doi: https://doi.org/10.15407/visn2026.02.071

ПЕТРОВА
Жанна Олександрівна —
член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник відділу тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України

ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 30 грудня 2025 року

Доповідь присвячено питанням створення та впровадження в агропромисловому секторі сучасних енергоефективних теплоенергетичних технологій, спрямованих на зниження енергетичних витрат і підвищення якості готової продукції. Зазначено, що в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено інноваційні енергоефективні теплотехнології, промислово-технологічні лінії та обладнання для перероблення сільськогосподарської сировини з майже повним збереженням біологічно активних речовин.

Шановний Анатолію Глібовичу!
Шановні члени Президії, колеги!

В основі технологій перероблення сільськогосподарської сировини у висушені продукти лежать процеси сушіння, які значною мірою впливають як на показники енергетичних витрат, так і на якість готової продукції. Впровадження сучасних теплотехнологій на переробних підприємствах агропромислового комплексу дає змогу зменшити енерговитрати і водночас максимально зберегти біологічно активні речовини в кінцевій харчовій продукції.

Загалом сушіння використовують майже в усіх галузях промисловості: харчовій, хімічній, фармацевтичній, деревообробній, будівельній галузях, у сільському господарстві тощо. Це один із найбільш енергомістких промислових процесів, на який припадає 8—10 % загального споживання енергії у світі. Крім того, щороку під час сушіння продукуються мільярди тонн водяної пари, яка належить до парникових газів.

В Україні, попри порівняно незначну кількість сушильних установок, енерговитрати на процеси сушіння в промисловості оцінюють у середньому приблизно в 10—25 % загального споживання енергії в галузі, а в АПК — у 15—28 %. Найбільша кількість енергії витрачається під час сушіння будівельних матері-

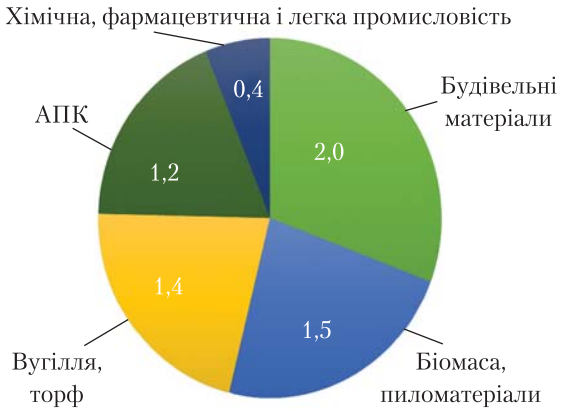

Рис. 1. Галузі української промисловості з найбільшими енергетичними витратами на процеси сушіння (витрати наведено в млн т умовного палива)

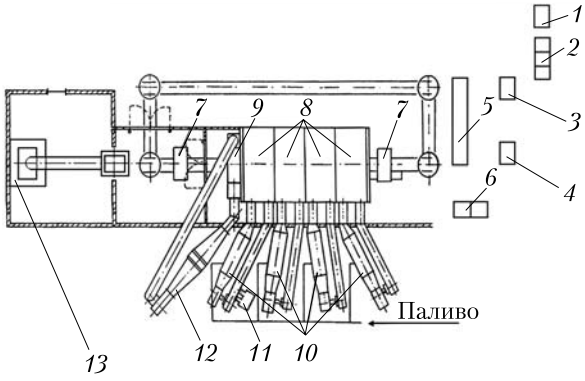

Рис. 2. Технологічна схема виробництва харчових порошків з тропічних фруктів: *1* — змішувач; *2* — мийний комплекс; *3* — машина для нарізання; *4* — гранулятор; *5* — стрічковий транспортер; *6* — пульт керування; *7* — візок; *8* — універсальна модульна сушильна установка; *9* — зона охолодження; *10* — теплогенератор з вентилятором; *11* — теплонасосна установка; *12* — установка охолодження повітря; *13* — установка диспергування, сепарації й пакування

алів, аграрної біомаси, пиломатеріалів, вугілля, торфу, агропромислової продукції (рис. 1). Тому питання енергоефективності способів сушіння є актуальною темою досліджень у сучасній науці.

Сушіння вологих матеріалів — складний процес, який одночасно є і теплотехнічним, і технологічним. Визначальну роль у ньому відіграють процеси тепломасопереносу, від яких залежить ефективність використання енергетичних ресурсів. Так, зі збільшенням температури вдвічі константа швидкості реакції зростає на три-чотири порядки, коефіцієнт дифузії — в 5 разів, а коефіцієнт температуропровідності — лише у 2 рази. Це свідчить про складність процесу сушіння, який по суті є процесом випаровування вологи. Однак безпосередньо на випаровування витрачається лише 40 % енергії, решта використовується нераціонально — втрачається з теплоносієм, вивільняється в навколишнє середовище, йде на нагрівання речовин.

В агропромисловому секторі під час перероблення сільськогосподарської продукції важливою є не лише енергоефективність самого процесу сушіння, а й якість підготовки вихідного матеріалу, тобто зниження початкової вологості завдяки механічному зневодненню, збільшення поверхні випаровування, застосування різних видів попередньої термічної обробки тощо. Неналежні технологічні режими можуть призводити не лише до втрат енергії на рівні 20—30 %, а й до зниження якості готової агропродукції.

Для вирішення цієї проблеми науковці Інституту технічної теплофізики НАН України провели низку фундаментальних і прикладних робіт з дослідження тепломасообмінних процесів під час зневоднення рослинних і тваринних матеріалів з урахуванням їхніх властивостей та режимів сушіння. Розроблено понад 60 сучасних інноваційних енергоефективних технологій сушіння, на основі яких побудовано технологічні лінії, впроваджені як в Україні, так і за кордоном.

Перші створені нами технології були орієнтовані на виробництво харчових монопорошків з яблук, картоплі, капусти. Такі порошки дуже затребувані в харчовій і кондитерській промисловості, оскільки вони є основою різноманітних наповнювачів і дають змогу частково замінювати цукор і борошно в продуктах харчування. Потім на двох спільних підприємствах у В'єтнамі ми встановили дві технологічні лінії сушіння для виробництва харчових

ISSN 1027-3239. Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr. 2026. (2)

порошків із тропічних фруктів. Використання теплового насосу в одній із секцій секційної сушильної установки (рис. 2) дозволило вперше у світі отримати в умовах високоволого тропічного клімату порошкоподібну продукцію з ананасів і бананів.

Сучасні технології хоча й дозволяють виготовляти харчові продукти з овочів та фруктів, але недостатньо зберігають корисний потенціал речовин, що входять до їхнього складу. Ці втрати пов'язані насамперед з недосконалістю технологічних процесів і необізнаністю щодо хімічного складу та лікувально-профілактичних властивостей кожної окремої рослинної сировини. Тому для вирішення цієї проблеми ми зосередили свою увагу на технологіях отримання так званих функціональних продуктів, тобто харчових продуктів, які завдяки поєднанню певних корисних інгредієнтів мають не лише поживну цінність, а й позитивний вплив на здоров'я людини в разі їх регулярного вживання. Йдеться про створення на стадії підготовки до сушіння спеціальних функціональних композицій та розроблення нової класифікації їхньої дії в організмі людини.

Наприклад, антиоксидантні композиції (горохово-морквяні, квасолево-морквяні, вівсяно-морквяні, буряково-ревеневі) блокують процес канцерогенезу, гальмують перетворення нормальних клітин на пухлинні, запобігають деградації нервової та м'язової тканин; фітоестрогенні композиції (соєво-морквяні, соєво-гарбузові, ріпаково-морквяні) знижують рівень холестерину в крові, позитивно впливають на стан артерій, поліпшують системний артеріальний тонус, зменшують ризик раку молочних залоз; фолатовмісні композиції (шпинато-яблучні, спаржево-квасолево-цибулеві, горохово-кабачкові) регулюють артеріальний тиск, підтримують процеси передачі спадкових ознак, знижують ризик вроджених дефектів невральної трубки; пребіотичні композиції (яблучно-грушева, яблучно-цитрусова, яблучно-кабачкова вичавки) стимулюють активність лімфоїдних тканин кишечника, скорочують тривалість перебігу інфекційних захворювань, підвищують біодоступність кальцію.

а *б*

Рис. 3. Зовнішній вигляд ягід лохини до (*а*) та після (*б*) обробки ІЧ-випромінюванням з одночасним конвективним сушінням

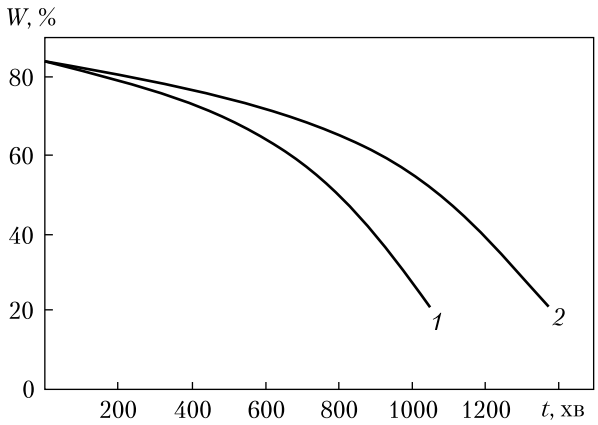

Рис. 4. Кінетика сушіння ягід лохини залежно від типу обробки: *1* — з ІЧ-обробкою на початку сушіння; *2* — з попередньою гігротермічною обробкою

Україна, як відомо, — аграрна держава. Крім зернових у нас вирощують багато плодоовочевої продукції. Зокрема, незважаючи на тривалу війну, Україна впевнено утримує восьме місце у світі з вирощування лохини. Однак навіть у розвинених країнах близько 30 % урожаю після збирання, як правило, залишається на полях, і тут є дуже великий потенціал для переробки.

Процеси сушіння рослинної сировини пов'язані з певними труднощами, оскільки під дією температури, світла, кисню повітря та інших факторів відбувається деструкція біологічно активних речовин. Одним із найскладніших об'єктів для сушіння, як не дивно, є столовий буряк. Це пов'язано з тим, що бетанін — корисна речовина з антиоксидантними властивостями, що міститься в буряку, руйну-

Рис. 5. Сушені гриби шиїтаке та порошок з них

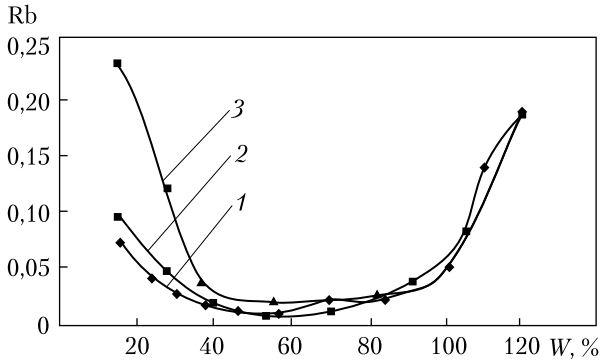

Рис. 6. Змінення критерію оптимізації сушіння Rb залежно від вологості матеріалу за різних температур: *1* — 80 °С; *2* — 100 °С; *3* — 120 °С

ється під час сушіння через вплив температури і змінення pH середовища. Ми розробили, по-перше, енергоефективний спосіб підготовки цієї сировини, замінивши теплову обробку на купажування, що потребує значно менших енерговитрат, а по-друге, технологію самого сушіння. Це дозволило вперше у світі впровадити процес сушіння столового буряку зі збереженням 95 % бетаніну.

Крім буряку є й інші продукти, які дуже складно сушити. Наприклад, згадані вище ягоди лохини, які вкриті щільним шаром воскового нальоту. До плодів із восковим нальотом належать також сливи, виноград, груші, деякі сорти яблук, але в лохини цей природний покрив найбільший. У світі для розтоплення воскового нальоту на ягодах лохини використовують зазвичай лазерні методи. Ми ж запропонували технологію підготовки сировини із застосуванням інфрачервоного випромінювання, яка на 1,5 порядку краще видаляє восковий наліт (рис. 3) і значно скорочує тривалість подальшого сушіння (рис. 4), що дозволяє на 20 % знизити енерговитрати всього процесу.

До складних об'єктів сушіння належать також гриби. У сухих грибах вміст вологи має становити 5—6 %. У разі використання традиційних технологій процес їх сушіння триває зазвичай 10—12 год, що зумовлює великі енерговитрати. Підвищення температури теплоносія скорочує час сушіння, але водночас негативно впливає на якість готової продукції через деструкцію біологічно активних речовин. На основі відпрацьованих нами енергоефективних комбінованих режимів зневоднення білкововмісних матеріалів ми розробили технологію сушіння популярних зараз у світі культивованих грибів шиїтаке, в якій весь процес триває 4 год, а безпосередньо сушіння — лише 2 год. Крім того, нам вперше у світі вдалося отримати світлий колір готового продукту, який свідчить про те, що під час сушіння не відбувається окиснення грибної сировини (рис. 5).

Функціональні рослинні порошки, особливо пребіотичні, мають високу комплексоутворювальну здатність. Пектин, взаємодіючи з іонами важких металів, утворює нерозчинний комплекс, який виводиться з організму людини. Функціональні порошки характеризуються також високою (до 80 %) радіопротекторною здатністю, яка на 10—20 % більша, ніж у чистого препарату пектину, завдяки нативній формі цієї речовини та інших складових харчових волокон.

Проведено дослідження кінетики теплообміну з визначенням питомої густини теплового потоку та критерію оптимізації сушіння (критерію Ребіндера, Rb) — співвідношення кількості теплоти, витраченої на нагрівання матеріалу, до кількості теплоти, витраченої на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу. Показано, що зменшення вологості матеріалу знижує питому густину теплового потоку в 28 разів.

З рис. 6, на якому наведено залежність критерію Rb від вологості матеріалу, видно, що на початку процесу теплота витрачається переважно на нагрівання матеріалу, потім відбува-

ISSN 1027-3239. Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr. 2026. (2)

ється інтенсивне випаровування вологи (сушіння), а далі теплота знову йде здебільшого на нагрівання матеріалу, тобто енергія витрачається нераціонально. Тому на цьому етапі процес сушіння потрібно завершувати. Ці результати підтверджують ефективність запропонованих нами ступеневих режимів сушіння.

Для визначення питомої теплоти випаровування функціональної сировини ми використали диференційний мікрокалориметр ДМКІ-1, розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України. Проведені експериментальні дослідження підтвердили теоретичне припущення про залежність питомої теплоти випаровування з паренхімних тканин рослин від композиційних складових сировини. Отримані результати і дані дериватографічних досліджень дозволяють стверджувати, що теплота випаровування в розроблених рослинних композиціях менша, ніж у вихідних компонентів сировини, тобто правильно підібрані композиції не лише стабілізують компоненти нативної сировини, а й інтенсифікують процес сушіння зі зменшенням енерговитрат на 15—20 %.

Наприклад, розроблена композиція столового буряку з ревенем порівняно з її окремими компонентами має нижчу теплоту зневоднення й вищу термостабільність, що важливо для збереження бетаніну. До того ж використання двоступеневого режиму сушіння сприяє підвищенню енергоефективності процесу. Двоступеневий режим означає, що спочатку, коли матеріал має високу вологість (86 % і вище), ми підтримуємо температуру теплоносія на рівні 100 °С, а далі, коли вологість матеріалу досягне 50 %, ми знижуємо температуру теплоносія. Це значно скорочує витрати енергії на 1 кг випареної води порівняно з одноступеневим режимом сушіння. Дослідження впливу температури теплоносія на якісні характеристики рослинної сировини показало, що максимального збереження бетаніну (до 96 %) у сумішах на основі столового буряку можна досягти за двоступеневого режиму сушіння 100/60 °С (рис. 7).

Використання теплоносія з високою температурою для інтенсифікації процесу обмежується необхідністю збереження якісних показників продукції, оскільки нагрівання впливає на ступінь регідратації і спричиняє втрати бетаніну чи каротиноїдів. Зниження коефіцієнта регідратації зі збільшенням температури пов'язане з більш значними пошкодженнями капілярів, що призводить до змінення осмотичних властивостей клітини, а також до зменшення дифузії води через поверхню під час регідратації.

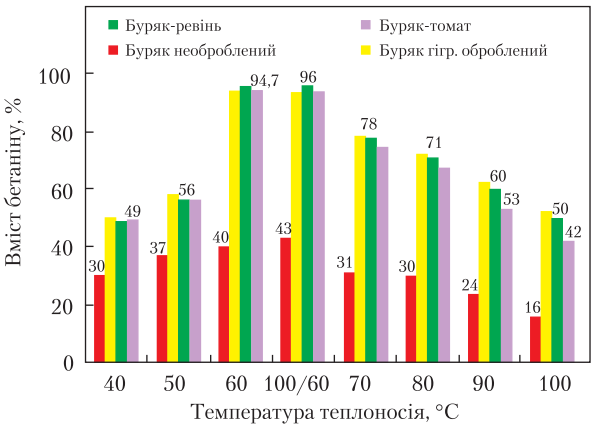

Рис. 7. Залежність вмісту бетаніну від температури теплоносія при сушінні столового буряку та композицій на його основі

Проблема забезпечення населення впродовж усього року екологічно безпечними продуктами харчування з високим вмістом вітамінів, зокрема й сушеною продукцією, має велике медично-профілактичне і соціально-економічне значення. Український ринок насичений різними видами сухих овочів і фруктів, але вони переважно всі імпортні, дорого коштують і містять цукор та хімічні інгредієнти. Через дефіцит і подорожчання енергоносіїв промислове виробництво такої продукції в Україні практично не розвивається. Налагодження промислового перероблення сільськогосподарської сировини може забезпечити українців вітчизняною сушеною продукцією з високими споживчими властивостями.

Загалом в Інституті технічної теплофізики НАН України за результатами комплексного дослідження тепломасообмінних процесів

перероблення функціональної рослинної сировини створено більш як 30 різних інноваційних енергоресурсоощадних теплотехнологій виробництва харчових порошків, на які отримано 58 патентів на винахід. Крім того, ДП «Укрметртестстандарт», який є утримувачем Головного фонду технічних умов України, затвердив 24 розроблені нами технічні умови.

Ми розробили також енергоефективні теплотехнології отримання продуктів швидкого приготування (самих лише супів — 19 видів). Ці продукти для гарячих обідів на основі функціональних порошків відповідають вимогам раціонального харчування, не містять хімічних добавок і консервантів, мають лікувально-профілактичні властивості й тривалі терміни зберігання.

Наприклад, у розробленій нами технології виробництва м'ясного борщу швидкого приготування сушене м'ясо має дуже високу відновлюваність. Причому суху суміш не обов'язково заливати окропом — температура води в діапазоні від 45 до 90 °С істотно не впливає на ступінь відновлюваності м'ясних гранул. За підсумками клінічної апробації, проведеної спільно з Інститутом геронтології ім. Д.Ф. Чеботарьова НАМН України, доведено, що наші сухі функціональні продукти швидкого приготування можна рекомендувати для поліпшення харчування в екстремальних умовах та за інтенсивного режиму праці.

Аналіз витрат на виготовлення порошку з комбінованих функціональних матеріалів засвідчив, що витрати на сировину становлять 41,7 %, на заробітну плату — 30,5%, на енергетичні ресурси — 15,4 %. Річний економічний ефект від впровадження однієї теплотехнологічної лінії для отримання функціональних порошків очікується на рівні 1 млн грн, а термін окупності, за оцінками, становитиме близько року. Впровадження однієї лінії в кожній області України може дати сукупний економічний ефект більш як 20 млн грн, який досягається завдяки використанню енергоефективних режимів підготовки сировини та сушіння.

Крім того, ми розробили сухі пайки для військовослужбовців. Зараз у ЗСУ використовують сухий пайок калорійністю 3700—4200 ккал, маса якого становить 3 кг. Наші технології дозволяють зменшити вагу пайка до 0,5 кг зі збереженням калорійності на рівні 4200 ккал. За фінансової допомоги спонсорів ми змогли виготовити й передати нашим воїнам понад 10 тис. сухих пайків і отримали від них дуже позитивні відгуки.

Для впровадження зазначених вище технологій виробництва функціональних порошків в Інституті розроблено унікальні промислово-технологічні лінії. Їхні переваги полягають у тому, що ці лінії оснащено типовим обладнанням, а специфіка пов'язана з ділянкою підготовки матеріалу до сушіння та унікальністю самої сушильної установки.

Наприклад, технологічні лінії ЛТП-1 для виробництва пребіотичних порошків з яблучних вичавок і кабачків та ЛТО-2 для виробництва фітоестрогенних порошків із сої та цибулі мають продуктивність 250 кг/год і працюють на газових теплогенераторах, а продуктивність лінії ЛТО-3 із тризонною сушаркою для виробництва фолатовмісних порошків зі спаржевої квасолі та цибулі становить 750—800 кг/год.

Для малих фермерських господарств ми створили енергоефективну камерну сушарку з комбінованим типом нагрівання теплоносія і продуктивністю до 200 кг на добу.

Одним із напрямів подальшого розвитку енергетики України є її часткова децентралізація, перехід від традиційних до альтернативних джерел енергії. З доступних в Україні нетрадиційних джерел енергії варто звернути увагу на торф, запаси якого становлять 2,04 млрд т. Завдяки тому, що торф містить досить велику кількість гумінових речовин (від 9 до 43 % залежно від родовища), його можна використовувати і як паливо, і як сировину для виробництва органічних добрив.

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено теплотехнологію перероблення торфу та біомаси на композитне паливо з екстракцією гумінових речовин продуктивністю близько 1 т/год палива та 9 т/год розчину гумату натрію. Технологія передбачає інтеграцію у виробничий цикл торфобрикетного за-

воду етапу екстракції гумінових речовин. При цьому вилучену з торфу гумусову складову компенсують додаванням рослинної біомаси з отриманням композитного біопалива.

Отже, в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено ресурсоенергоощадні способи підготовки до сушіння антиоксидантної, фітоестрогенної, фолатовмісної, пребіотичної сировини з повною заміною теплової обробки на купажування, що дозволяє зменшити енерговитрати до 50 % з максимальним збереженням біологічно активних речовин.

Уперше встановлено, що теплота випаровування води в деяких розроблених антиоксидантних рослинних композиціях менша, ніж у вихідних компонентах сировини, що дозволяє знизити енерговитратність процесу.

Запропоновано енергоефективні ступеневі режими сушіння рослинної сировини, за яких відновлюваність зневодненої маси становить 75—85 % і водночас значно знижуються витрати енергії.

Розроблено конвективну камерну сушарку з комбінованим нагріванням теплоносія, в якій витрати енергії становлять 4742 кДж/кг випареної вологи, що відповідає ефективним показникам камерних сушарок такого типу.

Створено ресурсоенергоощадні теплотехнології виробництва функціональних порошків. Ці розробки захищено патентами України, затверджено нормативну документацію на них, узгоджену з МОЗ України, а ТУ зареєстровано в базі ДП «Укрметртестстандарт».

Уперше проведено дослідження екстрагування з торфу гумінових речовин за різними технологіями. Розроблено технологію максимального вилучення з торфу гумусових і гумінових речовин зі значним зменшенням температури й часу екстракції для подальшого використання рідкої фракції як добрива, а твердого залишку — для виробництва дешевого палива.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Zhanna O. Petrova
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7385-8495

USE OF THERMAL ENERGY TECHNOLOGIES IN THE AGRICULTURAL SECTOR

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, December 30, 2025

The report is devoted to the issues of creation and introduction into the agro-industrial sector of modern energy-efficient thermal energy technologies aimed at reducing energy costs and improving the quality of finished products. It is noted that the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine has developed innovative energy-efficient heat technologies, industrial technological lines and equipment for processing agricultural raw materials with almost complete preservation of biologically active substances.

Cite this article: Petrova Zh.O. Use of thermal energy technologies in the agricultural sector (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, December 30, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr*. 2026. (2): 71—77. https://doi.org/10.15407/visn2026.02.071