до кольору сухого залишку екстракція здавалася закінченою після першої години. Використання співрозчинника ускладнює оцінку виходу екстракції шляхом зважування екстракту, тому кінетику процесу в цьому випадку не досліджували.



1 – екстрактор, 2 – сепаратор, 3 – сепаратор для співрозчинника, 4 – компресор, 5 – блок управління

Рис. 2 – Експериментальна установка

Кількість екстракту в відсотках розраховували як співвідношення маси сировини до маси отриманого екстракту помножено на 100 %. Проба зважувалася на лабораторних електронних вагах (ER-Plus-06, Техноваги, Україна).

Вміст сирого протеїну у сухому залишку після екстракції визначали за методом К'ельдаля, олійність за методом Сокслета. Вміст хлорогенової кислоти в сухому залишку визначали за допомогою вискоєфективної рідинної хроматографії.

Результати досліджень процесу надкритичної екстракції

Результати досліджень кінетики процесу. Залежність кількості екстракту від тривалості процесу для подрібненої макухи представлено на рис. 3.

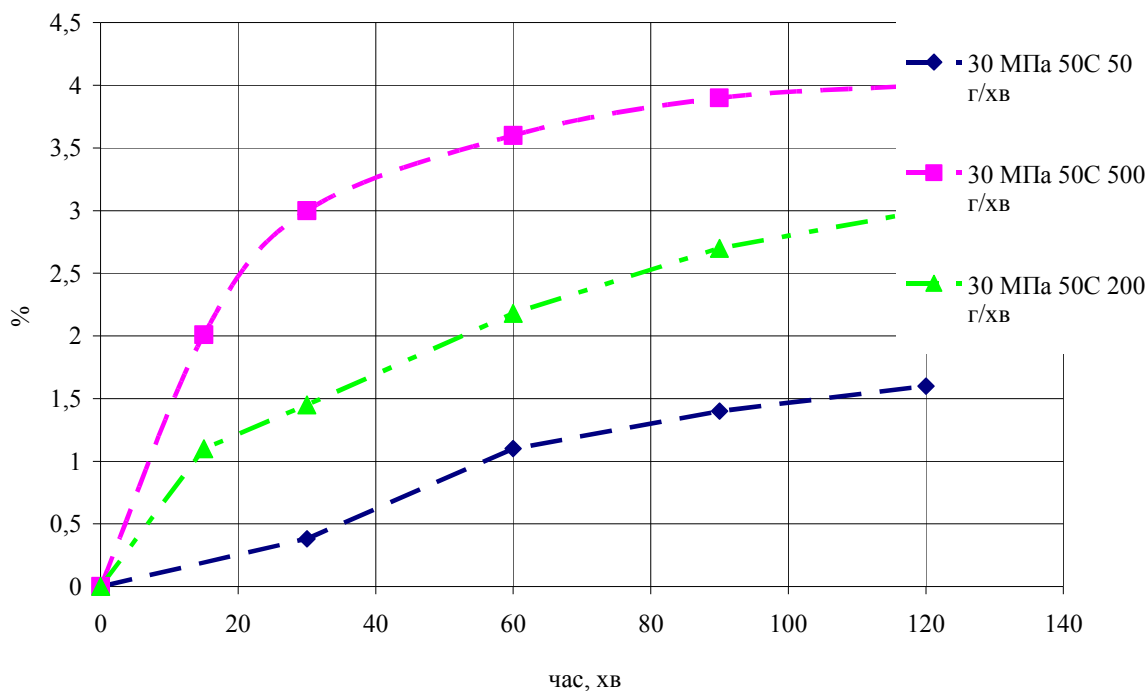


Рис. 3 – Кінетика надкритичної екстракції CO_2 подрібненої соняшникової макухи

Збільшення витрат екстрагенту призводить до суттєвого збільшення швидкості екстракції. Так збільшення витрат екстрагенту в 10 разів призводить до підвищення кількості кінцевого екстракту в 2,5 раз. Розчинність сполук соняшникової макухи у вибраних умовах демонструє ефективність процесу.

Залежність кількості екстракту від тривалості процесу для сировини у вигляді пелюсток представлено на рис. 4.

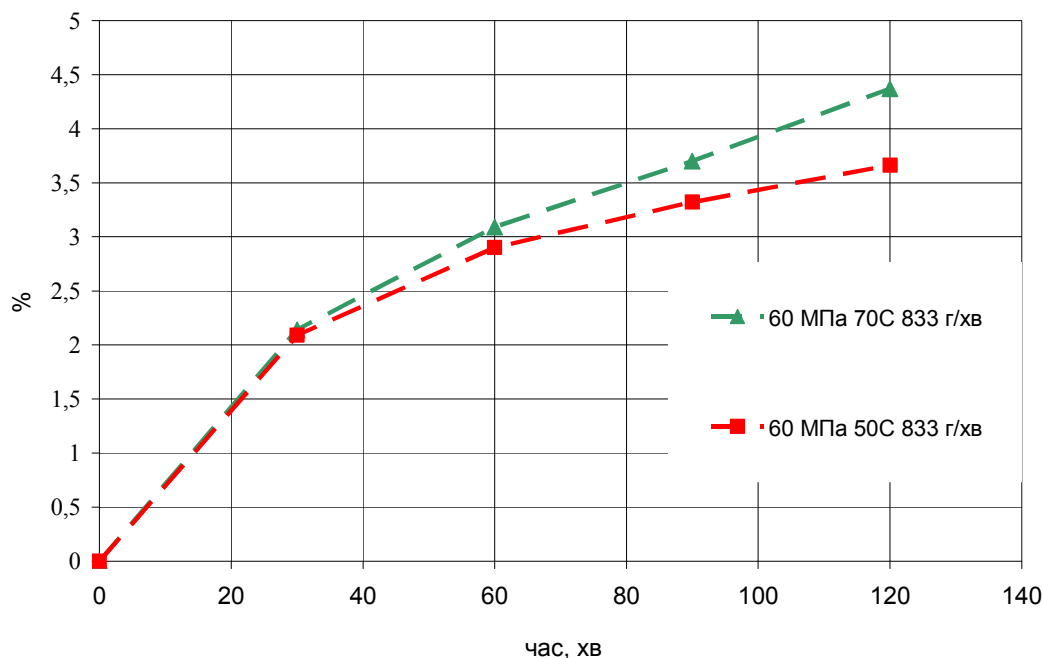


Рис. 4 – Кінетика надкритичної екстракції CO_2 макухи в пелюстках

Збільшення температури на 20°C практично не призводить до збільшення швидкості процесу. Швидкість екстракції при рівних умовах для пелюсток і подрібненої макухи практично не відрізняється (рис. 3,4).

Якісний аналіз отриманих зразків показує, що в екстракт перейшла більша частина поліфенолів (хлорогенова кислота). Екстракт являє собою рідину жовтого-зеленого відтінку рис. 5а, сухий залишок добре вибілений рис. 5б,в. Фактично сухий залишок являє собою соняшниковий білковий концентрат.



а)



б)



в)

а) екстракт; б) сухий залишок з подрібненої сировини; в) сухий залишок (пелюстки)

Рис. 5 – Продукти, отримані при екстракції CO₂ соняшникової макухи

Щоб оцінити наявність хлорогенової кислоти (яка може забарвити білковий концентрат у зелений колір після окислення), зразки сухого залишку змішували з водою, до якої додавали розчин гідроксиду натрію та витримували на протязі години.



а)



б)

а) розчин концентрату з водою; б) розчин концентрату після витримки у лужному середовищі

Рис. 6 – Якісна оцінка вмісту хлорогенової кислоти у білковому концентраті

Суміш розчину концентрату та лугу не забарвлюється у зелений колір протягом години (РН 9), що говорить про низьку концентрацію хлорогенової кислоти.

Вміст хлорогенової кислоти в сухому залишку: при екстракції чистим CO₂ – 34 мг/100 г; при екстракції зі співрозчинником – 14 мг/100 г.

Обговорення результатів дослідження процесу екстракції. Експерименти показують високу розчинність поліфенолів з використанням CO₂ і співрозчинника при 60 МПа/50°C. Якісно це можна оцінити по забарвленню екстракту (рис. 5а). Результати можливо пояснити тим, що при надкритичній екстракції CO₂ веде себе як неполярний розчинник та добре вимиває масло, в свою чергу етанол поводить себе як полярний розчинник та ефективно видаляє поліфеноли.

Екстракт при 60 МПа/70°C являє собою жовту емульсію, а залишок добре вибілений. Більш висока температура не збільшує розчинність, але є небезпечним параметром, що може пошкодити кінцевий продукт.

Вміст білку в концентраті в порівнянні з вихідною сировиною збільшується на 3,5 – 4 % (табл. 1), що пов'язано з вимиванням екстрагентом масла і поліфенолів.

Висновки. Отримано білковий концентрат (вміст білку 56,2...57,2 %) високої якості з нейтральним запахом та кольором. Використання низькотемпературних режимів екстрагування дає можливість зберегти нативні властивості білку. На відміну від експериментів [13] проведено попереднє механічне знежирення сировини, що дозволяє отримати високоякісне масло холодного віджиму. Також більший розмір частинок дозволяє уникнути додаткових гідравлічних опорів в системі.

Досліджено кінетику при екстрагуванні соняшникової макухи в середовищі надкритичного CO₂. Визначено вплив режимних параметрів, тиск, температура, витрати екстрагенту на швидкість процесу. Так збільшення витрат екстрагенту (при тиску в 30 МПа) в 10 разів призводить до підвищення кількості кінцевого екстракту в 2,5 раз.

Якісні дослідження показують низьку концентрацію хлорогенової кислоти в отриманих зразках. Суміш розчину концентрату та лугу не забарвлюється у зелений колір протягом години (РН 9). Вміст хлорогенової

кислоти в сухому залишку: при екстракції чистим CO₂ – 34мг/100 г; при екстракції зі співрозчинником – 14 мг/100 г.

References

1. Sosulski, F. W., Mccleary, C. W., & Soliman, F. S. (1972). Diffusion extraction of chlorogenic acid from sunflower kernels. *Journal of Food Science*, 37(2), 253–256.
2. Burdo, O., Bandura, V., Kolianovska, L., & Dukulis, I. (2017). Experimental research of oil extraction from canola by using microwave technology. *Engineering for Rural Development*, 16, 296–302.
3. Bandura, V., Bulgakov, V., Adamchuk, V., & Ivanovs, S. (2018). Investigation of oil extraction from the canola and soybean seeds using a microwave intensifier. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 55(2), 45–52.
4. Bandura, V., Fialkovska, L., Osadchuk, P., Levtrynskaia, Y., & Palvashova, A. (2022). Investigation of properties of sunflower and rapeseed oils obtained by the Soxhlet and microwave extraction methods. *Agraarteadus*, 33(1), 48–58.
5. Osetskiy, O. I., Sevastianov, S. S., Yevlash, V. V., Potapov, V. O., Piliugina, I. S., & Bilyi, D. V. (2023). Low-temperature extraction of lipid fractions from vegetable raw materials using liquefied freons. *Problems of Cryobiology and Cryomedicine*.
6. Grabov, L. N., Mershchiiy, V. I., Posunko, D. V., & Malysheva, A. V. (2009). Termodiffuzionnaya tekhnologiya i ustanovka izvlecheniya biologicheskii aktivnykh veshchestv iz lekarstvennogo rastitelnogo syr'ya [Thermodiffusion technology and installation for the extraction of biologically active substances from medicinal plant materials]. *Industrial Heat Engineering*, 31(3).
7. Mendiola, J. A., & Rezaei, K. (2014). Pressurized limonene as an alternative bio-solvent for the extraction of lipids from marine microorganisms. *The Journal of Supercritical Fluids*, 92, 1–7.
8. Vági, E., Simándi, B., Suhajda, A., & Héthelyi, E. (2005). Essential oil composition and antimicrobial activity of *Origanum majorana* L. extracts obtained with ethyl alcohol and supercritical carbon dioxide. *Food Research International*, 38, 51–57.
9. Sodini, G., & Canella, M. (1977). Acidic butanol removal of color-forming phenols from sunflower meal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 25(4), 872–875.
10. Zanqui, A. B., de Moraes, D. R., da Silva, C. M., Santos, J. M., Chiavelli, L. U. R., Bittencourt, P. R. S., Eberlin, M. N., Visentainer, J. V., Cardozo-Filho, L., & Matsushita, M. (2015). Subcritical extraction of *Salvia hispanica* L. oil with N-propane: Composition, purity and oxidation stability as compared to the oils obtained by conventional solvent extraction methods. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26, 282–289.
11. Bier, M. C. J., Medeiros, A. B., De Oliveira, J. S., Cocco, L. C., Da Luz Costa, J., De Carvalho, J. C., & Soccol, C. R. (2016). Liquefied gas extraction: A new method for the recovery of terpenoids from agro-industrial and forest wastes. *The Journal of Supercritical Fluids*, 110, 97–102.
12. Hoshino, R., Ogawa, M., Murakami, K., Wahyudiono, K. H., & Goto, M. (2017). Extraction of lipids from wet *Arthrospira platensis* by liquefied dimethyl ether. *Solvent Extraction Research and Development, Japan*, 24, 47–60.
13. Daraee, A., Ghoreishi, S. M., & Hedayati, A. (2019). Supercritical CO₂ extraction of chlorogenic acid from sunflower (*Helianthus annuus*) seed kernels: Modeling and optimization by response surface methodology. *The Journal of Supercritical Fluids*, 144, 19–27.

RESEARCH ON THE SUNFLOWER OIL CAKE EXTRACTION PROCESS IN A CO₂ ENVIRONMENT

¹Bezbakh I.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,

²Bandura V.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, ¹Bezbakh S.V., postgraduate student,

¹Taranenko Ye. Yu., postgraduate student, ¹Kazani V.Z., postgraduate student

¹Odesa National University of Technology, Odesa

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. The global demand for plant-based proteins is on the rise due to population growth, dietary trends favoring non-meat options, and the increasing need for sustainable food sources. Sunflower oil cake, a byproduct of oil extraction, is a promising source of proteins superior in amino acid composition to many other plant proteins. However, its high content of polyphenols, particularly chlorogenic acid, complicates its use in food technology. This compound forms complexes with proteins and is challenging to fully separate. This study investigates the application of supercritical CO₂ extraction to produce a neutral-tasting and neutral-colored protein concentrate with reduced polyphenol content. Sunflower kernels were processed using cold pressing, and the resulting oil cake was tested in different forms, including fine particles and larger flakes. Supercritical CO₂ was employed both as a pure solvent and with ethanol as a co-solvent. Key findings include the effective removal of polyphenols, notably chlorogenic acid, and the preservation of protein properties through low-temperature processing. A high-quality

protein concentrate with a neutral smell and color was obtained. Protein content in the final concentrate reached 56.2–57.2%, with chlorogenic acid levels reduced to 14–34 mg/100 g depending on the extraction method. The study highlights the potential of supercritical CO₂ as a sustainable and efficient extraction method for upgrading sunflower oil cake into a high-value food ingredient.

Keywords: protein concentrate, supercritical extraction, sunflower cake

Список використаної літератури

1. F. W. Sosulski, C. W. McCleary, F. S. Soliman Diffusion extraction of chlorogenic acid from sunflower kernels // *Journal of Food Science*. – 1972. – Vol. 37, №2. – С. 253–256.
2. Burdo, O., Bandura, V., Kolianovska, L., Dukulis, I. Experimental research of oil extraction from canola by using microwave technology // *Engineering for Rural Development*. – 2017. – Vol. 16. – С. 296–302. 16: 296–302.
3. Bandura, V., Bulgakov, V., Adamchuk, V., Ivanovs, S. Investigation of oil extraction from the canola and soybean seeds, using a microwave intensifier // *INMATEH – Agricultural Engineering*. – 2018. – Vol. 55, №2. – С. 45–52.
4. Bandura, V., Fialkovska, L., Osadchuk, P., Levtrynskaia, Y., Palvashova, A. Investigation of properties of sunflower and rapeseed oils obtained by the Soxhlet and microwave extraction methods // *Agraarteaus*. – 2022. – Vol. 33, №1. – С. 48–58
5. Osetskiy O.I., Sevastianov S.S., Yevlash V.V., Potapov V.O., Piliugina I.S., Bilyi D.V. Low-Temperature extraction of lipid fractions from vegetable raw materials using liquefied freons // *Problems of Cryobiology and Cryomedicine*. – 2023
6. Грабов Л.Н., Мерший В.И., Посулько Д.В., Малышева А.В. Термо-диффузионная технология и установка извлечения биологически активных веществ из лекарственного растительного сырья // *Промышленная теплотехника*. – 2009. – Т. 31, №3.
7. Mendiola, J. A., & Rezaei, K. (2014). Pressurized limonene as an alternative bio-solvent for the extraction of lipids from marine microorganisms. *The Journal of Supercritical Fluids*, 92, 1–7.
8. Vági, E., Simándi, B., Suhajda, A., & Héthelyi, E. (2005). Essential oil composition and antimicrobial activity of *Origanum majorana* L. extracts obtained with ethyl alcohol and supercritical carbon dioxide. *Food Research International*, 38, 51–57.
9. Sodini, G., & Canella, M. (1977). Acidic butanol removal of color-forming phenols from sunflower meal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 25(4), 872–875.
10. Zanqui, A. B., de Moraes, D. R., da Silva, C. M., Santos, J. M., Chiavelli, L. U. R., Bittencourt, P. R. S., Eberlin, M. N., Visentainer, J. V., Cardozo-Filho, L., & Matsushita, M. (2015). Subcritical extraction of *Salvia hispanica* L. oil with N-propane: Composition, purity and oxidation stability as compared to the oils obtained by conventional solvent extraction methods. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26, 282–289.
11. Bier, M. C. J., Medeiros, A. B., De Oliveira, J. S., Cocco, L. C., Da Luz Costa, J., De Carvalho, J. C., & Soccol, C. R. (2016). Liquefied gas extraction: A new method for the recovery of terpenoids from agro-industrial and forest wastes. *The Journal of Supercritical Fluids*, 110, 97–102.
12. Hoshino, R., Ogawa, M., Murakami, K., Wahyudiono, K. H., & Goto, M. (2017). Extraction of lipids from wet *Arthrospira platensis* by liquefied dimethyl ether. *Solvent Extraction Research and Development, Japan*, 24, 47–60.
13. Daraee, A., Ghoreishi, S. M., & Hedayati, A. (2019). Supercritical CO₂ extraction of chlorogenic acid from sunflower (*Helianthus annuus*) seed kernels: Modeling and optimization by response surface methodology. *The Journal of Supercritical Fluids*, 144, 19–27.

Отримано в редакцію 10.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 10.08.2024
Approved 25.09.2024