

© Р.О. Дичковський¹, І.О. Мірошников¹, А.Ю. Перерва²

¹ Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

² ПАТ "Львівська вугільна компанія", с. Сілець, Україна

СИНТЕЗ ГУМАТУ КАЛІЮ ЯК СПОСІБ ЕКОЛОГІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ

R. Dychkovskiy¹, <https://orcid.org/0000-0002-3143-8940>

I. Miroshnykov¹, <https://orcid.org/0009-0005-6451-3969>

A. Pererva², <https://orcid.org/0009-0009-0542-595X>

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² PJSC "Lviv Coal Company", Silets, Ukraine

SYNTHESIS OF POTASSIUM HUMATE AS AN ECO-FRIENDLY METHOD FOR COAL-PREPARATION WASTE UTILIZATION

Мета. Розробка та оцінка екологічно безпечного методу переробки відходів вуглезбагачення у гумат калію при сумісному вилученні сполук молібдену шляхом лужної екстракції, з акцентом на підвищенні ресурсоефективності, зниженні екологічного навантаження та отриманні продукту з доданою вартістю для аграрних і технологічних застосувань.

Методика досліджень. Передбачає послідовну комплексну підготовку, сегрегацію відходів (визначення вологості, зольності та вмісту органічної речовини), проведення лужної екстракції з використанням гідроксиду калію при контрольованих режимах температури та тривалості реакції, очищення та концентрування розчину гумату, а також структурно-функціональний аналіз отриманого продукту за допомогою FTIR-спектроскопії, визначення рН, катіонно-обмінної здатності та елементного складу. Додатково здійснено мас-балансову оцінку та аналіз технологічної й екологічної ефективності процесу.

Результати дослідження. Дослідження показало, що відходи вуглезбагачення містять значну частку гумінових речовин, придатних для лужної екстракції. Визначено оптимальні умови процесу, що забезпечують високий вихід гумату калію зі стабільною структурою та типовими функціональними групами гумінових полімерів. Отриманий продукт характеризується високою розчинністю, підвищеною катіонно-обмінною здатністю та хорошою стабільністю. Крім того, запропонований процес суттєво зменшує масу відходів, що підлягають захороненню, створюючи екологічно безпечний шлях їх утилізації.

Наукова новизна полягає у встановленні залежностей розвитку маси кореневої системи, висоти надземної частини та узагальненого інтегрального коефіцієнта, що відображає ефективність стимулюючої дії на рослини вилученого гумату калію з відходів вуглезбагачення. Дослідженням встановлено ефективний та екологічно безпечний метод синтезу гумату калію з техногенних відходів, а також визначено оптимальні умови лужної екстракції, за яких досягається максимальний вихід гумату при збереженні структурної цілісності функціональних груп.

Практичне значення полягає у розробці нового методу вилучення гумату із відходів вуглезбагачення, можливості впровадження запропонованої технології на збагачувальних фабриках, що дозволяє перетворювати маловартісні техногенні відходи на комерційно цінний

продукт для агрономії, рекультивації ґрунтів та екотехнологій. Запропоновані технологічні рішення забезпечують зменшення витрат на поводження з відходами, знижують екологічні ризиків і підтримують принципи циркулярної економіки у вугільній галузі.

Ключові слова: гумат калію, відходи вуглезабачення, лужна екстракція, гумінові речовини, утилізація відходів, екологічний синтез, ресурсоефективність.

Вступ. В умовах сучасного промислового розвитку проблема ефективного та безпечного поводження з техногенними відходами набуває все більшої актуальності. Особливо це стосується відходів вуглезабачення, які накопичуються на відвалах шахт та фабрик, створюючи значне екологічне навантаження на навколишнє середовище [1]. У той же час такі відходи містять значну кількість органічних речовин, зокрема гумінових, що відкриває перспективу їх використання для створення продуктів з доданою вартістю, зокрема гумату калію, який є цінним біостимулятором росту рослин.

На сьогодні вчені та промислові розробники пропонують різні методи отримання гуматів із природної та техногенної сировини. Серед найпоширеніших підходів – традиційна лужна екстракція з торфу, компостованих органічних матеріалів або залишків сільськогосподарських культур, яка забезпечує стабільний вихід продукту та зберігає активні функціональні групи [2, 3]. Додатково активно досліджуються біохімічні та ферментаційні методи, що дозволяють підвищити специфічну біологічну активність гуматів і зменшити використання хімічних реагентів [2, 4]. Експериментальні дані свідчать, що гумати калію підвищують врожайність зернових, овочевих та декоративних культур, покращують розвиток кореневої системи та структуру ґрунту [2, 4, 5]. Вони також підвищують стійкість рослин до несприятливих факторів, таких як посуха, солонцюватість, патогени та ґрунтові шкідники [4–6]. Такі результати підтверджують наукову цінність досліджень та практичну доцільність виробництва гуматів із різних видів органічної сировини.

Сучасні дослідження демонструють, що техногенні відходи, наприклад відходи вуглезабачення, можуть слугувати альтернативним джерелом гуматів, що одночасно вирішує проблему екологічної утилізації [7]. Використання таких відходів дозволяє створювати продукт з доданою вартістю, придатний для збагачення ґрунтів і стимуляції росту різних культур [2, 8]. Оптимізація умов екстракції та очищення гуматів забезпечує збереження їх структурної цілісності та функціональної активності, що особливо важливо для біологічного ефекту [4, 9]. Крім того, процес можна інтегрувати з паралельним вилученням цінних елементів, зокрема молібденових сполук, що робить технологію більш комплексною та економічно вигідною [2, 3, 7, 10]. Результати досліджень демонструють перспективність поєднання екологічної переробки відходів із виробництвом високоефективних біостимуляторів рослин [2]. Таким чином, зростаючий науковий і практичний інтерес до таких технологій підкреслює необхідність подальших досліджень та впровадження цих підходів у промислову практику.

Однак більшість існуючих технологій мають суттєві обмеження. Зокрема, використання природних ресурсів, таких як торф, є обмеженим та неекологіч-

ним через порушення екосистем [2, 11]. Крім того, традиційні методи часто не враховують можливість комплексного вилучення цінних елементів, таких як молібденові сполуки, що можуть знаходитися у відходах [7, 10, 12]. Експериментальні та промислові підходи до переробки відходів вуглезбагачення поки що недостатньо розроблені та потребують оптимізації щодо ефективності, економічності та екологічної безпеки [2, 3, 7, 13].

Відповідно, необхідність проведення даного дослідження обумовлена потенціалом створення нової технології, яка дозволяє одночасно вилучати гумат калію та цінні мікроелементи, зокрема молібденові сполуки, із техногенних відходів. Такий підхід поєднує екологічну утилізацію відходів з виробництвом високоефективних біостимуляторів рослин, що є важливим для розвитку стійких агротехнологій та циркулярної економіки. Додатковим аргументом для дослідження є науковий прогрес у сфері аналізу гумінових речовин та визначення інтегральних показників їх ефективності. Використання комплексних методів оцінки росту рослин, розвитку кореневої системи та біомаси дозволяє кількісно оцінити дію гумату калію, що значно підвищує наукову цінність дослідження. Кінцевим оцінюючим елементом роботи є розробка інтегрального коефіцієнта ефективності, що дозволяє стандартизувати порівняння різних технологічних підходів.

Також до проведення дослідження спонукає актуальність проблеми утилізації промислових відходів вуглезбагачення, які накопичуються у значних обсягах і становлять потенційну загрозу для навколишнього середовища. Автори розглядають ці процеси у контексті сумісного видобування молібдену [3, 9, 14]. Водночас відходи містять органічні та мінеральні компоненти, що можуть бути використані для отримання цінних продуктів, зокрема гумата калію, який здатен стимулювати ріст рослин і підвищувати їхню стійкість [15]. Проведене дослідження дозволяє оцінити практичну ефективність виробництва гуматів із промислових відходів, одночасно поєднуючи екологічну безпеку, раціональне використання ресурсів та розвиток сталих агротехнологій, що робить його значущим як для науки, так і для промислового застосування.

Таким чином, проведене дослідження є актуальним та своєчасним, оскільки поєднує екологічну переробку відходів вуглезбагачення з розробкою високоефективного продукту для аграрної та промислової сфери. Відсутність комплексних технологічних рішень, що враховують одночасне отримання гумату калію та вилучення молібденових сполук, підкреслює наукову і практичну значущість даного дослідження.

2. Матеріали, методи та методика дослідження гуматів із відходів вуглезбагачення. Для дослідження були використані відходи вуглезбагачення, відібрані на відвальних ділянках шахтного виробництва одного з підприємств вуглезбагачення Західного регіону України [16]. Вихідна сировина характеризувалася наявністю органічних компонентів та мінеральних домішок, що робило її придатною для синтезу гумату калію. Для порівняльного аналізу застосовувався комерційний зразок гумату калію вітчизняного виробництва. Насіння вівса, обране як тест-об'єкт, використовувалося в якості біологічного індикато-

ра ростових реакцій рослин. Ґрунт для вирощування рослин відбирався у межах міського парку та піддавався стандартизації для забезпечення однакових умов у всіх експериментальних варіантах.

Синтез сланцевого гумату калію здійснювали шляхом обробки попередньо підготовлених відходів вуглезбагачення водним розчином калієвих сполук з подальшим фільтруванням та очищенням отриманого продукту [17]. Паралельно готувався розчин традиційного гумату для проведення компаративної оцінки [17–19]. Концентрації робочих розчинів були підібрані експериментально та стандартизовані на рівні 0,5 мл гумату на 100 мл води для процедури замочування насіння. Отриманий продукт характеризували за основними фізико-хімічними параметрами, включно з вмістом органічної речовини та показником кислотності (pH).

Експериментальна схема включала три варіанти: референтний варіант (замочування у дистильованій воді), варіант з традиційним гуматом та варіант зі сланцевим гуматом. Насіння піддавали замочуванню протягом двох годин, після чого висівали в однакові за складом і об'ємом горщики із стандартизованим ґрунтом. Спостереження за ростом і розвитком рослин проводили протягом 47 днів із реєстрацією динаміки приросту надземної та кореневої маси, кількості життєздатних рослин і загального рівня виживаності.

Результати експерименту оцінювалися за кількістю пророслих та живих рослин у горщику (N_s , г) на встановлений на день дослідження, швидкістю росту пагонів (середня висота рослин H , см), розвитку кореневої системи (довжина кореневої системи R , см) та середньої маси рослини (біомаса рослини B , г) [3, 14, 15, 20]. Порівняння між групами здійснювалося із застосуванням стандартних статистичних методів, що дозволяло визначити ефективність сланцевого гумата порівняно з традиційним продуктом і контрольним зразком. Додатково проводився аналіз впливу продукту на фізико-хімічні властивості ґрунту та оцінювалася потенційна користь для сталих агротехнологій [21].

Для оцінки ефективності кожного зразка (референтний (контрольний) зразок, традиційний гумат, сланцевий гумат) було розраховано інтегральний коефіцієнт ефективності E . Цей коефіцієнт дозволяє кількісно порівняти вплив різних типів гуматів на досліджувані параметри, забезпечуючи об'єктивну оцінку їх дії. Формула для визначення E включає суму нормалізованих показників, що характеризують біологічну активність, агрономічну ефективність та екологічну безпечність кожного зразка [3, 22].

$$E = w_1 \cdot \frac{N_s}{N_0} + w_2 \cdot \frac{H}{H_0} + w_3 \cdot \frac{R}{R_0} + w_4 \cdot \frac{B}{B_0} \quad (1)$$

де: N_0 , H_0 , R_0 , B_0 – відповідні показники контрольної групи на останній день експерименту; w_1 , w_2 , w_3 , w_4 – вагові коефіцієнти для кожного показника. Сума усіх вагових коефіцієнтів $w_i = 1$.

Для перевірки достовірності відмінностей між групами використано стандартний метод дисперсійного аналізу (ANOVA) для порівняння середніх зна-

чень показників N_s , H , R , B . Для оцінки варіативності даних застосовано коефіцієнт варіації (E_v) [22, 23].

$$E_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100, \% \quad (2)$$

де: σ – стандартне відхилення досліджуваного параметра; $\bar{x}$ – середнє арифметичне значення.

Інтегральний коефіцієнт E було використано як ефективний інструмент для комплексної оцінки дії сланцевого гумата. З його допомогою визначено загальну ефективність препарату порівняно з контрольним зразком і традиційним гуматом. Крім того, коефіцієнт дозволив встановити, який із показників росту рослин має найбільший вплив на кінцевий результат. Отримані дані підтверджують перспективність використання сланцевих відходів вуглезбагачення як сировини для створення біостимуляторів рослинного походження.

3. Результати дослідження та їх обговорення (дискусія). В експерименті оцінювалась ефективність калієвого гумату, отриманого з відходів вуглезбагачення. Для цього використовували три тест-об'єкти із 15 насінин вівса, висіяних у три окремі квіткові горщики. Перший горщик слугував референтним варіантом (контроль) і не отримував жодного добрива. У другому горщику насіння обробляли традиційним калієвим гуматом одного з вітчизняних виробників, а в третьому – експериментальним сланцевим гуматом, синтезованим із відходів вуглезбагачення.

Відповідно до методики проведення досліджень, обробка насіння проводилася шляхом замочування протягом двох годин: контроль – у дистильованій воді; традиційний і сланцевий гумати – у водних розчинах із концентрацією 0,5 мл гумату на 100 мл води, як це було встановлено методикою проведення досліджень. Ґрунт для всіх трьох горщиків був однорідним та відібраний на нейтральних теренах однієї із паркових зон міста Дніпра. На восьмий день з посадки зерен розвиток рослин йшов приблизно однаково. Ймовірно, що рослини отримували живлення переважно за рахунок запасів поживних речовин в середині самого зерна. Фотофіксацію процесу проведення дослідження наведено на рис. 1.

Представлене на рисунку дослідження присвячене оцінці динаміки ростових реакцій рослин під впливом синтезованого гумату калію. Фотофіксація, виконана на 8-й, 21-й та 47-й день експерименту, дозволяє простежити зміни морфологічних показників та встановити ключові фази відповіді рослин на введення гуматного препарату.

Як було зазначено, на 8-й день спостерігається перший прояв інгібіторних та стимуляційних властивостей речовини: рослини демонструють помірне пригнічення росту у референтному варіанті та пожвавлення росту у інших двох тест-об'єктах, що відображає початкову фазу адаптаційної реакції. На цьому етапі відбувається фізіолого-біохімічне налаштування метаболізму кореневої та надземної частини, яке часто супроводжується короточасним зниженням темпів розвитку чи, навпаки, його підвищення.

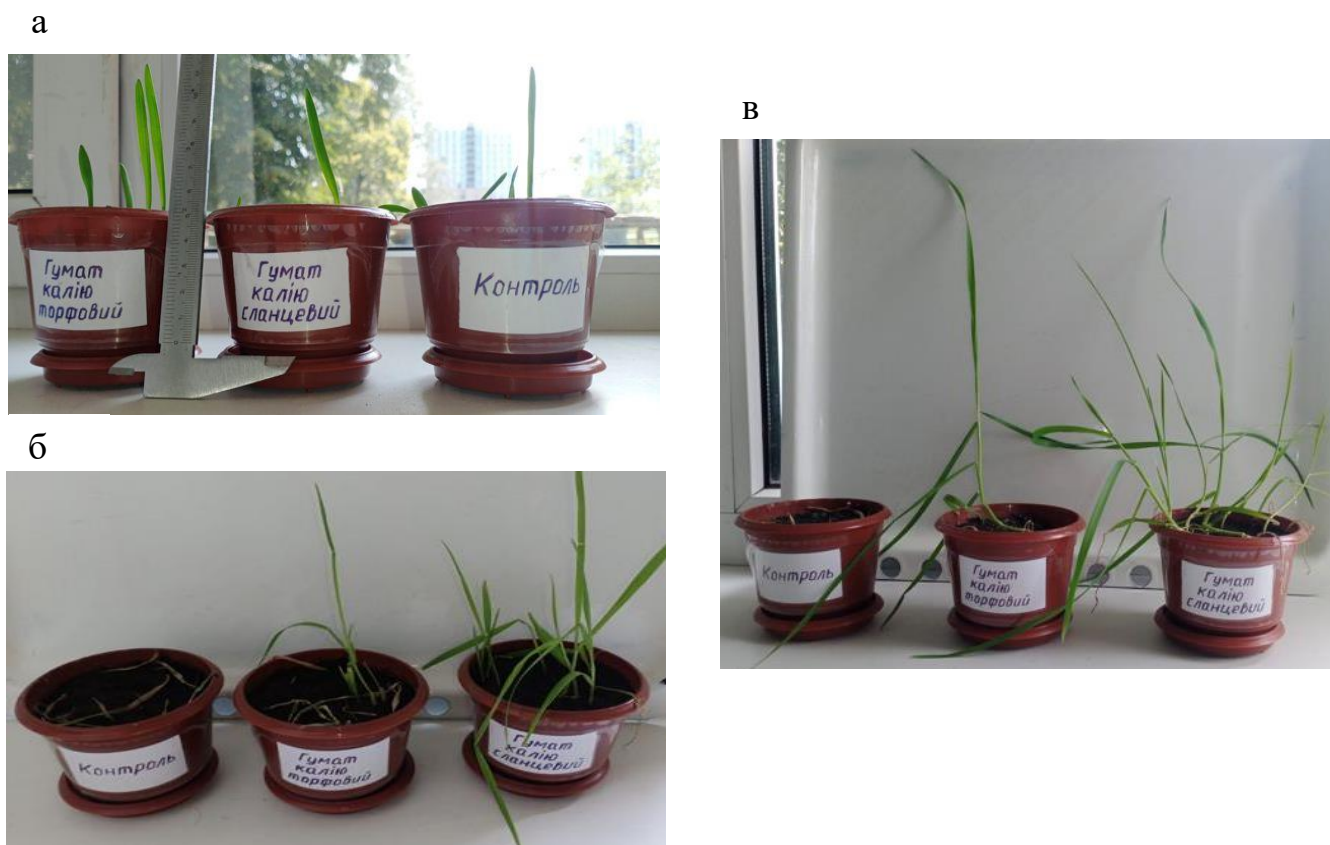


Рис. 1. Фотофіксація процесу дії отриманого гумату калію на рослини: а) 8 день досліджень (перший виражений прояв стимулюючих та інгібіторних властивостей); б) 21 день дослідження (середина процесу дослідження); в) 47 день (завершення процесу дослідження)

На 21-й день, приблизно середина проведення досліджень, рослини переходять у стадію стабілізації та відтворення дії застосованих стимуляторів ростових процесів. У середній фазі експерименту візуально фіксується нормалізація темпів розвитку, що свідчить про поступове опанування гумату калію як джерела біологічно активних речовин. На цьому етапі можна очікувати активізації синтезу фітогормонів, покращення засвоєння елементів мінерального живлення та оптимізації водного режиму.

На 47-й день, що відповідає завершенню дослідження, чітко фіксується кумулятивний ефект гумату. Рослини демонструють виражені морфологічні зміни у вигляді підвищеної біомаси, інтенсивнішого розвитку листкової поверхні та загалом покращеної життєздатності. Вказаний результат свідчить про пролонгований позитивний вплив гумату калію на фізіологічні процеси, пов'язані з ростом, фотосинтезом та трофічним балансом.

Загалом наведена серія зображень відображає типову трифазну реакцію рослин на дію гуматних препаратів: (1) первинна інгібіція і адаптація, (2) стабілізація фізіологічних процесів, (3) стимулюючий вплив у пізній фазі. Це дозволяє зробити висновок, що отриманий гумат калію проявляє комплексну біоло-

гічну активність, характерну для високоякісних гумінових речовин, і є перспективним для використання у рослинництві як регулятор росту та адаптоген.

Виходячи із описаної методики дослідження та запропонованого математичного механізму (1, 2) як базу для порівняння було взято контрольні значення показників: N_0 , H_0 , R_0 , B_0 , які умовно прирівнюємо до 1. Це дозволяє стандартизувати розрахунки та забезпечити коректне зіставлення з експериментальними даними. Для уникнення математичної помилки, пов'язаної з діленням на нуль, до всіх нульових значень було додано малу поправку - 0.1. Такий підхід забезпечує стабільність обчислень і достовірність отриманих результатів.

Тоді необхідні співвідношення для традиційного гумата:

$$\frac{N_s}{N_0} = \frac{1}{0,1} = 10, \frac{H}{H_0} = \frac{12}{0,1} = 120, \frac{R}{R_0} = \frac{5}{0,1} = 50, \frac{B}{B_0} = \frac{1,2}{0,1} = 12$$

Для отриманого сланцевого гумата:

$$\frac{N_s}{N_0} = \frac{6}{0,1} = 60, \frac{H}{H_0} = \frac{18}{0,1} = 180, \frac{R}{R_0} = \frac{8}{0,1} = 80, \frac{B}{B_0} = \frac{3,5}{0,1} = 35$$

Для встановлення вагових коефіцієнтів для кожного показника візьмемо значення на кінець проведення дослідження (таблиця 1). Дані таблиці показують абсолютні величини вплив різних типів гуматів на кількість живих рослин (N_s), висоту (H), довжину кореня (R) та біомасу (B) рослин на етапі завершення дослідження (47 день). Відповідно $w_1 = 0,3$, $w_2 = 0,25$, $w_3 = 0,2$, $w_4 = 0,25$

Таблиця 1

Абсолютні величини, що показують вплив різних типів гуматів на завершальному етапі дослідження

Група	N_s (живих рослин)	H , см	R , см	B , г
Референтний зразок	0	0	0	0
Традиційний гумат	1	12	5	1,2
Сланцевий гумат	6	18	8	3,5

Показники середньої висоти рослин H , см, та довжини кореневої системи R , см, були визначені на кожному етапі експериментального дослідження. Їх узагальнені результати наведено в таблиці 2. Вони дають можливість порівняти динаміку росту рослин за різних умов. Значення параметрів H та R відображають особливості розвитку надземної й підземної частин рослини та дозволяють простежити зміну темпів росту на всіх часових інтервалах спостереження. Представлені дані слугують основою для подальшого статистичного аналізу впливу досліджуваних факторів на розвиток рослин та основою для визначення згаданого у 2-гому підрозділі цієї статті, так званого, інтегрального коефіцієнта

E (інструмент для комплексної оцінки дії кожної стимулюючої речовини на ріст тестових рослин).

Таблиця 2

Показники середньої висоти рослин та довжини кореневої системи

День	Референтний зразок: висота H , см	Традиційний гумат H , см	Сланцевий гумат H , см	Референтний зразок: корінь R , см	Традиційний гумат R , см	Сланцевий гумат R , см
0	0	0	0	0	0	0
8	1	3	4	0,5	1,5	2
14	2	6	9	1	3	5
21	0*	8	12	0*	4	6
30	0*	10	15	0*	5	7
47	0*	12	18	0*	5	8

*Примітка: Контрольна група в кінці експерименту не має живих рослин, тому H і $R = 0$ на пізніх етапах.

Відповідно значення інтегрального коефіцієнта ефективності E занесено до таблиці 3. Ці дані узагальнюють комплексний вплив досліджуваних факторів на показники розвитку рослин. Представлені значення дозволяють порівняти результативність різних варіантів обробки в рамках експерименту.

Таблиця 3

Значення інтегрального коефіцієнта ефективності E
у часі проведення експерименту

День	E (Контрольний зразок)	E (Традиційний гумат)	E (Сланцевий гумат)
8	1,0	5,6	7,0
14	0,5	12,0	20,0
21	0	18,5	34,0
30	0	25,0	50,0
47	0	46,0	87,75

Для візуального відтворення зміни висоти надземної частини рослин побудовано графіки динаміки цього параметра у часі. Вони відображають особливості росту рослин на різних етапах експерименту. Узагальнені результати спостережень наведено на рис. 2.

Динаміка висоти надземної маси

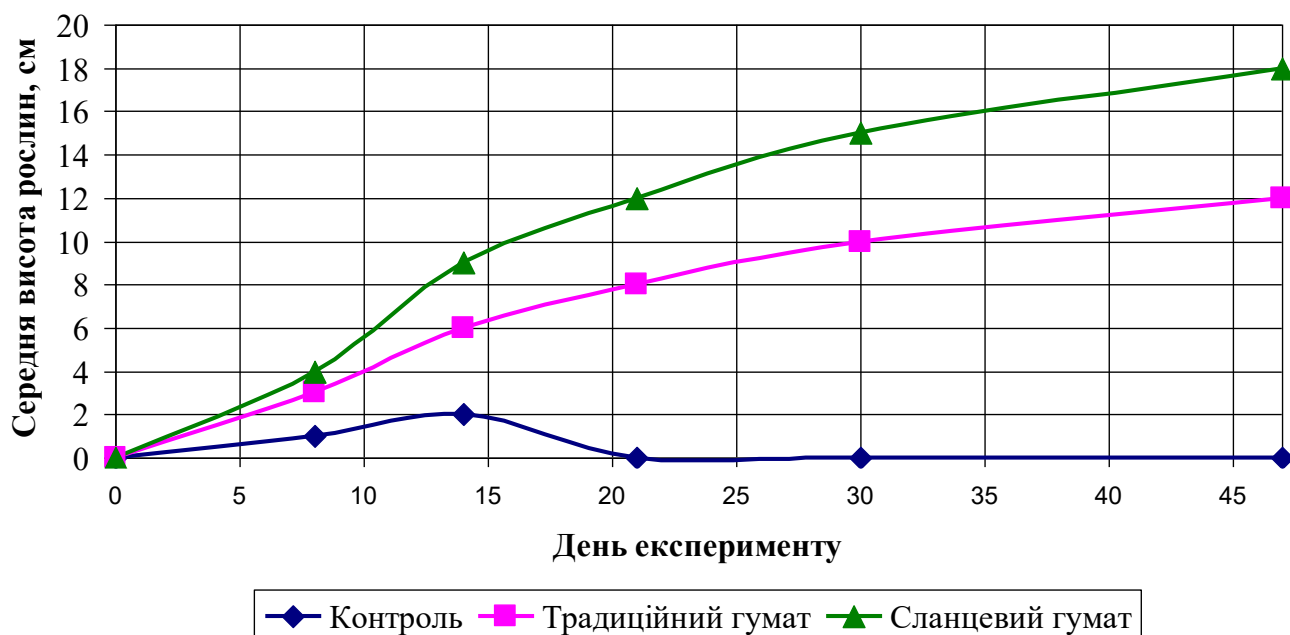


Рис. 2. Залежності зміни висоти надземної маси тестових рослин H , см протягом досліджуваного терміну

Виходячи із наведених на рис. 1 графіків, висота надземної маси ілюструє зміну середньої висоти рослин протягом експерименту, що тривав 47 днів. На осі X позначено час проведення експерименту (кількість днів), а на осі Y – середню висоту рослин у сантиметрах. Криві представляють різні варіанти обробки: референтну (контрольну) групу (без стимуляторів); рослини, що оброблені традиційним гуматом; та рослини, оброблені сланцевим гуматом із відходів вуглезбагачення. Візуально видно, що отриманий сланцевий гумат забезпечив найвищі показники росту.

Референтна група демонструє найнижчі темпи росту – крива має майже лінійний характер, що свідчить про стабільне, але повільне збільшення висоти. Традиційний гумат забезпечив помітно кращі результати: його крива має більш крутий нахил, особливо на середніх етапах експерименту, що свідчить про активізацію ростових процесів. Найбільш виражене зростання спостерігається у рослин, оброблених сланцевим гуматом – їхня крива стрімко зростає, особливо на пізніх етапах, набуваючи експоненціального характеру.

Таким чином, сланцевий гумат виявився найефективнішим стимулятором росту надземної маси рослин. Його застосування призвело до значного прискорення росту порівняно з традиційним гуматом і референтним зразком. Це свідчить про потенціал сланцевого гумату як перспективного агротехнологічного засобу для підвищення продуктивності рослин у сільському господарстві.

Окремо розглядалася динаміка розвитку кореневої системи, оскільки цей показник є інформативним щодо загального фізіологічного стану рослин. Для цього було проаналізовано зміну середньої довжини кореня на різних етапах експерименту. Узагальнені результати вимірювань подано на рис. 3. Представ-

лені дані дозволяють оцінити інтенсивність формування підземної частини рослин за досліджуваних умов.

Динаміка розвитку кореневої системи

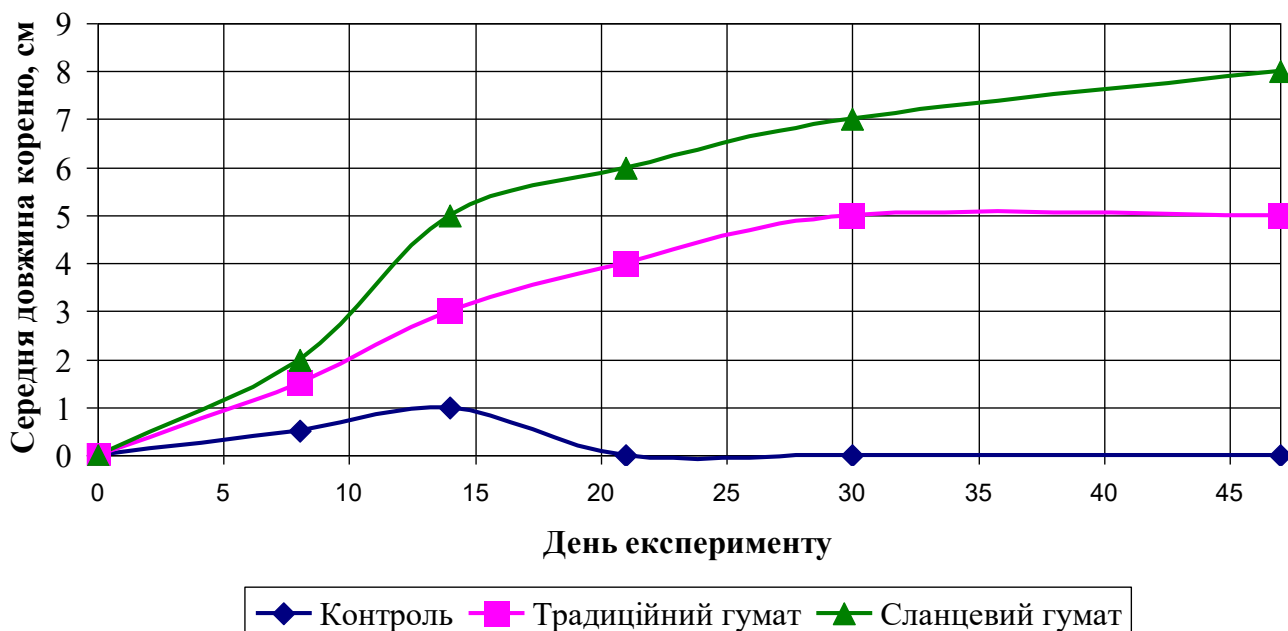


Рис. 3. Залежності зміни висоти довжини кореня тестових рослин R , см протягом досліджуваного терміну

Представлені графіки на рис. 3 відображають загальну динаміку розвитку кореневої системи протягом 47 діб експериментальних спостережень. У референтній групі середня довжина кореня протягом усього періоду залишається мінімальною. Незначне збільшення до приблизно 1 см спостерігається до 15-ї доби, після чого приріст припиняється і значення стабілізується на рівні $<0,5$ см до завершення експерименту. За умови застосування традиційного гумату спостерігається суттєво інтенсивніший ріст порівняно з контрольним зразком. Середня довжина кореня зростає поступово, досягаючи близько 5 см на 30-ту добу, після чого темп росту знижується і показник стабілізується поблизу цього рівня до 47-ї доби.

Найбільш виражений стимулявальний ефект спостерігається при застосуванні сланцевого гумату. Протягом перших 30 діб середня довжина кореня швидко збільшується до приблизно 7 см, а подальший ріст, хоча і уповільнений, триває до кінця експерименту, досягаючи максимального значення – близько 8 см. Таким чином, результати дослідження свідчать, що обидва типи гуматів чинять позитивний вплив на розвиток кореневої системи, значно перевищуючи контрольні показники, причому отриманий сланцевий гумат демонструє найвищу ефективність за середньою довжиною кореня протягом усього періоду спостережень.

Як було зазначено, загальна оцінка дії стимуляторів на рослини визначалася за допомогою інтегрального коефіцієнта E , який узагальнює вплив кількох

морфологічних показників. Для кожного варіанта обробки було визначено значення цього коефіцієнта на різних етапах спостереження. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність застосованих стимуляторів у динаміці. Динаміку зміни параметра E наведено на рис. 4.

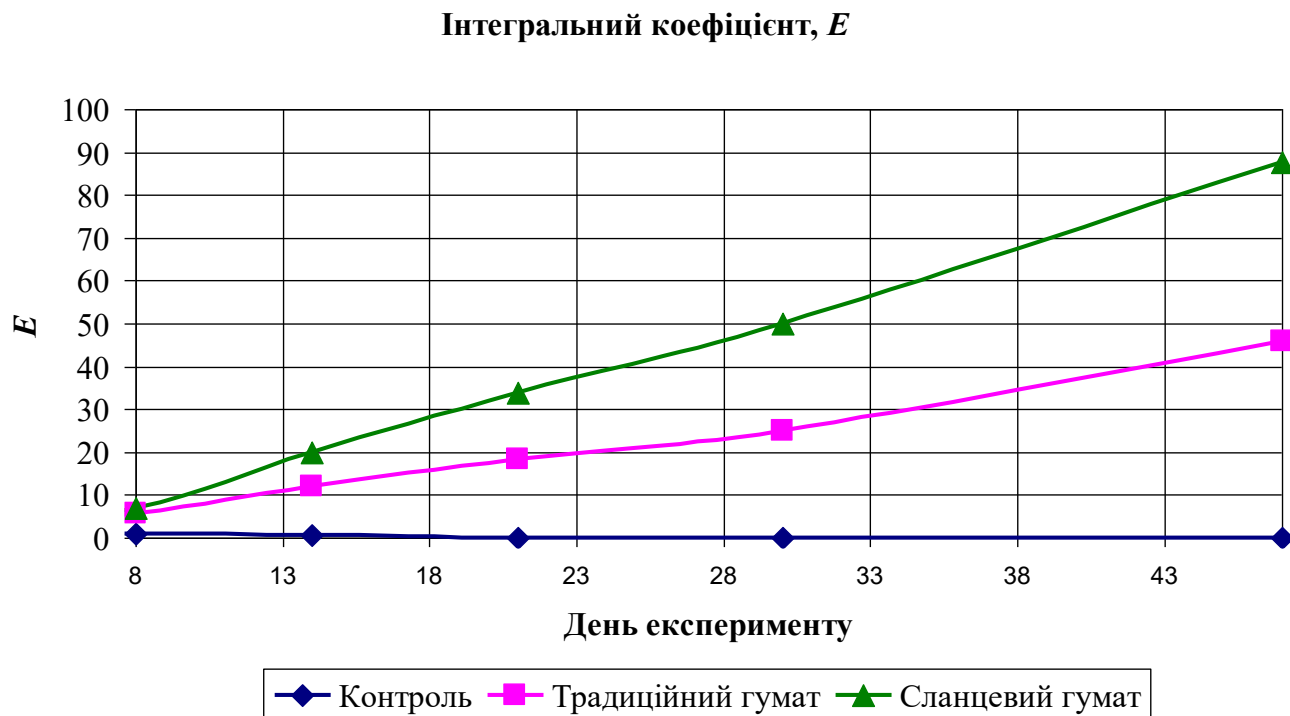


Рис. 3. Залежності зміни інтегральний коефіцієнт E протягом досліджуваного терміну

Даний графік представляє результати експерименту, що відстежував зміни інтегрального коефіцієнта E протягом 47 днів. Дослідження порівнювало три різні підходи: контрольну групу без додаткової обробки, використання традиційного гумату та застосування сланцевого гумату. Метою було візуалізувати вплив цих речовин на певний вимірюваний параметр з часом.

Протягом усього періоду спостереження, інтегральний коефіцієнт E у контрольній групі залишався практично незмінним, утримуючись на стабільно низькому рівні близько п'яти одиниць. На противагу цьому, обидва типи гуматів продемонстрували чітку тенденцію до зростання цього показника. Традиційний гумат забезпечив помірне, лінійне збільшення коефіцієнта, піднявши його значення з початкових п'яти до майже сорока п'яти одиниць до завершення експерименту. Найбільш вражаючі результати показав синтезований нами сланцевий гумат із відходів вуглезбагачення, який спричинив інтенсивне лінійне зростання E , досягнувши найвищої позначки – майже дев'яноста одиниць на сорок сьомому дні експерименту.

Таким чином, експеримент наочно демонструє, що і традиційний, і отриманий сланцевий гумати значно ефективніші за контрольну групу у підвищенні інтегрального коефіцієнта E . При цьому гумат із відходів вуглезбагачення ви-

явився лідером за ефективністю, значно перевершивши показники традиційного гумату за однаковий період часу.

Дослідженнями доведено наявність гумінових речовин у відвалах вуглезнабагачення та можливість отримання нового продукту у вигляді гуматів, які можна ефективно використовувати як мінеральні добрива при стимуляції росту рослин. За якісними показниками цей продукт перевищує традиційні аналоги та має ознаки товару великої доданої вартості.

Висновки. Отримані результати експерименту підтверджують, що гумати, синтезовані з відходів вуглезнабагачення, містять активні гумінові речовини та можуть ефективно застосовуватися як стимулятори росту рослин. Порівняльний аналіз показників розвитку надземної та підземної частини рослин засвідчив значно вищу активність сланцевого гумату порівняно як із традиційним гуматом, так і з референтним (контрольним) зразком. Уже на ранніх етапах експерименту візуально фіксувалися чіткі прояви стимулюючого впливу, а на завершальному етапі сланцевий гумат забезпечив максимальні значення висоти рослин, довжини кореневої системи та біомаси.

Динаміка зміни морфологічних параметрів протягом 47 днів демонструє характерну трифазну реакцію рослин на дію гумінових препаратів: адаптаційну фазу, фазу стабілізації та фазу інтенсивної стимуляції росту. Побудовані графіки висоти рослин і розвитку кореневої системи свідчать, що обидва типи гуматів мають позитивний вплив на фізіологічний стан тестових об'єктів, однак синтезований сланцевий гумат із відходів вуглезнабагачення стабільно забезпечував найвищі темпи росту. Це вказує на підвищену біологічну активність отриманого препарату та його здатність інтенсифікувати ключові фізіолого-біохімічні процеси у рослинному організмі.

Інтегральний коефіцієнт ефективності E , розрахований на основі сукупності морфологічних показників, підтвердив узагальнену перевагу згаданого сланцевого гумату над традиційним аналогом. Зростання значення E у часі для цього стимулятора має найбільш виражений характер і сягає майже 90 одиниць, що майже вдвічі перевищує результат традиційного гумату. Таким чином, проведені дослідження доводять не лише технологічну доцільність утилізації відходів вуглезнабагачення шляхом отримання гуматів, але й їхній високий агротехнологічний потенціал. Отриманий продукт є перспективним для застосування у рослинництві як високоефективний регулятор росту з ознаками товару великої доданої вартості.

Перелік посилань

1. Lapshyn, Ye, Shevchenko, O., Dybrin, S., & and Dychkovskyi, R. (2025). Feasibility of Fine Classification in Processing Watered Coal Sludge from Storage: A Case Study of the Dnipro Coke Chemical Plant. *Acta Montanistica Slovaca*, 100. <https://doi.org/10.46544/ams.v30i1.07>
2. Wilde, S. A. (1937). The Use of Liquid Humate Fertilizers in Forest Nurseries. *Journal of Forestry*, 35(4), 388–392. <https://doi.org/10.1093/jof/35.4.388>
3. Ратушняк, Г., Бікс, Ю., & Лялюк, А. (2022). Експериментальні дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів із мінеральної вати. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 19(1), 12–42.

4. Singh, T., & Singhal, R. (2012). Poly(acrylic acid/acrylamide/sodium humate) superabsorbent hydrogels for metal ion/dye adsorption: Effect of sodium humate concentration. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(2), 1267–1283. Portico. <https://doi.org/10.1002/app.35435>
5. Ataollahi, F., Piltz, J. W., Casburn, G. R., & Holman, B. W. B. (2024). The quality and nutritional value of beef from Angus steers fed different levels of humate (K Humate S100R). *Veterinary and Animal Science*, 24, 100355. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2024.100355>
6. Polyanska, A., Savchuk, S., Dudek, M., Sala, D., Pazynich, Y., & Cicho, D. (2022). Impact of digital maturity on sustainable development effects in energy sector in the condition of Industry 4.0. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/097>
7. Beshley, S., Baranov, V., & Shpak, Y. (2021). Вплив кам'яновугільного попелу та гумату калію на вміст нітрогену і карбону в субстраті відвалу вуглепромишловості й органах *Sorghum drummondii* (Nees ex Steud.) Millsp. & Chase. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*, (85), 45–52. Kochmar, I., & Karabyn, V. (2022).
8. Investigation of deportment of chalcophilic heavy metals in the waste rock of Central Coal Enrichment Plant “Chervonohradska” for the purposes of environmental safety of Lviv-Volyn coal basin. *Environmental Problems*, 7(4), 169–176. <https://doi.org/10.23939/ep2022.04.169>
9. Miroshnykov, I., Cichoń, D., Shyrin, L., Dybrin, S., & Dychkovskyi, R. (2025). Ensuring the environmental sustainability of molybdenum ore mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1457(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1457/1/012014>
10. Knysh, I., & Karabyn, V. (2014). Heavy metals distribution in the waste pile rocks of Chervonohradska mine of the Lviv-Volyn coal basin (Ukraine). *Pollution Research*, 33, 663–670.
11. Voloshchysyn, A.I., Bosak, P.V., Popovych, V.V., Menshykova, O.V., & Kopystynskyi, Y.O. (2024). Natural phytomelioration of coal mine waste heaps in the context of increased radiation background (on the case of Nadiya mine, Lviv-Volyn coal basin, Ukraine). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), 012130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012130>
12. Fischer, C. (2002). Oberflächenquantifizierung an Schwarzpелiten unterschiedlicher Verwitterungsgrade (Doctoral dissertation). *Friedrich-Schiller-Universität Jena*.
13. Grinberg, I. V. (1957). Issledovanie khimicheskoi prirody i geneticheskii sootnosheniia organicheskogo veshchestva Karpatskikh slantsev i neftei [Study of the chemical nature and genetic relations of organic matter of Carpathian shales and oils]. *Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*.
14. Dychkovskyi, R., Falshtynskyi, V., Saik, P., Lozynskyi, V., Sala, D., Hankus, Ł., Magdziarczyk, M., & Smoliński, A. (2025). Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
15. Vladyko, O., Maltsev, D., Gliwiński, Ł., Dychkovskyi, R., Stecula, K., & Dyczko, A. (2025). Enhancing Mining Enterprise Energy Resource Extraction Efficiency Through Technology Synthesis and Performance Indicator Development. *Energies*, 18(7), 1641. <https://doi.org/10.3390/en18071641>
16. Kosenko, A., Khomenko, O., Kononenko, M., Polyanska, A., Buketov, V., Dychkovskyi, R., Polański, J., Howaniec, N., & Smolinski, A. (2025). Sustainable management of iron ore extraction processes using methods of borehole hydro technology. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 16(1), 92–112. <https://doi.org/10.1504/ijmme.2025.145592>
17. Leita, L., Petruzzelli, G., & Fornasier, F. (2003). Ferricyanide-humate formation. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 107, 769–772. <https://doi.org/10.1051/jp4:20030414>
18. Marini, F., & Walczak, B. (2020). ANOVA-Target Projection (ANOVA-TP). *Comprehensive Chemometrics*, 495–520. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.14578-0>
19. Leita, L., De Nobili, M., Catalano, L., & Mori, A. (1998). Formation and voltammetric characterization of iron–humate complexes of different molecular weights. *Humic Substances*, 165–171. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85573-806-5.50017-4>

20. Pavlychenko, A., Sala, D., Pyzalski, M., Dybrin, S., Antoniuk, O., & Dychkovskyi, R. (2025). Utilizing Fuel and Energy Sector Waste as Thermal Insulation Materials for Technical Buildings. *Energies*, 18(9), 2339. <https://doi.org/10.3390/en18092339>
21. Newcomer, R. W., Nybo, J. P., & Newcomer, J. R. (2021). Humate in the Upper Cretaceous Fruitland Formation in northwestern New Mexico. *Geology of the Mount Taylor Area*, 153–158. <https://doi.org/10.56577/ffc-71.153>
22. Zaryab, A., Nassery, H. R., Alijani, F., & Knoeller, K. (2023). Identification of hydro-chemical processes in Western Kabul Plain aquifer (Afghanistan) using statistical methods and self-organizing map. *Sustainable Water Resources Management*, 9(6). <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00980-6>
23. Giesy, J. P., Geiger, R. A., Kevern, N. R., & Alberts, J. J. (1986). UO₂²⁺-humate interactions in soft, acid, humate-rich waters. *Journal of Environmental Radioactivity*, 4(1), 39–64. [https://doi.org/10.1016/0265-931x\(86\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0265-931x(86)90020-2)

ABSTRACT

Purpose. Development and justification of an integrated multiphysical methodology for evaluating the thermal conductivity and thermo-mechanical stability of porous thermal insulation materials, combining experimental measurements, numerical modeling, and analysis of structural and physical parameters to determine their suitability for use in energy-efficient designs of technical and civil structures.

Methods. Involves a comprehensive sequential preparation and segregation of the waste (determination of moisture content, ash content, and organic matter), conducting alkaline extraction using potassium hydroxide under controlled temperature and reaction time conditions, purification and concentration of the humate solution, as well as structural and functional analysis of the resulting product using FTIR spectroscopy, pH measurement, cation-exchange capacity determination, and elemental composition analysis. Additionally, mass balance evaluation and an assessment of the technological and environmental efficiency of the process were performed.

Results. The study demonstrated that coal beneficiation waste contains a significant proportion of humic substances suitable for alkaline extraction. Optimal process conditions were determined, ensuring a high yield of potassium humate with a stable structure and characteristic functional groups of humic polymers. The obtained product exhibits high solubility, enhanced cation-exchange capacity, and good stability. Moreover, the proposed process significantly reduces the mass of waste requiring disposal, providing an environmentally safe pathway for utilization.

Originality. Lies in establishing the relationships between root system mass development, above-ground biomass height, and a generalized integral coefficient reflecting the stimulating effect of potassium humate extracted from coal beneficiation waste on plant growth. The study developed an effective and environmentally safe method for synthesizing potassium humate from technogenic waste and determined optimal alkaline extraction conditions to achieve maximum humate yield while preserving the structural integrity of functional groups.

Practical implication. Consists in developing a new method for extracting humate from coal enrichment waste, proposed technology can be implemented at beneficiation plants, enabling the conversion of low-value technogenic waste into a commercially valuable product for agronomy, soil reclamation, and ecological technologies. Technological solutions reduce waste management costs, lower environmental risks, and support circular economic principles within the coal industry.

Keywords: *potassium humate, coal beneficiation waste, alkaline extraction, humic substances, waste utilization, environmentally friendly synthesis, resource efficiency.*

дата першого надходження статті до видання	01.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	02.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	03.09.2025