

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЧЕРНИШ ЄЛІЗАВЕТА ЮРІЇВНА



УДК 502/504:621.039.75:530.192(477)(043.3)

**НАУКОВІ ЗАСАДИ ЕКОЛОГО-СИНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ
ДО ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ФОСФОГІПСУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ
ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Суми – 2019

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі прикладної екології Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Пляцук Леонід Дмитрович,
Сумський державний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри прикладної екології.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Петрушка Ігор Михайлович,
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри екологічної безпеки та
природоохоронної діяльності Інституту
сталого розвитку імені В. Чорновола, м. Львів;

доктор технічних наук, професор
Козуля Тетяна Володимирівна,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри програмної інженерії
та інформаційних технологій управління, м. Харків;

доктор технічних наук, професор
Внукова Наталія Володимирівна,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри екології, м. Харків.

Захист дисертації відбудеться 7 червня 2019 р. об 11 год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд. 204.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 за електронною адресою: <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/102-55-051-04.html>.

Автореферат розісланий 3 травня 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04



І. Ю. Аблєєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних проблем техногенної безпеки і сталого розвитку кожної держави, зокрема й України, є ресурсозбереження та відновлення навколишнього середовища (НС) як основної складової частини екологічної безпеки на глобальному і місцевому рівнях.

При впливі факторів екологічної небезпеки природна екосистема втрачає стійкість і переходить на один із можливих рівнів існування, перетворюючись на природно-техногенну, техногенну та редуційну систему, в якій зростає роль деструктивних процесів в умовах порушення гомеостазу. Екосистема являє собою синергетичну систему, оскільки є відкритою і піддається впливу техногенезу, зокрема, процесу накопичення відходів промисловості в довкіллі, що змушує її шукати шляхи самоорганізації.

Так, чинником негативного впливу виробництва фосфорних добрив є приріст об'єму багатотоннажного відходу – фосфогіпсу, що збільшує рівень техногенного навантаження на екосистемні компоненти в місцях його складування, перевищуючи природні межі флуктуації хімічних елементів у них, зокрема токсичних, та формуючи умови біфуркації деградаційного характеру для екосистеми.

Розроблення наукових засад єдиного підходу не лише до процесу ресурсоефективного виробництва продукції мінеральних добрив, а й поводження з відходами цих виробництв дозволить визначити напрями і результати перетворень їх у довкіллі, що сприяють виконанню вимог екологічної безпеки.

На сьогодні у світі налічують 52 країни, в яких відбувається складування фосфогіпсу у відвалах, і загальні об'єми вже накопиченого становлять 5,6–7,0 млрд т. Щорічний приріст його накопичення у світі досягає 120–130 млн т, а масова частка утилізації не перевищує 10 %.

На цей час на території України нагромаджено більше ніж 55 млн т. За минулі роки вихід фосфогіпсу у виробничому процесі становив близько 2 млн т щорічно. Лише в Сумській області знаходиться понад 14 млн т цього відходу, що призвело до утворення териконів висотою до 15 м у місцях складування фосфогіпсу.

Відвали фосфогіпсу є комплексними джерелами забруднення і деформації довкілля. Зберігання фосфогіпсу у відвалах, навіть за правильної експлуатації споруди, становить екологічну небезпеку для природних компонентів. Під час оброблення фосфатної сировини в технологічних рішеннях виробництва мінеральних добрив значна частка шкідливих і токсичних домішок потрапляє у тверді відходи. Зокрема, сполуки фтору, невідмита фосфорна кислота та її солі, рідкісноземельні метали, миш'як, важкі метали (ВМ) – кадмій, свинець, ванадій тощо, а також можлива наявність радіоактивних елементів. Свіжі відвали стають джерелами емісії сполук фтору в атмосферне повітря. Високі значення кислотності (рН від 3 од. до 5 од. залежно від віку відвалу) обумовлюють рухомість токсичних компонентів і можливість їх трансформації та міграції в ґрунти навколо відвалів і потенційно – в підземні води.

Зменшення рівня техногенного впливу на довкілля в процесі поводження з цим відходом потребує вдосконалення та створення нових екологічно безпечних процесів, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів і залучення фосфогіпсу як вторинного ресурсу, й відповідне оновлення існуючих практик його утилізації.

Отже, своєчасністю та актуальністю визначається пошук наукового підходу до розроблення методології визначення напрямів самодовільних процесів, що сприяє зниженню навантаження на довкілля і дає апріорну оцінку еко-ефективності прийняття рішень щодо розроблення екологічно безпечних біохімічних процесів утилізації в технологіях захисту НС та формування єдиної еколого-синергетичної концепції стимулювання природного відновлення компонентів екосистем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 р. з розділу «Раціональне природокористування» і стратегічним пріоритетним напрямом інноваційної діяльності в Україні на 2011–2021 рр. «Широке застосування технологій більш чистого виробництва та охорони навколишнього природного середовища». Робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології Сумського державного університету, пов'язаних із тематиками «Розробка шляхів поліпшення екологічної ситуації міст і промислових зон» згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України (номер держреєстрації 0111U006335) та «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики» (номер держреєстрації 0116U006606).

Мета дослідження. Метою роботи є розроблення та обґрунтування наукових засад еколого-синергетичного підходу щодо екологічно безпечного поводження з відходами на прикладі створення технологій комплексної утилізації фосфогіпсу в системах очищення компонентів довкілля.

Завдання досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- сформулювати еколого-синергетичні засади оцінювання рівня техногенного навантаження на довкілля від фосфогіпсових відвалів;
- здійснити моделювання процесу міграції ВМ із техногенного масиву фосфогіпсового відвалу на прилеглі території;
- розробити еколого-синергетичну концепцію утилізації фосфогіпсу в технологічних рішеннях захисту НС;
- обґрунтувати механізми впливу модифікованих гранул фосфогіпсу як носія для розвитку бактеріальної культури на процес біохімічного газоочищення в технологіях захисту атмосферного повітря;
- розробити кінетичну модель біоокиснення сполук сірки в процесі іммобілізації тіобактерій на фосфогіпсових гранулах;
- визначити фізико-хімічні параметри здійснення процесу газоочищення в біофільтрі з гранульованим завантаженням із фосфогіпсу;

- розробити технологічні рішення утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту атмосферного повітря;
- сформуванати наукові засади процесів утилізації фосфогіпсу в системах анаеробної стабілізації стічних вод та мулових осадів у технологіях захисту водних екосистем;
- здійснити математичне моделювання кінетики вивільнення фосфат-іонів із мулових осадів у процесі анаеробної конверсії разом із дигідратним фосфогіпсом;
- дослідити синергізм впливу дози фосфогіпсу за певних значень ХСК на процес виділення фосфат-іонів в анаеробно стабілізованих мулових осадах в умовах сульфатредукції;
- розробити еколого-синергетичну модель анаеробної стабілізації стоків та мулових осадів разом із фосфогіпсом для технологічної реалізації процесу захисту водних екосистем;
- обґрунтувати еколого-синергетичні механізми фіксації ВМ у ґрунтовому комплексі за дії біогенного композита, що містить фосфогіпс, у технологіях відновлення ґрунтів;
- здійснити математичне моделювання впливу біогенного композита, що містить фосфогіпс, на мікробний ценоз ґрунту;
- здійснити мікропольові дослідження впливу біогенного композита, що містить фосфогіпс, на стимулювання природних захисних властивостей ґрунтового комплексу відповідно до синергетики процесу.

Об'єкт дослідження – техногенний вплив відвалів фосфогіпсу на довкілля.

Предмет дослідження – еколого-синергетичний підхід до зменшення техногенного навантаження на довкілля при використанні фосфогіпсу в природоохоронних технологіях.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертаційної роботи ґрунтуються на еколого-синергетичному, фізичному, біохімічному та математичному моделюванні нелінійних процесів розвитку екосистемних явищ за впливу процесу накопичення фосфогіпсу в об'єктах довкілля та його утилізації в технологіях захисту НС. Під час проведення експериментальних досліджень для визначення хімічного складу зразків фосфогіпсу, контролю фізико-хімічних параметрів процесу його утилізації були використані такі методи: рентгенофлуоресцентний, рентгенодифракційний, атомно-адсорбційний, фотометричної абсорбції, електронної мікроскопії, гравіметрії, гігromетрії та рН-метрії. Для оптимізації процесу формування модифікованих гранул фосфогіпсу було використано ситовий аналіз та метод капілярної конденсації азоту. Для вивчення якісного і кількісного складу газових потоків використовували метод газометрії та газової хроматографії. Дослідження морфології мікробних препаратів проводили за допомогою світлової та електронної растрової мікроскопії.

Метод повнофакторного експерименту застосовували для оцінювання впливу відхилень основних факторів на процес формування композитів на основі

фосфогіпсу та процес утилізації фосфогіпсу в технологічних системах захисту НС. Використані методи оптимізації в моделюванні технологічних процесів із застосуванням комп'ютерних технологій та електроніки. У версії R2 платформи Arduino Uno як конвертер використовували контролер Atmega8. Використано програмні пакети підтримання експерименту DifWin-1, Autodesk 3DS Max (ліцензовані). Моделювання та оброблення експериментальних даних здійснено за допомогою спеціального програмного забезпечення Microsoft Excel, Google Earth Pro, Statistica 12.0, MatLab 7.8.0 (ліцензовані). Для розроблення комп'ютерної моделі була використана мова програмування C++ в інтегрованому середовищі Borland C++ (ліцензовані).

Наукова новизна одержаних результатів. Із метою підвищення рівня екологічної безпеки на основі виконаних теоретичних досліджень та експериментальних даних одержані такі наукові результати:

вперше:

- розроблено еколого-синергетичні засади аналізу техногенного впливу місць складування відходів на прикладі результатів досліджень поведінки фосфогіпсу та урахування синергетичних характеристик розвитку екосистеми на різних рівнях її організації за впливу чинників екологічної небезпеки, що формуються в процесі накопичення масивів відходів у довкіллі;

- розроблено еколого-синергетичні засади оцінювання рівня безпечності утилізації відходів на прикладі фосфогіпсу при використанні його як мінерального носія в біосорбційних процесах захисту компонентів довкілля;

- встановлено еколого-синергетичні механізми утворення біоактивного прошарку у фосфогіпсовому носії в процесі очищення відхідних газів від сполук сірки для зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря;

- визначено еколого-синергетичні механізми виділення фосфат-іонів у рідкій фазі в процесі сумісної анаеробної стабілізації мулових осадів та фосфогіпсу з метою зниження техногенного навантаження на гідросферу, що дозволяє підвищити ефективність водоочищення на станціях біологічного очищення міських очисних споруд;

- визначено синергетичні закономірності змін фракційного складу ВМ з утворенням стійкої нерозчинної фракції в системі «грунт – мікробний біом – біокомпозит» на основі мулових осадів та фосфогіпсу в процесі ремедіації забруднених ґрунтів із метою зниження техногенного навантаження на ґрунтовий комплекс;

набули подальшого розвитку:

- моделювання міграції ВМ у техногенному тілі фосфогіпсового відвалу та ґрунті з урахуванням процесу біовилуговування компонентів фосфогіпсу.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено технологію видалення сполук фосфору з мулових осадів за допомогою дигідратного фосфогіпсу в системах анаеробної мікробіологічної стабілізації, що розглядається як важливий елемент стратегії поводження з такого роду відходами в Україні й може бути впроваджена на існуючих і проєктованих спорудах біологічного очищення комунально-побутових стічних

вод. Упровадження розробленої технології запобігає розбуханню активного мулу, що на сьогодні є надзвичайно актуальною проблемою при експлуатації аеротенків, і додатково дозволяє отримати високоякісне фосфатне добриво. Основні принципи технології захищені патентом України на корисну модель.

2. Розроблено технологію біохімічного окиснення сполук сірки газових потоків із використанням мінерального носія на основі фосфогіпсу, що дозволяє забезпечити очищення біогазу до біометану з утворенням біосірки як побічного продукту очищення. Аеробні біофільтри з гранульованим завантаженням на основі фосфогіпсу запропоновано використовувати для очищення промислових газових викидів із високою концентрацією сполук сірки. Основні принципи технології та конструкційне рішення захищені патентом України на корисну модель.

3. Розроблено спосіб іммобілізації мікроорганізмів у масі носія на основі техногенних відходів, що дозволяє розширити можливості утилізації фосфогіпсу в різних технологічних рішеннях захисту довкілля, зокрема в процесах рекультивації та ремедіації забруднених земель з використанням біокомпозитних матеріалів на його основі для підвищення агроекологічного ефекту. Отримано патент України на винахід.

4. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво екологічно безпечних технологічних рішень з утилізації фосфогіпсу. Дослідно-промисловими випробуваннями технології біодесульфуризації з використанням мінерального носія з фосфогіпсу, проведеними на базі Сумського ДНДІ «МІНДІП» м. Сум, підтверджено її працездатність (акт впровадження від 18 листопада 2016 року).

5. Упроваджено в навчальний процес кафедри прикладної екології Сумського державного університету методичні положення моніторингу стану компонентів екосистеми в місцях складування фосфогіпсу, математичну модель процесу утилізації фосфогіпсу в системах очищення газових та рідких середовищ, спосіб утилізації композитних матеріалів на основі фосфогіпсу та інших відходів у процесі ремедіації природно-антропогенних ландшафтів забруднених ВМ, інженерну методику розрахунку конструктивних параметрів апаратів та лабораторно-експериментальні моделі досліджуваних процесів у дисципліни «Муніципальна екологічна діяльність», «Хімія геосистем», «Техноекологія», «Еніоекологія» та «Екологічні біотехнології» (акт впровадження від 18 грудня 2018 року).

Особистий внесок здобувача полягає в аналізованні стану проблеми, формуванні та розробленні основної ідеї й теми дисертації, розробленні науково-теоретичних положень еколого-синергетичної концепції утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту НС, зокрема розроблення біохімічного напрямку стимулювання природних захисних властивостей ґрунтового комплексу від дії забруднювальних речовин – ВМ, інтенсифікації анаеробного відновлення сполук фосфору з мулових осадів міських очисних споруд та біохімічного газоочищення при використанні в технологічних системах модифікованих композитних матеріалів на основі дигідратного фосфогіпсу, розробленні

методик експериментальних досліджень, експериментальних установок і проведенні лабораторних експериментальних досліджень і виробничих випробувань, підборі та адаптації до умов експериментів методик аналізу. Внесок автора в працях, опублікованих у співавторстві, наведений у списку праць за темою дисертації.

У дисертації також було використано результати спільних праць з О. М. Яхненко (автор є науковим керівником), тема дисертаційної роботи – «Екологічно безпечна утилізація фосфогіпсу у технологіях захисту атмосферного повітря» (http://lib.sumdu.edu.ua/library/docs/Disser/diss_Yakhnenko.pdf).

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції «Збалансоване природокористування: традиції та інновації» (м. Київ, жовтень 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Вода. Екологія. Суспільство» (м. Харків, березень 2014 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія и защита окружающей среды» (м. Мінськ (Білорусь), березень 2015 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (м. Миколаїв, червень 2015 р.); XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (м. Київ, травень 2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» (м. Кременчук, жовтень 2015 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції студентів, магістрантів, аспірантів і молодих учених «Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Белоруссии и сопредельных государств» (м. Гомель (Білорусь), березень 2016 р.); XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (м. Київ, 12–13 травня 2016 р.); XX Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2017» (м. Харків, 19–22 квітня 2017 р.); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» (м. Кременчук, жовтень 2017 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції студентів, магістрантів, аспірантів і молодих учених в рамках Року науки в Республіці Білорусь «Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Белоруссии и сопредельных государств» (м. Гомель (Білорусь), листопад 2017 р.); IX Міжнародній конференції молодих вчених «Молоді вчені 2018 – від теорії до практики» (м. Дніпро, лютий 2018 р.); 10th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists below 35 years (м. Татранська Ломниця (Словаччина), квітень 2018 р.); Міжнародній конференції «Конструювання, моделювання, виробництво: обмін інноваціями» (DSMIE–2018) (м. Суми, червень 2018 р.); BUP Conference «Current Challenges of Local and Regional Development» (м. Познань (Польща), вересень 2018 р.); 57th International University Week «The Protection of Nature and the

Environment in Southeast Europe: Players, Discourses, Strategies of Action» (м. Тутцинг (Німеччина), жовтень 2018 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 80 наукових праць, з яких: 1 монографія в співавторстві, 40 статей, зокрема 24 статті у наукових фахових виданнях із переліку МОН України, 15 статей у зарубіжних наукових періодичних виданнях та у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus та Web of Science), 1 стаття – в інших виданнях, 36 матеріалів доповідей у збірниках праць конференцій, 1 патент України на винахід та 2 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 286 найменувань на 33 сторінках, та 24 додатки на 109 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 460 сторінок, з яких основного тексту – 278 сторінок, робота містить 111 рисунків та 23 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми і наукової проблеми, сформульовані мета й завдання досліджень, наведені основні наукові положення та практична цінність одержаних результатів, дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру й обсяг роботи тощо.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел та визначено основні чинники екологічної небезпеки в регіоні від техногенного впливу масивів фосфогіпсу на прилеглі урбоєкосистем території.

Здійснено огляд життєвого циклу перетворення фосфоритової сировини від видобування породи до її використання в хімічній промисловості з утворенням як корисних продуктів, так і відходів, зокрема, фосфогіпсу під час виробництва фосфорних добрив. Питанням техногенної небезпеки фосфогіпсових відвалів та розвитку напрямів його утилізації у промисловості, сільському господарстві, для отримання рідкоземельних елементів тощо присвячені наукові праці багатьох українських і зарубіжних вчених: Белюченко І. С., Булата А. Ф., Волженського О. В., Дворкіна Л. Й., Евенчіка С. Д., Ерайзера Л. М., Іваницького В. В., Іващенко Т. Г., Касімова А. М., Класена П. В., Крайнюк О. В., Левіна Б. В., Личко Ю. І., Локшина Е. П., Мельникова Л. Ф., Малика Н. Ю., Мальованого М. С., Петрушки І. М., Пляцука Л. Д., Файзієва Х. М., Шестакова В. Л., Шмандія В. М., Degirmenci N., Ioannidou A., Okucu A., Papastefanou C., Stoulos S., Turabi A., Weiguo S. та інших.

Огляд існуючих способів перероблення фосфогіпсу засвідчив невисокий рівень його утилізації, що стримується енергозатратністю відомих способів, утворенням додаткових вторинних відходів і вторинних джерел забруднення довкілля.

Відповідно до концепції екологічно безпечного поводження з відходами першочергового значення набуває реалізація інтегрованих технологій рециклінгу

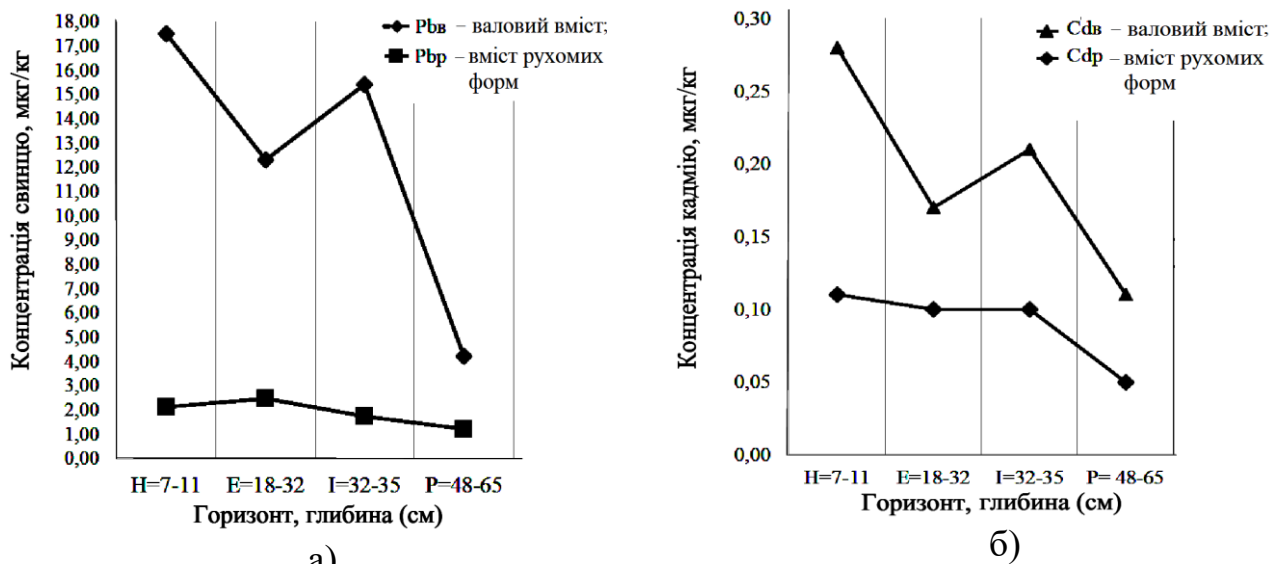
фосфогіпсу із залученням його до природних процесів асиміляції в екосистемі, що потребує розроблення єдиного наукового підходу для зменшення техногенного впливу на довкілля та утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту НС із залученням інструментарію синергетики.

Виходячи з проведеного аналізу наукових та практичних досягнень і виявлених при цьому недоліків, сформульовані наведені вище мета та завдання досліджень.

У другому розділі розглянуті об'єкт і методи досліджень, здійснена організація структури проведення теоретичних і експериментальних досліджень із залученням комбінації різних методів і розроблений алгоритм їх використання під час вивчення різних напрямів утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту навколишнього середовища.

Для дослідження екологічного впливу процесу накопичення та складування фосфогіпсу на екосистему були взяті проби з масиву відвалу і ґрунту в межах його можливої дії (рис. 1).

У гумусовому й ілювіальному горизонтах концентрація ВМ виявилася вище фонові, що свідчить про забруднення ВМ ґрунтів району відвалу фосфогіпсу. Високі значення вмісту рухомих форм свинцю (P_{br}) відзначено в верхньому 0–10 см горизонті та на глибині 18 см, що коливаються в межах 3,5–1,76 мкг/кг, вниз за профілем відбувається зниження концентрації до рівня 1,21 мкг/кг при значенні ГДК = 6 мкг/кг (рис. 1 а). У верхньому горизонті також спостерігалось накопичення Cd (рис. 1 б).



Н – гумусовий горизонт; Е – елювіальний горизонт; І – ілювіальний горизонт; Р – материнська порода

а) – вміст кадмію; б) – вміст свинцю

Рисунок 1 – Розподіл важких металів за ґрунтовим профілем

Установлено, що для всіх зразків фосфогіпсу незалежно від часу перебування у відвалі характерна підвищена кислотність. Низькі значення рН зразків свіжого фосфогіпсу обумовлені наявністю водорозчинних сполук

фтору, слідами невідмитої фосфорної кислоти та її солей, сульфатної кислоти у свіжому відвалі нової черги і поступовим вимиванням або випаровуванням кислих сполук зі складованого в тераси фосфогіпсу під впливом різних природних факторів. Так, за температури 297 К значення рН водної витяжки зразків свіжого фосфогіпсу з верхньої частини платформи відвалу становили 2,3–2,8 од.

У таблиці 1 надано елементний склад проаналізованих зразків фосфогіпсу у відповідності до терас масиву відвалу.

Таблиця 1 – Основні компоненти фосфогіпсу ПАТ «Сумихімпром» у перерахунку на оксиди

Опис зразка	Компонент, % мас.						
	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	F	H ₂ O крис.
Свіжий фосфогіпс із верхньої платформи	36,0	39,0	3,0	0,3	1,2	0,8	19,64
Фосфогіпс із I тераси	34,0	38,0	2,7	0,8	3,4	0,3	20,74
Фосфогіпс із II тераси	34,0	38,0	1,1	2,3	3,8	-	20,73
Фосфогіпс із III тераси	30,0	36,0	1,3	9,7	4,3	-	19,86
Фосфогіпс із IV тераси	30,0	34,0	1,3	10	5,1	-	19,43

На рисунку 2 наведена розроблена комбінація основних методів, які використано під час реалізації теоретичних та експериментальних досліджень процесів утилізації фосфогіпсу.



Рисунок 2 – Блок-схема комбінування методів дослідження

У третьому розділі розроблено еколого-синергетичний підхід для оцінювання рівня техногенного навантаження на довкілля від відвалів фосфогіпсу. Відповідно здійснено аналіз екосистемних процесів за впливом на них процесів техногенезу.

Основні характеристики синергетичних систем, які пропонується застосовувати для аналізу екосистем, сформовано у вигляді блок-схеми (рис. 3), в якій виділено також фактори зовнішнього середовища.

Еколого-синергетичний підхід визначаємо як основу дослідження синергетичних механізмів змін станів екосистеми та її компонентів, що діють на принципах самоорганізації й саморозвитку, за впливу чинників техногенного навантаження, зокрема процесу накопичення відходів в умовах біфуркації.

Науково обґрунтовано використання природних механізмів фіксації ВМ та їх біохімічного вилучення з циклів кругообігу речовин для зниження рівня техногенного навантаження від місць складування та накопичення фосфогіпсу, що забезпечить якісно новий рівень екологічної безпеки в регіоні внаслідок підвищення стійкості екосистеми.

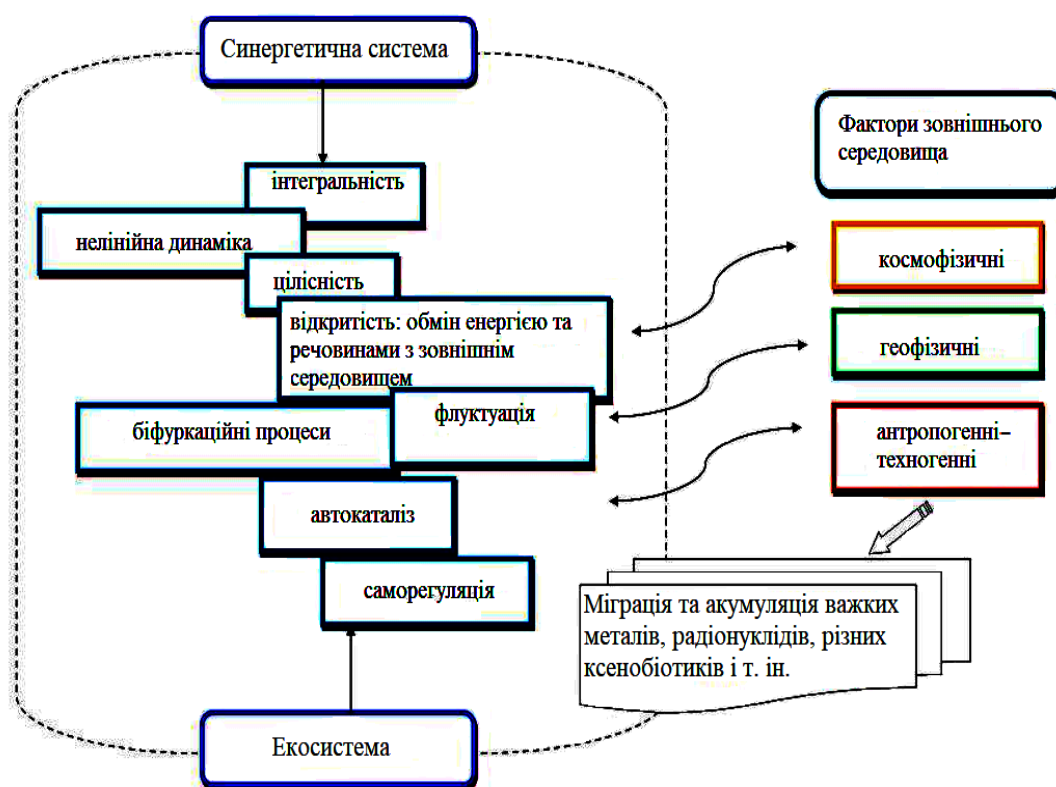


Рисунок 3 – Поєднання характеристик синергетичної та екологічної систем за впливу факторів зовнішнього середовища

Складові оболонки Землі – атмосфера, літосфера та гідросфера, при взаємодії в рамках природних процесів біохімічного кругообігу речовин створюють умови для вертикальної та горизонтальної міграції компонентів фосфогіпсових відвалів і їх часткової асиміляції в довкіллі. Спостерігаються екосистемні зміни та деградація природно-антропогенних ландшафтів поблизу

відвалів, це пов'язано з процесами природно-техногенної змістовності, зображеними на рисунку 4, що були об'єднані в інтегровану модель.

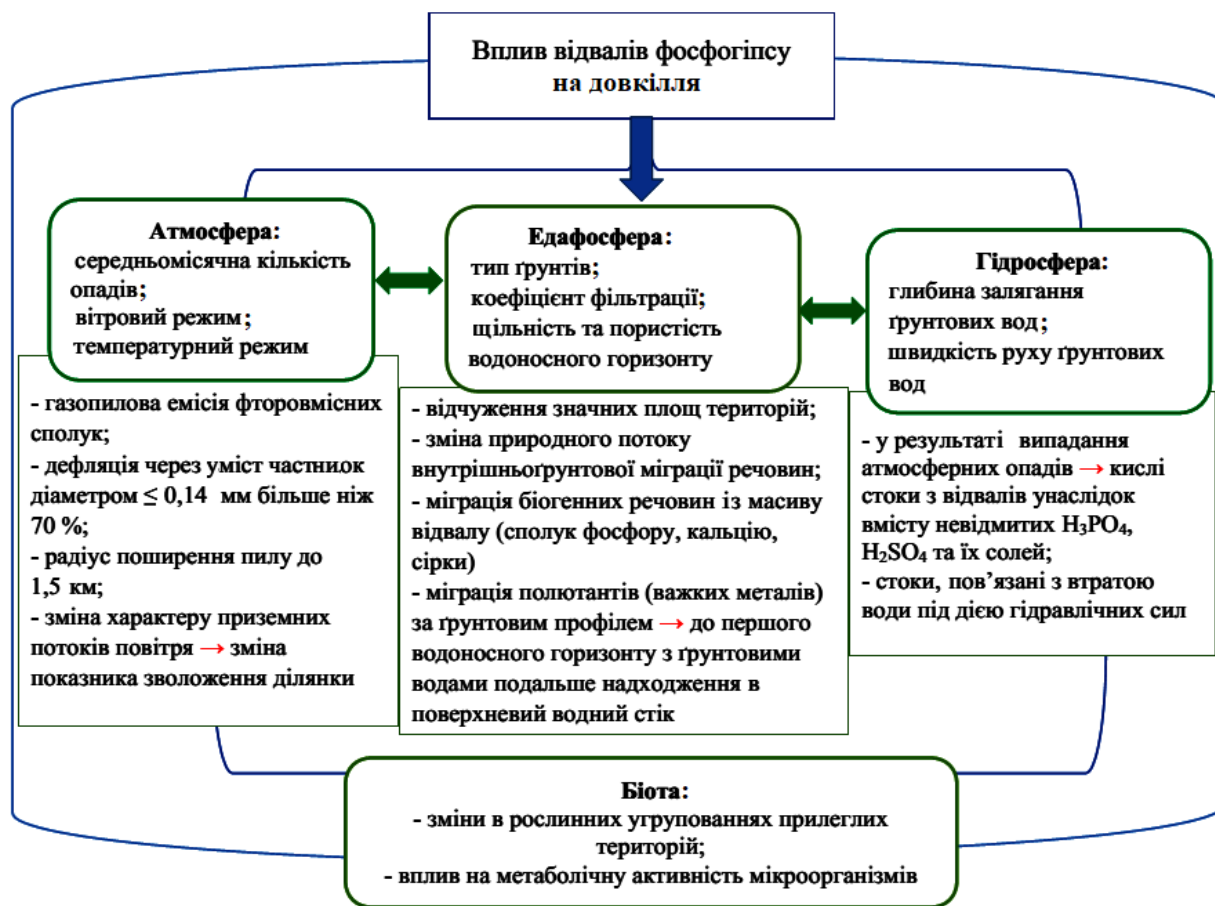


Рисунок 4 – Схематичне відображення сутності моделі впливу відвалів фосфогіпсу на довкілля

Визначено, що фосфогіпс має ряд фізико-хімічних і біохімічних характеристик, що визначають можливість його застосування в технологічних процесах захисту НС на еколого-синергетичних засадах.

Здійснено експериментальне моделювання процесів фільтрації забруднених вод із відвального фосфогіпсу в ґрунтовому профілі, що було проведено в спеціально розробленому лабораторно-експериментальному модельному ґрунті.

Здійснено моделювання глибини зволоження сірих лісових ґрунтів при фільтрації через ґрунтовий профіль води, що містить дрібнодисперсні частинки фосфогіпсу. Це дозволило змогу дослідити динаміку фронту зволоження під час інфільтрації водного розчину при вивченні стоку забруднених вод із масиву фосфогіпсового відвала. Основні зміни в ґрунтовій системі можна охарактеризувати як зниження значень рН (у межах 4,7–5,8 од.), збільшення розчинених аніонів, зокрема сульфатів і фосфатів, а також катіонів металів. Підвищені концентрації багатьох лігандів призводять до значних змін передбаченого рівноважного сполукоутворення.

Високі концентрації біогенних елементів (кальцій, сірка, калій) спостерігаються у розчинах із гумусового та елювіального горизонтів, де

визначено наявність заліза до 5 %, нікелю – до 1–3 %, міді – до 1 %, але не було виявлено свинцю та кадмію, що свідчить про відсутність водорозчинних форм цих ВМ.

Було побудовано модель ґрунтово-геохімічної обстановки за профілем ґрунту за дії фосфогіпсу з накладанням тривимірної поверхні, отриманої за допомогою стохастичних реконструкцій на основі зображень із високою роздільною здатністю (рис. 5).

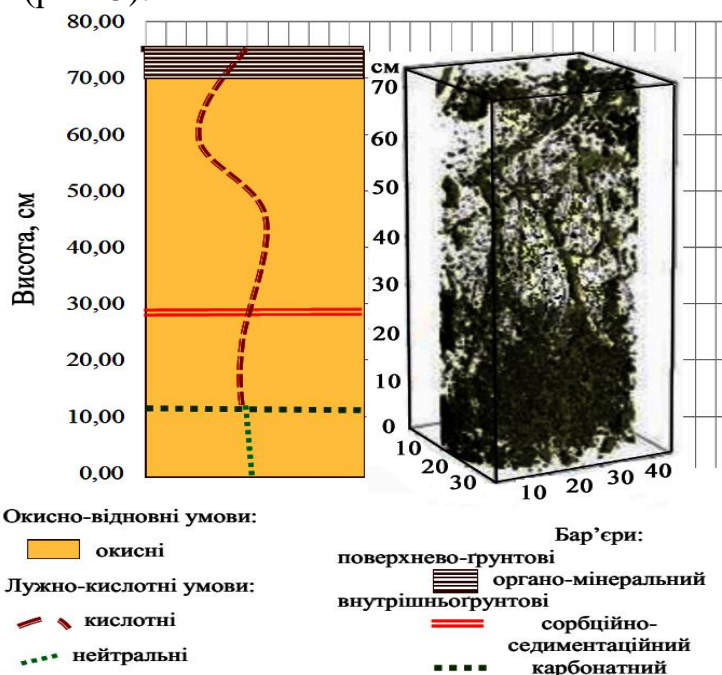


Рисунок 5 – Модель ґрунтово-геохімічної системи зі структурою пор у сірих лісових ґрунтах за модельним профілем

Здійснено математичний опис частки надходження запасів ВМ ($ЧЗ_{Me}$) на певну глибину ґрунтового профілю за рік (м/рік або см/рік) з фосфогіпсових відвалів таким чином:

– за початкової умови $t_1 - t_0 < t < t_1$

$$ЧЗ_{Me} = \left[1 - \exp\left[-\gamma_L (t - (t_1 - t_0))\right] \right] \cdot \left(\frac{v_B \cdot F_h \cdot l}{L \cdot R \cdot \gamma_L} \right) \cdot 365 \alpha_{\text{біокс}}; \quad (1)$$

– за початкової умови $t_1 \leq t$

$$ЧЗ_{Me} = \left[-\gamma_L (t - t_1) \right] \left[1 - \exp(-\gamma_L \cdot t_0) \right] \cdot \left(\frac{v_B \cdot F_h \cdot l}{L \cdot R \cdot \gamma_L} \right) \cdot 365 \alpha_{\text{біокс}}, \quad (2)$$

де γ_L – частка розчинних форм ВМ із загального їх обсягу, за рік; t – час моніторингу, рік; t_1 – відрізок часу, за який можуть надійти ВМ разом із ґрунтовими водами у водний об'єкт, рік; t_0 – час вимивання компонентів (ВМ), що містяться у фосфогіпсі, в ґрунтові води, рік; v_B – горизонтальна складова

швидкості руху ґрунтових вод, м/рік; F_h – поправковий коефіцієнт для дисперсії; l – глибина залягання ґрунтових вод, м; L – довжина відвалу відходів у напрямку, паралельному водоносному потоку, м; R – коефіцієнт утримання; $\alpha_{\text{біокс}}$ – коефіцієнт, за допомогою якого враховано динаміку розвитку біотичної складової ґрунту в процесі біоокиснення і біотрансформації компонентів фосфогіпсу в процесі мінералізації та гуміфікації органічного субстрату, що можна визначити за формулою, доба⁻¹:

$$\alpha_{\text{біокс}} = \frac{\mu_m \cdot S_{\text{орг}}}{K_S + S_{\text{орг}}} \cdot K_T, \quad (3)$$

де μ_m – максимальна питома швидкість росту ґрунтових груп мікроорганізмів-індикаторів глибини мінералізації органічного субстрату в ґрунті, доба⁻¹; $S_{\text{орг}}$ – сумарна концентрація субстрату, г/см³; K_S – константа насичення за субстратом, г/см³; K_T – коригувальний коефіцієнт.

Відповідно до експериментальних і розрахункових даних побудований графік еволюції глибини залягання «центра мас» вертикального розподілу свинцю в ґрунті (рис. 6). Усереднивши значення центра мас прямою лінією, одержано значення коефіцієнта напрямного перенесення $w = 0,19$ см/рік, що відповідає розрахунковим значенням $ЧЗ$ за свинцем ($ЧЗ_{\text{Pb}}$). «Розкид» отриманих положень «центра мас» пояснюється впливом на вертикальну міграцію метеорологічного, геохімічного факторів і біотичної складової ґрунту.

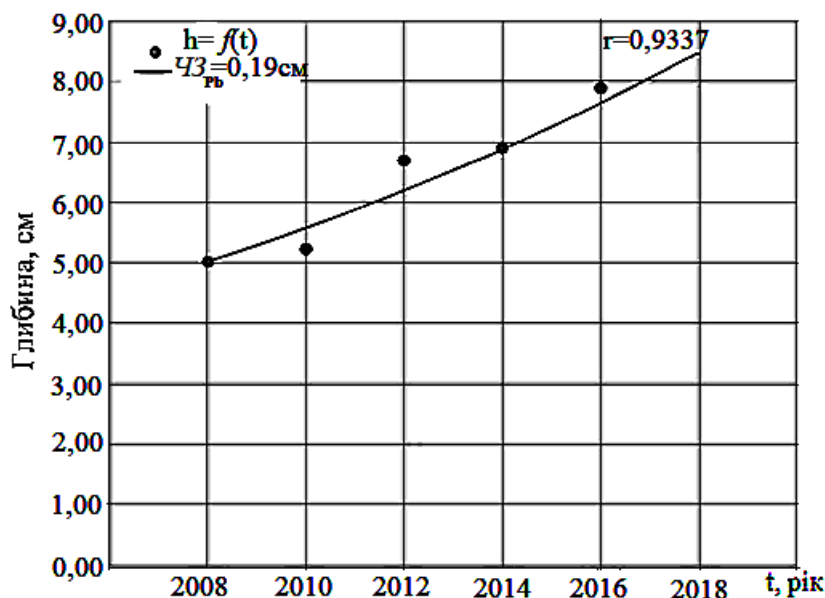


Рисунок 6 – Порівняльний аналіз експериментальних даних і результатів математичного моделювання вертикального розподілу щільності забруднення ґрунту свинцем ($r = 0,9337$)

Одержані результати свідчать про досить повільний зсув концентрації ВМ углиб ґрунтового профілю, що може бути спричинено впливом ряду факторів на їх вертикальну міграцію, зокрема, впливом власне буферних

властивостей ґрунтового комплексу та якісних характеристик сполук металів, що надходять із масиву відвалу в малорозчинній формі.

Отже, еколого-синергетичний підхід є інтегрованою сукупністю принципів та прийомів оцінювання екосистемних змін в умовах зростаючого впливу техногенного чинника з урахуванням синергетичних механізмів розвитку природно-антропогенних процесів для обґрунтування напрямів екологічно безпечної утилізації відходів, на прикладі фосфогіпсу у технологічних рішеннях захисту НС. При застосуванні цього підходу до напрямів утилізації відходів він набуває значення синергії розроблення еколого-орієнтованих технологічних рішень їх конверсії в процесі очищення природних компонентів довкілля на автокаталітичних засадах нерівноважних систем.

У четвертому розділі з метою природно-ефективного вирішення завдань утилізації відходів виробництва запропоновано використання положень еколого-синергетичного підходу, а як приклад надано інтегровану систему утилізації фосфогіпсу з відповідним використанням екологічно безпечних технологічних рішень (рис. 7).

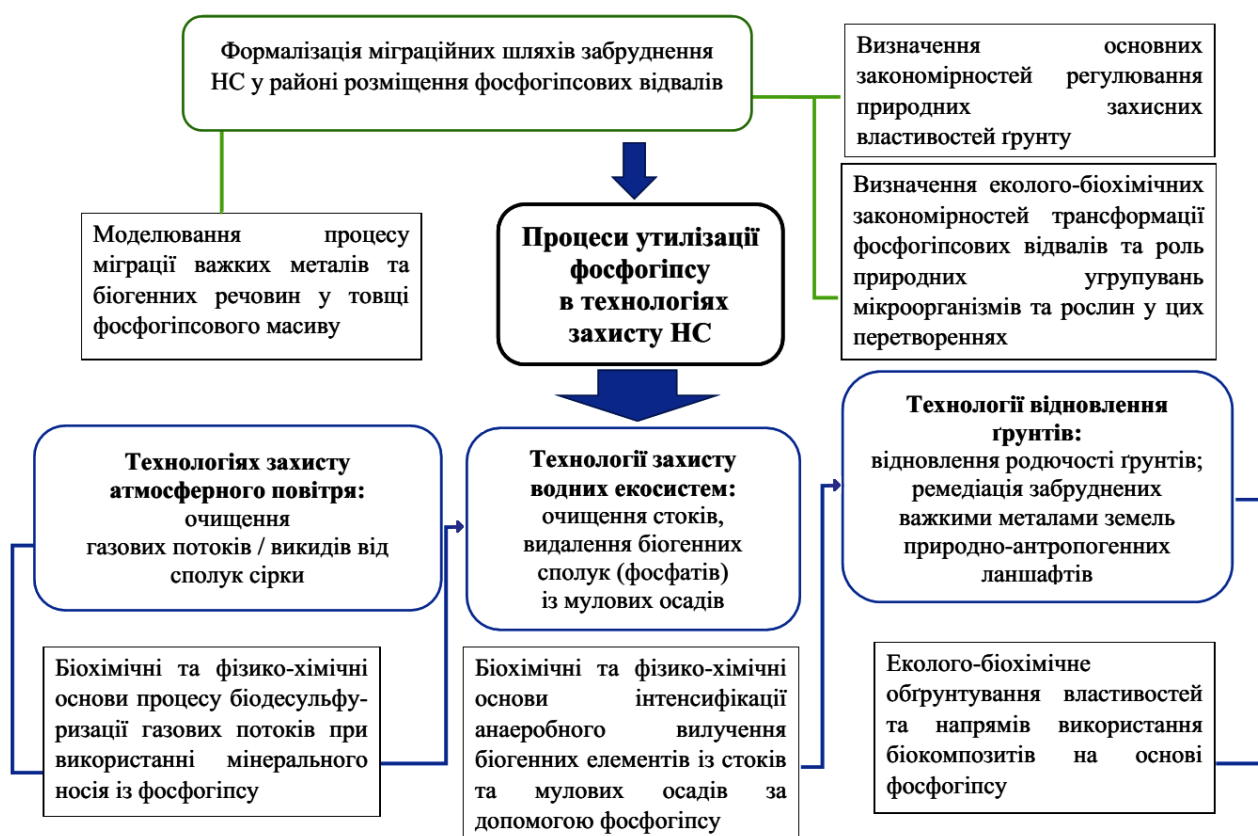


Рисунок 7 – Схематичне відображення послідовності взаємодій процесів конверсії фосфогіпсу в технологічних рішеннях захисту навколишнього середовища

Для оцінювання ефективності використання фосфогіпсу як мінерального субстрату різними групами мікроорганізмів у технологіях захисту НС запропонована схема взаємодії продуктів процесів конверсії фосфогіпсу в

різних технологічних рішеннях з елементами природних середовищ з урахуванням еколого-синергетичних механізмів (рис. 8).

Отже, у процесі біохімічних трансформацій токсичних сполук в умовах розвитку біотичної компоненти на носії з фосфогіпсу одержують системний довготривалий екологічний ефект, що полягає у вилученні корисних біогенних компонентів із відвалів та їх подальшої утилізації в сільському господарстві (наприклад, біосірки і сполук фосфору); підтримання умов фіксації токсичних речовин для обмеження шляхів їх надходження в наземні екосистеми (зокрема, осадження ВМ у комплексі малорозчинні/нерозчинні сполуки).

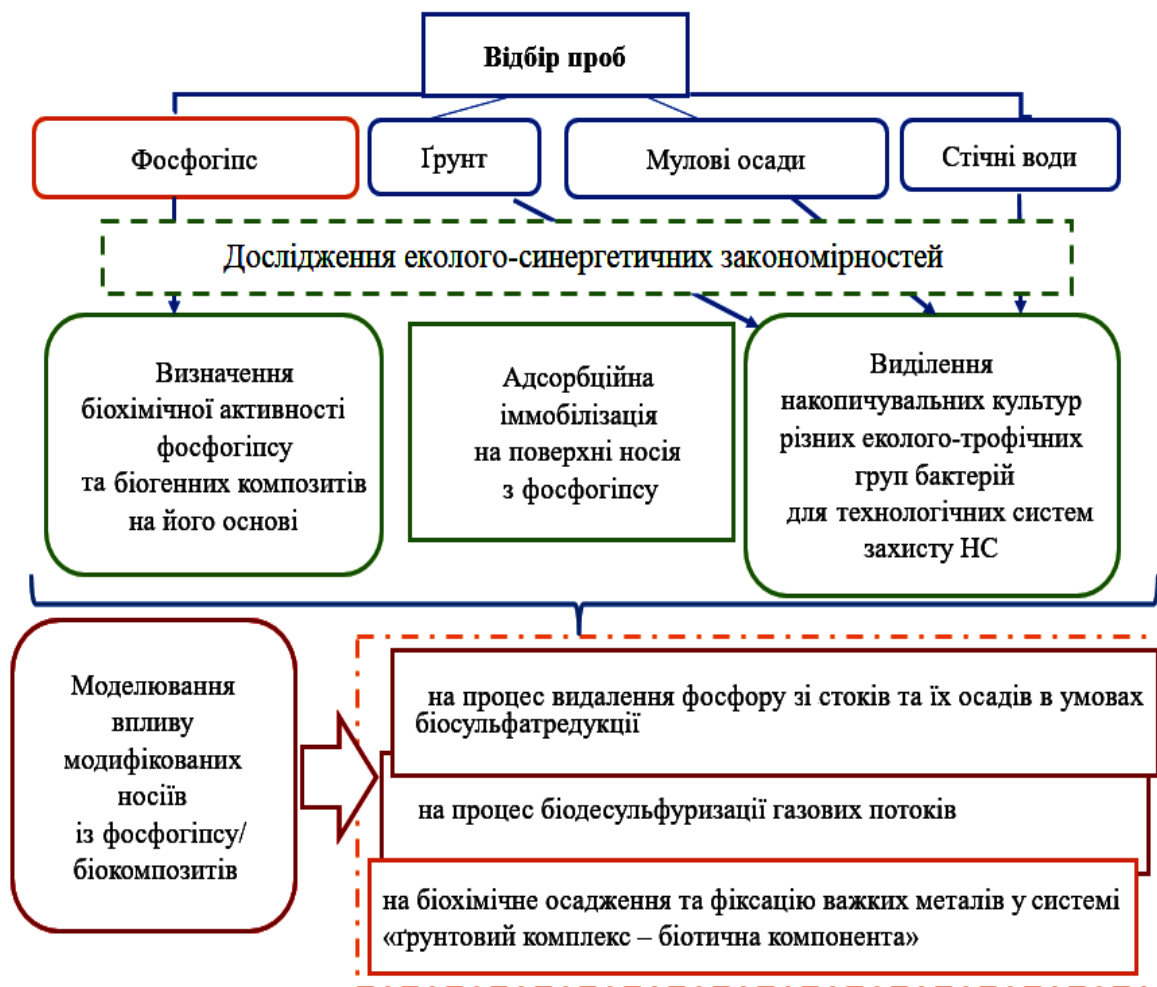


Рисунок 8 – Схема дослідження процесів самоорганізації природно-техногенних систем на основі еколого-синергетичних механізмів нівелювання негативних впливів

На основі положень екологічної безпеки розроблена еколого-синергетична модель впливу фосфогіпсу як вторинного ресурсу при його використанні в технологіях захисту НС (рис. 9) за умови наявності різних еколого-трофічних груп мікроорганізмів.

Здійснена теоретична та експериментальна оптимізація фізико-хімічних параметрів формування фосфогіпсового завантаження як одного із різновидів біокомпозиту з урахуванням особливостей розвитку біоплівки на його поверхні.

За одержаними результатами впливу розміру гранул фосфогіпсу (d_{ϕ}) на біохімічну активність (BIO_x), що відповідає приросту матриксу тіобактерій (КУО/г) на поверхні гранул, визначено такі рівнянням регресії:

$$BIO_x = -6,0 \cdot 10^8 \cdot d_{\phi}^2 + 7,0 \cdot 10^9 \cdot d_{\phi} - 7,0 \cdot 10^9, \quad (4)$$

для якого коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9608$, стандартна похибка оцінювання $-0,1823$.



Рисунок 9 – Блок-схема напрямів використання фосфогіпсу як вторинного ресурсу в технологіях захисту навколишнього середовища з урахуванням еколого-синергетичних механізмів

Вплив факторів X_1 (час окатування) та X_2 (вологість фосфогіпсу в процесі оброблення) на формування оптимального розміру гранул (Y_1) апроксимується таким рівнянням регресії:

$$M(Y_1) = 215,34 - 190,27 \cdot X_1 + 65,21 \cdot X_2 - 20,46 \cdot X_1^2, \quad (5)$$

для якого коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9987$, стандартна похибка оцінювання $-0,2120$.

Визначено, що необхідний розмір гранул, який забезпечує формування цільових зон розвитку бактеріального матриксу з домінуванням аеробних тіобактерій, є гранули діаметром 4–5 мм при підтриманні вологості 32 % та часу оброблення 15 хвилин.

Досліджено та науково обґрунтовано зони домінантності метаболічної активності груп мікроорганізмів у гранулах відповідно до задіяних акцепторів електронів. Графік на рисунку 10 засвідчує, що при збільшенні глибини проникнення біоплівки в середину гранул спостерігається виникнення анаеробної зони розвитку сульфатредукторів, що потребує обмеження, це й було здійснено за допомогою оптимізації розміру гранул.

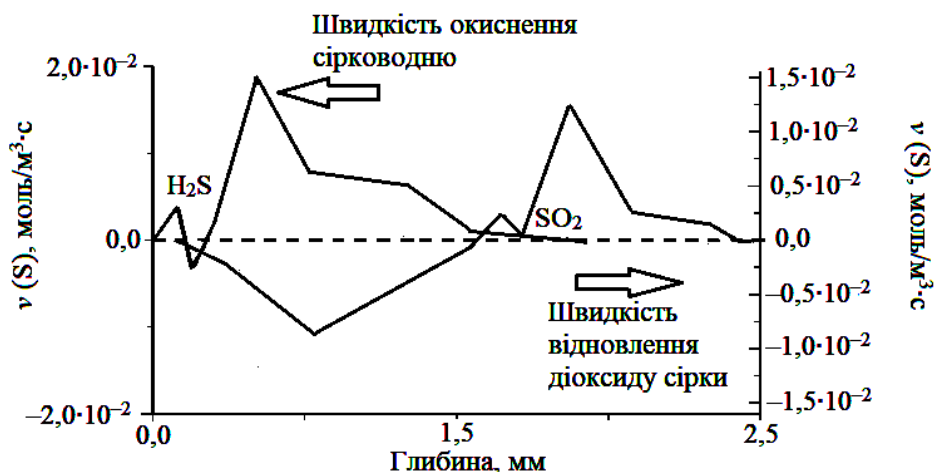


Рисунок 10 – Профілі швидкості окиснення H₂S та відновлення SO₂ за різною глибиною проникнення біоплівки у гранулу фосфогіпсу

На рисунках 11 і 12 наведено залежність впливу додавання дози вапна та солі біоактивного металу MnSO₄ на біохімічну активність гранул із фосфогіпсу відповідно.



Рисунок 11 – Залежність приросту бактеріальної маси від додавання дози вапна при формуванні модифікованих гранул фосфогіпсу

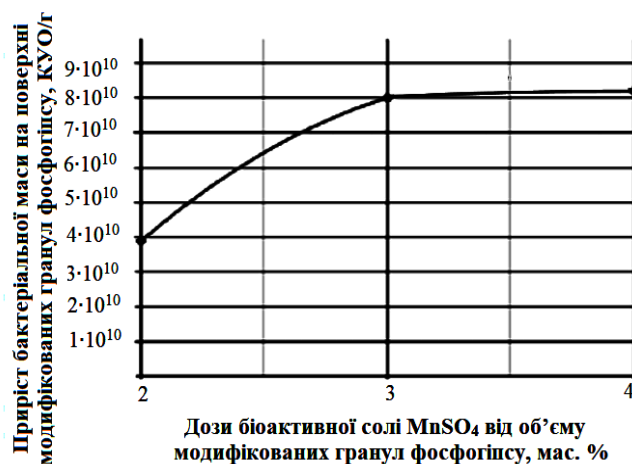


Рисунок 12 – Залежність приросту бактеріальної маси від додавання дози MnSO₄ при формуванні модифікованих гранул фосфогіпсу

Вплив дози вапна (X_3), що вводиться на стадії формування гранул, на біохімічну активність (BIO_x), яка відповідає приросту бактеріального матриксу (КУО/г) на поверхні гранул, апроксимується рівнянням регресії:

$$BIO_x = -7,0 \cdot 10^8 \cdot X_3^2 + 4,0 \cdot 10^9 \cdot X_3 + 4,0 \cdot 10^9 \quad (R^2 = 0,8834). \quad (6)$$

Механізм взаємодії вапна і фосфогіпсу полягає в підвищенні гідрофобних властивостей гранул. При цьому інгібування розвитку мікроорганізмів не спостерігалось за дози вапна в межах від 3 мас.% до 5 мас.%.

Стимулювання розвитку необхідних еколого-трофічних груп мікроорганізмів відбувається починаючи з дози біоактивної солі 2 % $MnSO_4$ від об'єму фосфогіпсу. Зі збільшенням дози додавання $MnSO_4$ до 3 % досягається стабільний розвиток тіобактерій на рівні 10^{10} КУО/г з максимальним ростом до 10^{11} КУО/г.

Вплив дози біоактивної солі (X_4), що вводиться на стадії формування модифікованих гранул фосфогіпсу, на біохімічну активність (BIO_x) апроксимується рівнянням регресії:

$$BIO_x = 2,0 \cdot 10^{10} X_4^2 + 1,0 \cdot 10^{11} X_4 - 2,0 \cdot 10^{11} \quad (R^2 = 0,9987). \quad (7)$$

Основні принципи технології отримання екологічно безпечного мінерального носія на основі фосфогіпсу захищено патентом України на винахід. Показники залежності ефективності окиснення сульфідів від розміру гранул із внутрішньою іммобілізацією мікроорганізмів відрізняються від показників фосфогіпсових гранул із сорбційною іммобілізацією на поверхні. Це пов'язано з різними механізмами закріплення біомаси на носіях із фосфогіпсу.

У п'ятому розділі здійснене наукове обґрунтування еколого-синергетичних процесів екологічно безпечної утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту атмосферного повітря.

Дослідження процесів газоочищення з іммобілізацією мікроорганізмів на мінеральному носії, що виготовлений на основі фосфогіпсу, пов'язані з виявленням і урахуванням самоорганізаційних механізмів, які є складовою частиною еколого-синергетичних закономірностей видалення сполук сірки із газів.

У серії експериментів проводили варіювання значень фізико-хімічних параметрів (факторів) процесу біохімічного очищення газових потоків для досягнення максимальної ефективності очищення ($E\Phi O$) газових потоків від сполук сірки. Варіювання факторів здійснювали в межах: час контакту при очищенні біогазу (X_1^*) та газової суміші (X_{1}^{**}) – від 0,5 год до 2,5 год та від 5 год до 15 год відповідно, рН (X_2^*) – від 4,0 од. до 6,5 од., концентрація сірководню в біогазі (X_3^*) та в газовій суміші (X_3^{**}) – від 250 ppm до 850 ppm та від 10 % до 30 % відповідно, час між періодами вимивання біосірки з поверхні модифікованих гранул фосфогіпсу (X_4^*) – від 25 діб до 65 діб.

Також було досліджено вплив факторів X_3^* , X_3^{**} та X_4^* на величину втрати завантаження з фосфогіпсу M (Y_2) у процесі роботи біофільтра, яку визначали як відсоток від загального об'єму модифікованих гранул, внесених початково у простір біореактора. Крім того, визначали оптимальну дозу дозавантаження модифікованих гранул фосфогіпсу для підтримання високої ефективності

процесу газоочищення та залежність концентрації біосірки, що видаляється з біофільтра під час очищення газових потоків, від часу промивання біофільтра.

Як бачимо з рисунку 13, зі збільшенням часу контакту (X_1^*) біогазу в просторі біофільтра відбувалося збільшення інтенсивності конверсії сірководню і стабілізації ефективності очищення на високому рівні (більше ніж 95 %) упродовж 1,5 години, подальше збільшення часу контакту не спричиняло зростання ефективності видалення H_2S .

Вплив часу контакту (X_1^*) і значення рН (X_2^*) на ефективність очищення біогазу від сірководню апроксимується таким рівнянням регресії за вмісту сірководню 850 ppm у біогазі:

$$E\Phi O = -423,038 + 126,762 \cdot X_1^* + 153,804 \cdot X_2^* - 40,15 \cdot X_1^{*2} - 2,509 \cdot X_1^* \cdot X_2^* - 14,925 \cdot X_2^{*2}, \quad (8)$$

для якого коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9515$, стандартна похибка оцінювання $-0,2130$.

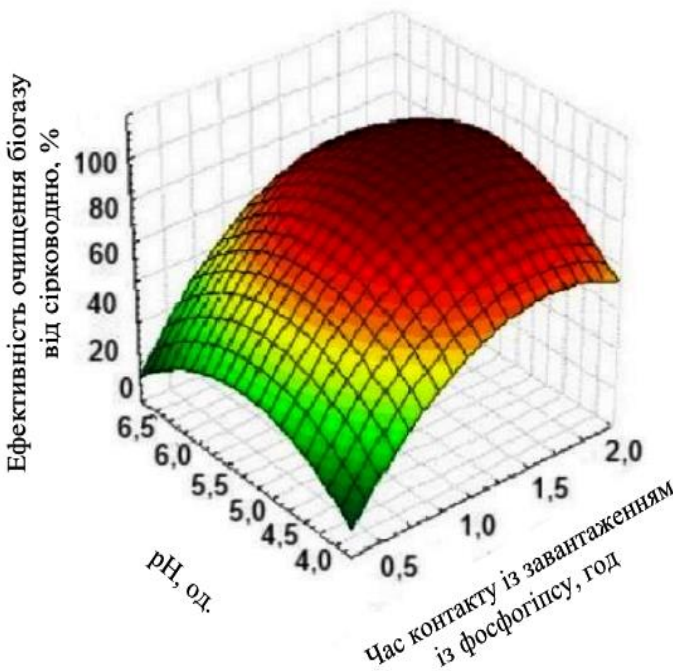


Рисунок 13 – Залежність ефективності очищення біогазу від значень рН та часу контакту із завантаженням із фосфогіпсу

Отже, визначено, що максимальний ступінь видалення H_2S із біогазу становив 99 % за рН = 5,0 од. і часом контакту 1,5 години, а ріст бактерій досягав $3,9 \cdot 10^{10}$ КУО/г.

Найменша ефективність очищення біогазу відбувалася за значення рН = 6,5 од. і в середньому становила 68 % за вмісту сірководню 850 ppm від об'єму газового потоку. Найбільший ступінь видалення H_2S досягався в інтервалі значень рН від 5,0 од. до 5,5 од., що свідчило про розвиток природних ацидофільних груп тіобактерій, безпосередньо задіяних в очищенні газової фази від домішок.

Вплив часу контакту (X_1^*) і значення рН (X_2^*) на ефективність очищення газового потоку від сірководню апроксимується таким рівнянням регресії для різних концентрацій сірководню в газовій суміші за вмісту сірководню 30 % від загального об'єму газової суміші:

$$E\Phi O = -360,45 + 36,05 \cdot X_1^* + 102,55 \cdot X_2^* - 1,46 \cdot X_1^{*2} - 0,251 \cdot X_1^* \cdot X_2^* - 10,38 \cdot X_2^{*2}, \quad (9)$$

для якого коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9678$, стандартна похибка оцінювання $-0,1780$.

Для досягнення ефективності очищення вище ніж 95 % за вмісту сірководню більше ніж 10 % у газовій суміші час контакту збільшувався до 10 годин за значень рН від 5,0 од. до 5,5 од., що свідчило про збільшення періоду адаптації бактеріальної асоціації до високих концентрацій сполук сірки і впливало на ефективність газоочищення.

Вплив таких факторів, як концентрація сірководню в біогазі (X_3^*) та інших газових потоках (X_3^{**}), час між періодами вимивання біосірки (X_4^*) на величину втрати завантаження з фосфогіпсу в біофільтрі, апроксимується такими рівняннями регресії:

– для стандартних систем біодесульфуризації

$$M(Y_2) = -19,162 + 2,091 \cdot X_3^* + 0,08 \cdot X_4^* - 0,361 \cdot X_3^{*2}, \quad (10)$$

для якого коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9586$, стандартна похибка оцінювання – 0,4103;

– для високонавантажених за сірководнем систем біодесульфуризації

$$M(Y_2) = -20,6686 - 0,1695 \cdot X_3^{**} + 1,1676 \cdot X_4^* + 0,016 \cdot X_3^{**2} + 0,059 \cdot X_3^{**} \cdot X_4^* - 0,097 \cdot X_4^{*2}, \quad (11)$$

для якого коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9672$, стандартна похибка оцінювання – 0,3811.

Графік на рисунку 14 засвідчує, що при збільшенні концентрації сірководню в біогазі необхідно збільшувати дозу дозавантаження модифікованих гранул фосфогіпсу.

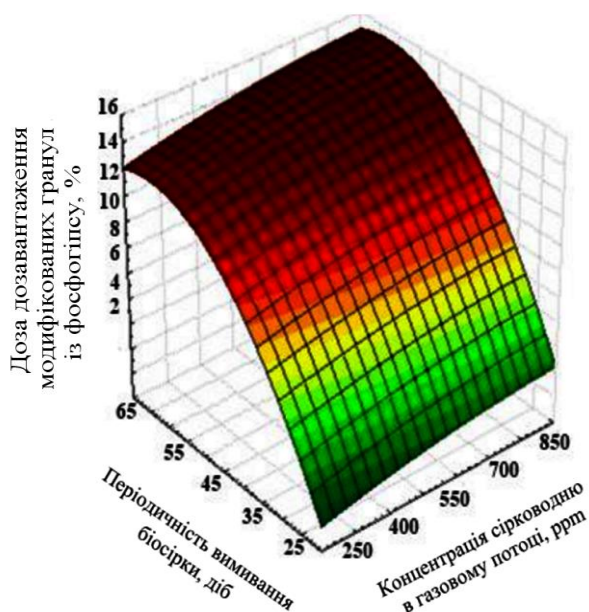


Рисунок 14 – Динаміка зміни об'єму дозавантаження з фосфогіпсу в біофільтрі залежно від часу між періодами вимивання біосірки та концентрації сірководню в біогазі

Ефективність очищення біогазу була постійною за величини втрати завантаження з фосфогіпсу у межах 12,0–12,5 % від загального об'єму завантаження.

Починаючи з величини втрати завантаження з фосфогіпсу 13,5–15,0 %, спостерігалася тенденція до зменшення приросту бактеріального матриксу на поверхні модифікованих гранул та відповідно ефективність газоочищення зменшувалася на 1,3–5,4 % (рис. 14) і становила в середньому 94,5 %. Максимальний вихід біосірки при очищенні біогазу становив 99,3 г/дм³ водного розчину, а при очищенні газових потоків із високим умістом сірководню (30 %) – 149 г/дм³.

За одержаними результатами (рис. 15 а, б) вплив величини втрати завантаження з фосфогіпсу ($D_{ГФ}$) за різних концентрацій сірководню в газовому потоці (X_3^* , X_3^{**}) на ефективність очищення апроксимується рівняннями регресії:

– при очищенні біогазу

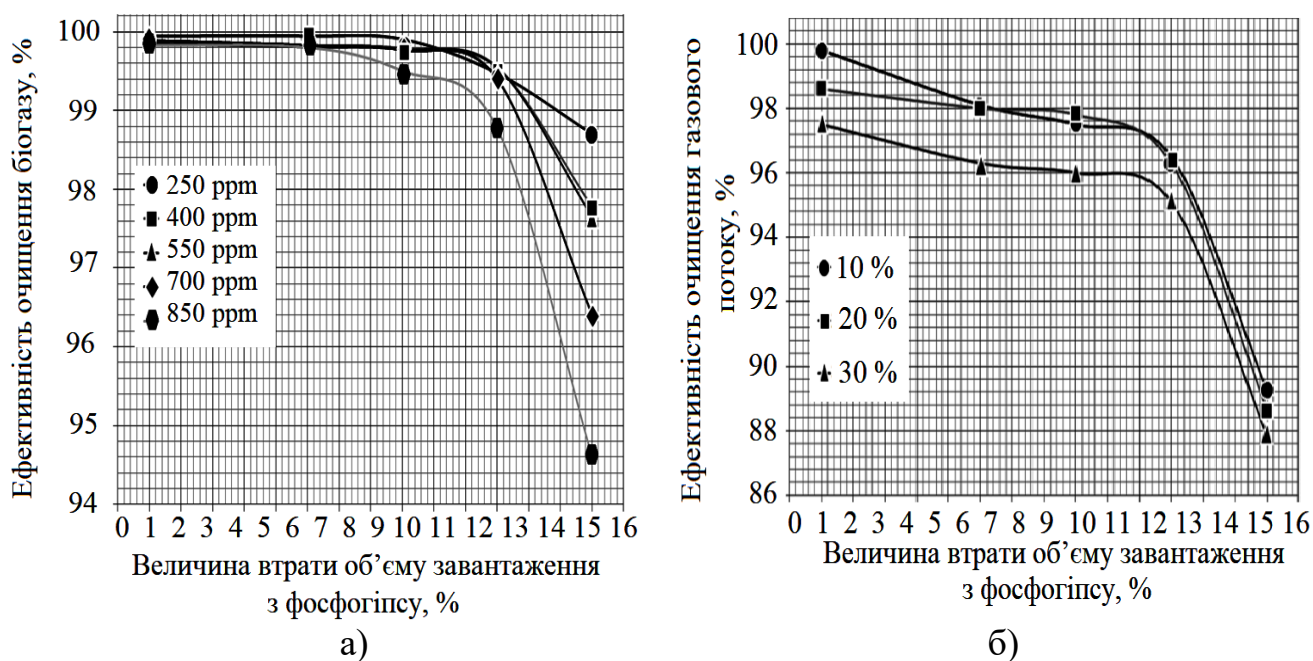
$$EFO = 97,8388 + 5,094 \cdot D_{ГФ} + 0,48 \cdot X_3^* - 0,301 \cdot D_{ГФ}^2, \quad (12)$$

для якого коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9645$, стандартна похибка оцінювання – 0,4212;

– при очищенні газових потоків із високим вмістом сполук сірки (до 30 % від загального об'єму)

$$EFO = 101,1497 - 10,875 \cdot D_{ГФ} - 1,27 \cdot X_3^{**} - 0,461 \cdot D_{ГФ}^2, \quad (13)$$

для якого коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9578$, стандартна похибка оцінювання – 0,3910.



а) – біогаз із вмістом сірководню в ppm; б) – газова суміш визначеного складу з вмістом сполук сірки у %

Рисунок 15 – Залежність ефективності газоочищення від величини втрати завантаження з фосфогіпсу в процесі роботи біофільтра

Із зменшенням об'єму фосфогіпсового завантаження спостерігалася тенденція до зменшення «осередків» біоокиснення на поверхні фосфогіпсових гранул. Для оцінювання окисної здатності біоплівки було запропоновано враховувати режимні параметри системи і фізико-хімічні властивості завантаження на основі фосфогіпсу. Взято до уваги саме активну поверхню біофільтра ($S_{п.п.}$), яка враховує лише поверхню біофільтра, що містить

бактеріальну плівку, тобто питому площу поверхні біоплівки, розвинену на мінеральному носії з фосфогіпсу:

$$OЗБ = \left(\frac{S_{п.п.} \cdot V_{ф.з.} \cdot G \cdot D}{\tau_{ф.} \cdot v_{ф.}} \right) \cdot \left[\frac{\mu_{m_1} \cdot X_1 \cdot \Delta C_{H_2S}}{Y_{X_1/S_1} \cdot (K_S + C_{0_{H_2S}}) \cdot K_{pH}} + \frac{\mu_{m_2} \cdot X_2}{Y_{X_2/S_2}} \right] \cdot \alpha_{ф.}, \quad (14)$$

де $OЗБ$ – окисна здатність біоплівки, $г/м^3 \cdot год$; $S_{п.п.}$ – питома площа поверхні біоплівки, $м^2/м^3$; $V_{ф.з.}$ – об'єм фільтруючого завантаження з фосфогіпсу, $м^3$; G – коефіцієнт розміру окатишів завантаження, який знаходимо як $100/R$, де R – характерний розмір гранул, $10^{-3}м$; $\tau_{ф.}$ – час утримання газорідинної фази в біофільтрі, год; $v_{ф.}$ – швидкість фільтрації газового потоку, $м^2/год$; D – діаметр біофільтра, м; μ_{m_1} та μ_{m_2} – питома швидкість росту тіобактерій та нітрифікуючих бактерій відповідно, $год^{-1}$; ΔC_{H_2S} – навантаження за сульфідом, $г/м^3$; X_1 та X_2 – концентрація біомаси тіобактерій та нітрифікуючих бактерій відповідно, $г/10^{-3}м^3$; Y_{X_1/S_1} та Y_{X_2/S_2} – економічний коефіцієнт виходу біомаси тіобактерій і нітрифікуючих бактерій за субстратом – сірководнем і аміаком відповідно; $C_{0_{H_2S}}$ – початкова концентрація сірководню в газовому потоці, $г/м^3$; K_S – константа насичення за субстратом, $г/м^3$; K_{pH} – константа, що враховує кислотно-лужний баланс середовища; $\alpha_{ф.}$ – поправковий коефіцієнт.

Розроблено науково-теоретичні основи створення технологічних схем утилізації відвального фосфогіпсу в технологіях захисту атмосферного повітря зі створенням екологічно безпечної технології оброблення фосфогіпсу та отриманням корисних продуктів його утилізації (рис. 16).



Рисунок 16 – Принципова схема екологічно безпечних процесів утилізації фосфогіпсу як мінерального носія в системах біохімічного очищення

дефосфатації. Еколого-синергетичний підхід пов'язаний із формуванням емерджентних властивостей природно-технологічних систем рекуперації й утилізації різних видів відходів, що створюються в процесі самоорганізації та нелінійного розвитку діючих біологічних і хімічних агентів.

У результаті проведених досліджень процесу видалення фосфатів з МО міських очисних споруд шляхом анаеробної стабілізації в умовах сульфатредукції з використанням дигідратного фосфогіпсу як мінеральної добавки було визначено залежність процесу відновлення фосфатів ($M(Y_3)$) від факторів: дози фосфогіпсу (ФГ) – X_1 , співвідношення між величиною ХСК та ФГ – X_2 .

Зниження концентрацій фосфогіпсу мало тісний кореляційний зв'язок із процесом вивільнення фосфат-іонів, що показано на рисунку 19.

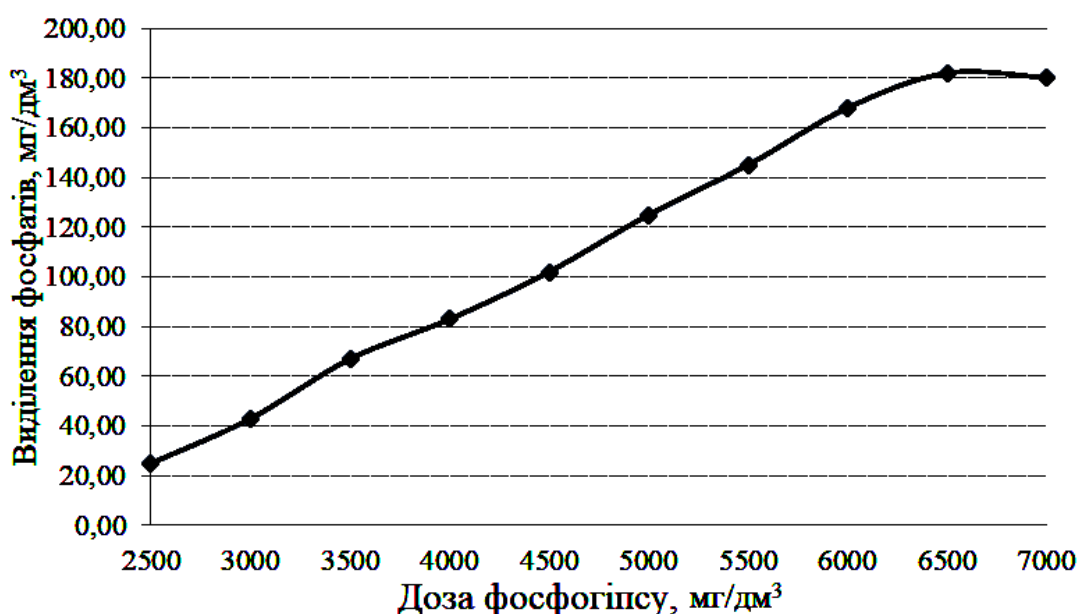


Рисунок 19 – Графік залежності між концентрацією вивільнених фосфатів та дозою фосфогіпсу в процесі анаеробної стабілізації мулових осадів

Одержана залежність процесу відновлення фосфатів ($M(Y_3)$) від концентрації дигідратного фосфогіпсу (X_1) апроксимується рівнянням регресії:

$$M(Y_3) = 0,0283 X_1^2 + 20,014 X_1 + 2137,9 \quad (R^2 = 0,9837). \quad (15)$$

Отже, із збільшенням концентрації фосфогіпсу до значення 7 000 мг/дм³ не спостерігалось подальшого зростання фосфатів у розчині. Відповідно оптимальним є дозування фосфогіпсу не більше ніж 6 500 мг/дм³.

У результаті активності анаеробних груп мікроорганізмів за дії фосфогіпсу спостерігалось збільшення концентрації фосфатів у розчині в 3–5 разів залежно від дозування (рис. 20).

Для розуміння синергічного ефекту сумісного впливу навантаження за ХСК та концентрації фосфогіпсу на метаболічну активність анаеробних груп мікроорганізмів у процесі вивільнення фосфатів було досліджено вплив

співвідношення ХСК до вмісту дози фосфогіпсу (ХСК/ФГ) на відновлення фосфатів (рис. 21).

За одержаними результатами вплив на відновлення фосфатів ($M(Y_3)$) із МО співвідношення ХСК/ФГ (X_2) апроксимується рівнянням регресії:

$$M(Y_3) = -16557 X_2^2 + 4058,3 X_2 - 62,653 \quad (R^2 = 0,9892). \quad (16)$$

Разом із збільшенням значення ХСК/ФГ до 0,1 спостерігалось збільшення кількості виділених фосфатів у розчин. При подальшому збільшенні співвідношення ХСК/ФГ зростання концентрації фосфат-іонів не спостерігалось.

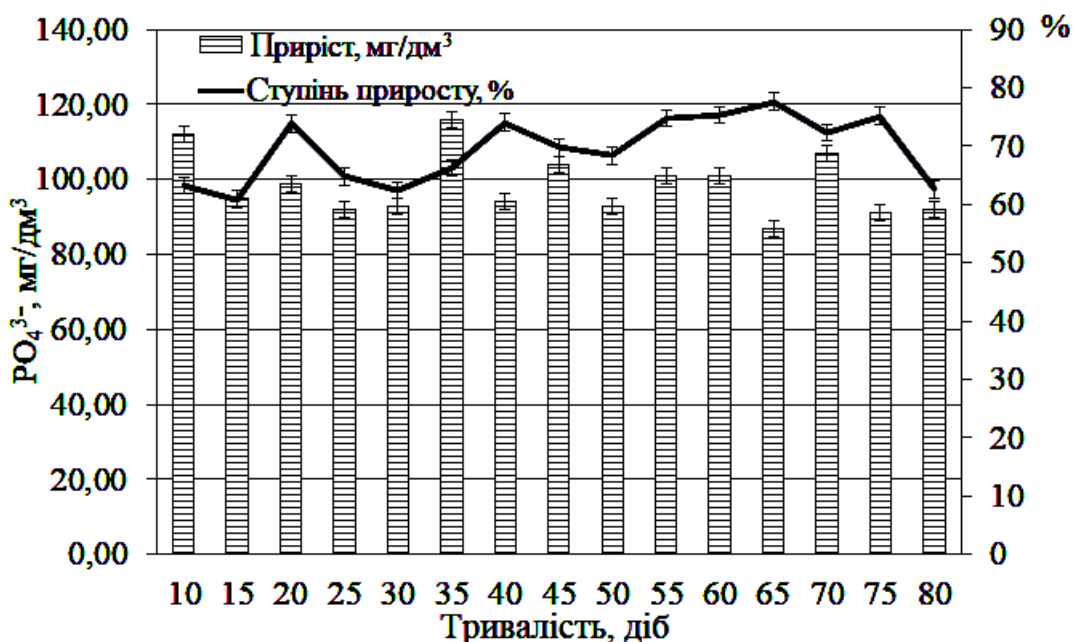


Рисунок 20 – Приріст концентрації фосфат-аніонів у розчинні після процесу анаеробної стабілізації мулових осадів разом із дигідратним фосфогіпсом

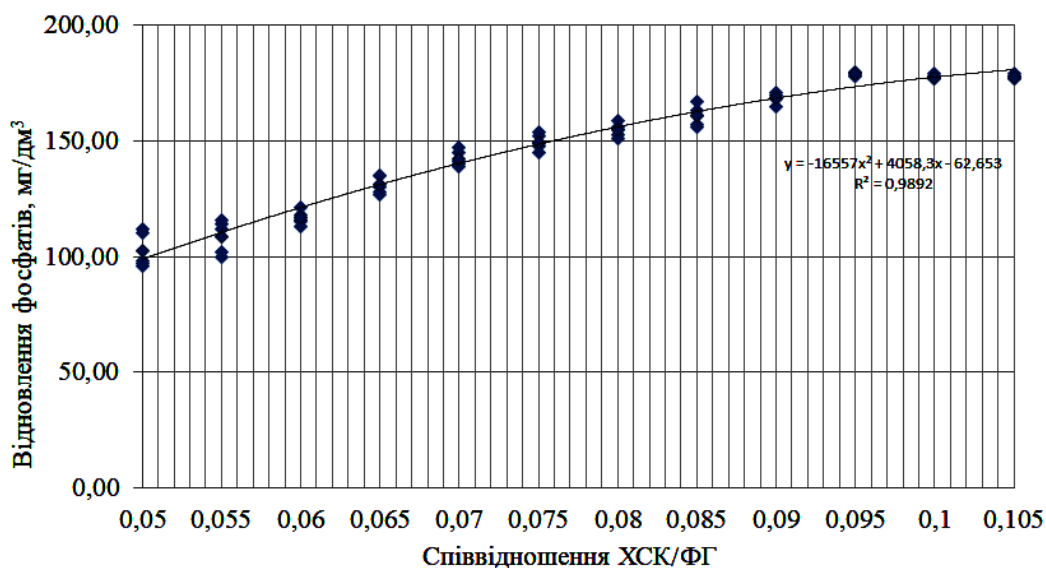


Рисунок 21 – Вплив співвідношення величини ХСК до дози фосфогіпсу на процес виділення фосфатів

Для розроблення технології утилізації фосфогіпсу в процесі біохімічного очищення стоків та МО здійснено моделювання кінетики автокаталізу в анаеробній системі із залученням інструментарію синергетики. Науково обґрунтовано еколого-синергетичні механізми анаеробного вивільнення фосфатів зі стоків і МО у процесі анаеробної стабілізації шляхом уведення в систему дигідратного фосфогіпсу (рис. 22).

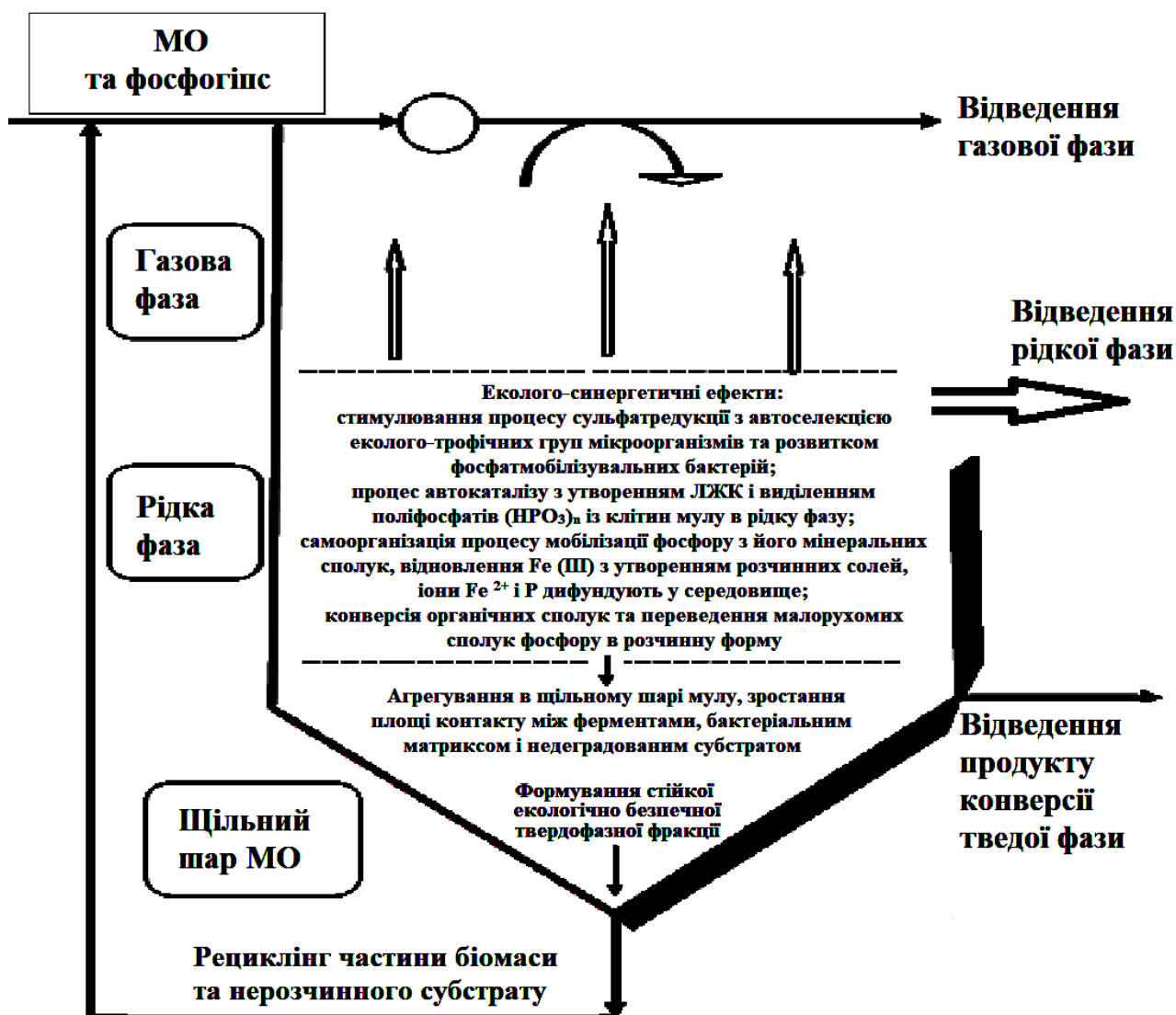
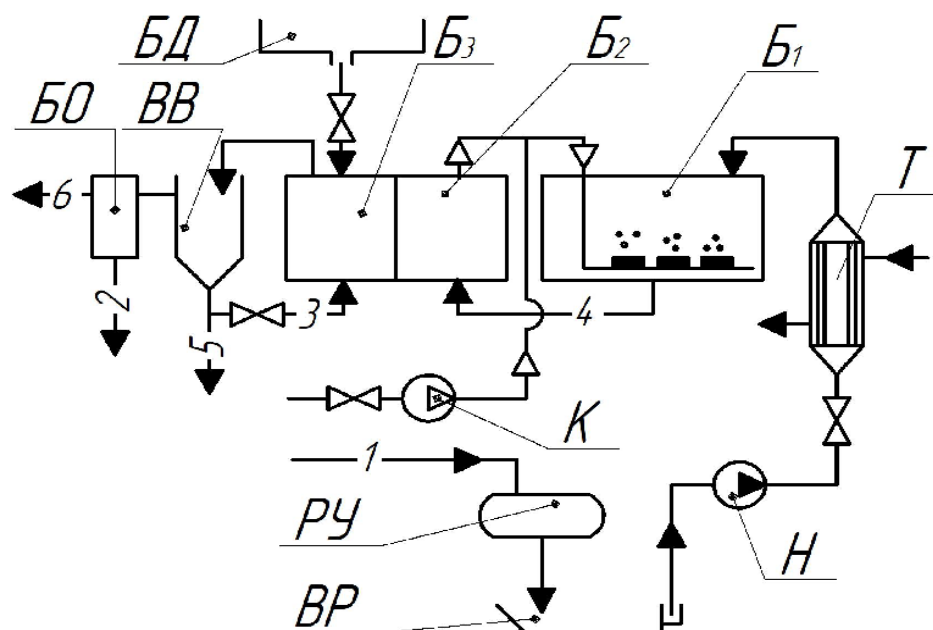


Рисунок 22 – Еколого-синергетична концепція дефосфатації мулових осадів разом із фосфогіпсом у процесі анаеробної стабілізації

Отже, здійснюється стимулювання розвитку сульфатредукторів, які виділяють продукти власного метаболізму в середовище та опосередковано стимулюють діяльність фосфатмобілізувальних мікроорганізмів й інтенсифікують виділення фосфат-іонів у розчин, що відбувається на принципах автоселекції на засадах еколого-синергетичної концепції досліджень.

Розроблено технологічне рішення очищення стоків та МО разом із фосфогіпсом (рис. 23), що включає аеробно-анаеробний процес конверсії,

забезпечує просторову сукцесію мікроорганізмів і трофічний ланцюг гідробіонтів із залученням техногенних мінеральних ресурсів (фосфогіпсу) для стимулювання розвитку необхідних еколого-трофічних груп.



1 – вхідний потік на очищення; 2 – осад, що містить осаджені сполуки фосфору; 3 – рециклінг частки зброджених МО; 4 – нітратний оборотний цикл; 5 – утворений органо-мінеральний продукт на утилізацію;

6 – очищена рідка фаза;

РУ – резервуар-усереднювач; ВР – радіальний відстійник; Н – насос;

Т – теплообмінник; Б₁ – аеробний біореактор; Б₂ – анаеробний біореактор для здійснення стадії денітрифікації (факультативний анаеробіоз); Б₃ – анаеробний біореактор для здійснення стадії дефосфатації в умовах сульфатредукції з виділенням сполук фосфору (облігатний анаеробіоз); БД – бункер-дозатор дигідратного фосфогіпсу;

ВВ – вторинний відстійник; БО – бункер осадження для реагентного видалення фосфору з рідкої фази; К – компресор

Рисунок 23 – Технологічна схема процесу очищення стоків та мулових осадів із використанням дигідратного фосфогіпсу

Окремі принципи технології та конструктивне виконання анаеробного блока очищення захищені патентами України.

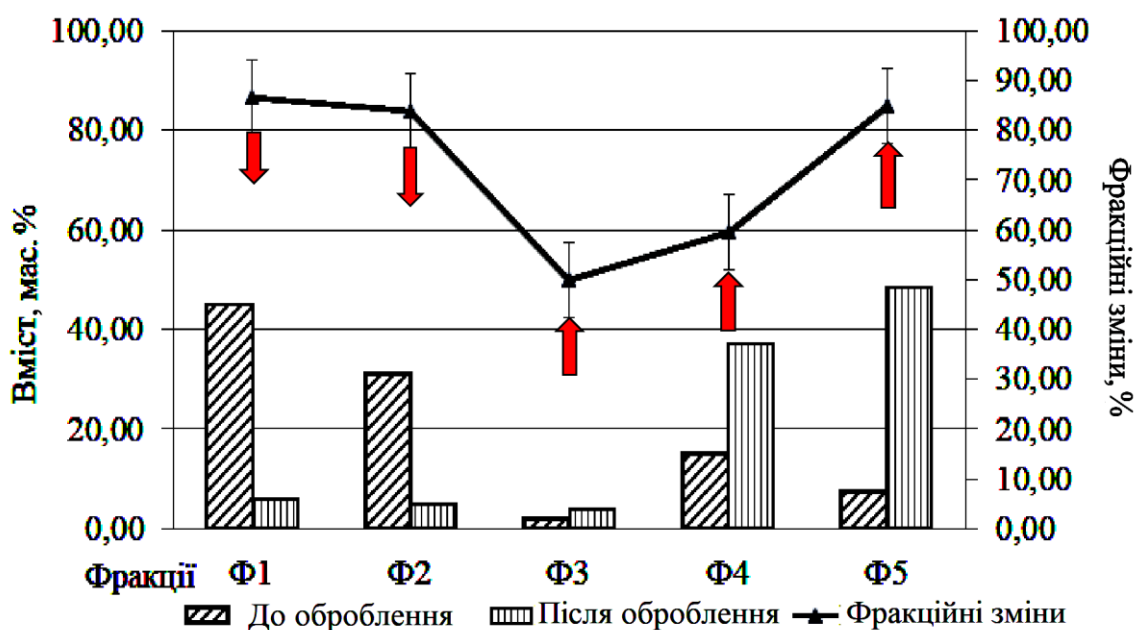
У цьому розділі для підвищення рівня екологічної безпеки природно-антропогенних ландшафтів забруднених ВМ досліджено еколого-синергетичні механізми у системі «грунт – мікробний біом – токсикант» за дії біогенного композита, що є продуктом анаеробної стабілізації МО та фосфогіпсу. Виявлено ряд протекторних чинників, що визначають довгострокову фіксацію ВМ у стійких нерозчинних структурах органо-мінеральних агрегатів, та визначено роль біотичної компоненти ґрунтового комплексу в біохімічному зв'язуванні токсичних речовин при стимулюючому впливі біокомпозиту.

При поверхневому внесенні в ґрунт біокомпозита одержано карту растрового мікроаналізу SEM-EDX 2–3 мм фракції ґрунту, що дозволило визначити основні зміни в процесах мобілізації ВМ.

Мікропольові дослідження проводили в блоках з органічного скла з перфорованим днищем площею 0,20 м² за схемою внесення біокомпозита з розрахунку: 1) 25 т / га; 2) 50 т / га; 3) 75 т / га.

Біогенний композит змішували з 0–20 см шаром навесні до посіву культури (конюшина, люцерна, їх суміші зі злаковими). Ґрунт містить свинець – 21,2 мг/кг, кадмій – 0,55–1,00 мг/кг.

Здійснивши аналіз одержаних результатів мікропольових досліджень, побудовано діаграму зміни фракційного складу металів, зображену на рисунку 24.



Ф1 – оксиди та оксигідроксида феруму і мангану; Ф2 – обмінні форми;
 Ф3 – карбонати, гідроксикарбонати; Ф4 – з органічними речовинами;
 Ф5 – залишкова фракція (силікати та сульфід)

Рисунок 24 – Комбінована діаграма аналізу змін у фракційному складі важких металів у ґрунті до і після внесення біокомпозита

При реалізації заходів відновлення ґрунтового комплексу під час внесення біокомпозита відбувається збільшення частки металів у залишковій фракції, що свідчить про їх міцне зв'язування в мінерально-органічній структурі та недоступність для рослин. Так, у ґрунті після оброблення кислотність становила 6,5 і спостерігалось зменшення обмінної фракції свинцю та кадмію на 84 %. Відбуваються зменшення кількості елементів пов'язаних з гідроксидами та оксидами Fe і Mn на 87 %, та значне збільшення відносної частки залишкової фракції важких металів відповідно з 5,6–9,05 % до 45,3–51,7 %.

На рисунку 25 наведена характеристика впливу різних органо-мінеральних композицій на ступінь зниження рухомих форм ВМ у ґрунті (сірий

лісовий) за тривалості експозиції 2 місяці. При внесенні біокомпозита спостерігався вищий порівняно з іншими органо-мінеральними комплексами ступінь зниження мобільності ВМ (не менше ніж 70 %).



БК – біогенний композит, продукт анаеробної стабілізації МО та фосфогіпсу; ОМК – органо-мінеральний компост на основі суміші фосфогіпсу (10 мас. %), суперфосфату (1 мас. %) і перегною ВРХ;

ГНСФ – комбінація суміші гумату натрію із суперфосфатом (1:1)

Рисунок 25 – Порівняльна характеристика впливу різних органо-мінеральних комплексів на процес зв'язування рухомих форм важких металів

Розроблено принципову еколого-синергетичну модель впливу біокомпозита на захисну функцію ґрунтового комплексу, яку наведено на рисунку 26.

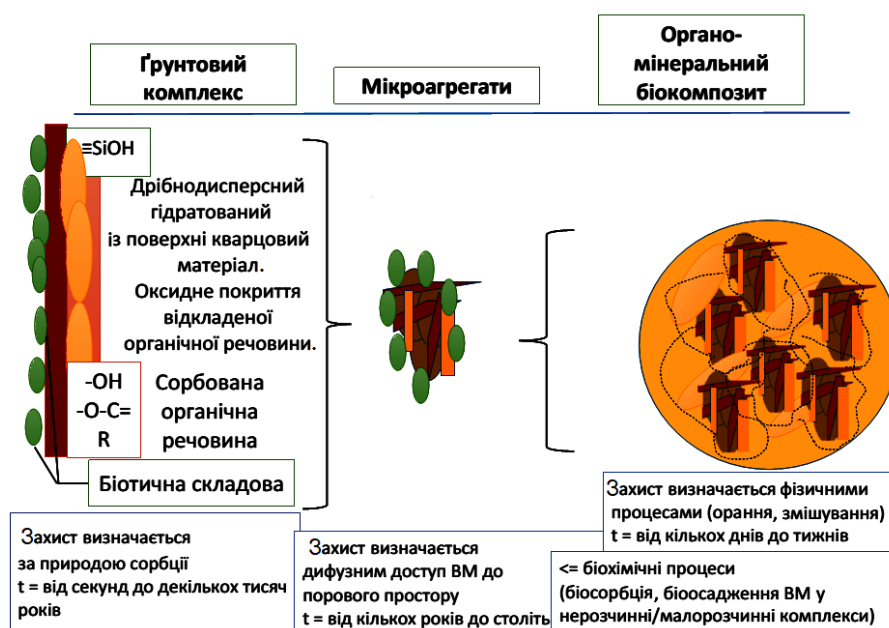


Рисунок 26 – Концептуальна модель еколого-синергетичних механізмів поетапного стимулювання захисних властивостей ґрунтів при внесенні біокомпозита

У процесі взаємодії ґрунтового комплексу з біокомпозитом утворюється низка спільних екологічно безпечних продуктів взаємодії, що формуються при залученні до процесу трансформації компонентів біогенного композита біотичної складової ґрунту в процесах селективної фіксації іонів металів, сумісної агрегації органо-мінеральних ґрунтових частинок і біокомпозиту, біосорбції та біоосадження.

Якщо процес сорбції та осадження ВМ розглядати як вторинні процеси від селективної фіксації, тобто процесу біохімічного зв'язування іонів металів, то одержуємо:

$$\left(1 + \frac{k_{\phi}}{k_d} + \frac{k_{\phi}}{k_a \cdot S_{\text{орг}} \cdot Y_{\text{біок}}}\right) \frac{dM_{\text{ґр}}}{d\tau} + \frac{M_{\text{ґр}}}{Y_p \cdot K_{\text{СМО}}} = k_{\phi} d\tau, \quad (17)$$

де k_{ϕ} – константа біохімічного зв'язування або фіксації металів в органо-мінеральній структурі; k_d – константа дисоціації; k_a – константа агрегації; $S_{\text{орг}}$ – сумарний органічний субстрат, зокрема органічна компонента біокомпозита, г/см³; $Y_{\text{біок}}$ – економічний коефіцієнт виходу біомаси за додатковим субстратом – біокомпозитом; $M_{\text{ґр}}$ – загальна величина мікробного біому ґрунту на глибині внесення біокомпозита, г/см³; τ – час, год; Y_p – економічний коефіцієнт виходу біогенного продукту за додатковим субстратом – біокомпозитом; $K_{\text{СМО}}$ – коефіцієнт сумарного окиснення, який визначаємо виходячи із судження, що динаміка окиснення органічної речовини лінійно залежить від процесу гуміфікації, враховуючи стимулювальну щодо біотичної компоненти дію біокомпозита:

$$K_{\text{СМО}} = K_{\text{ґум}} \cdot \alpha_{\text{БК}}, \quad (18)$$

де $K_{\text{ґум}}$ – умовний коефіцієнт гуміфікації; $\alpha_{\text{БК}}$ – коефіцієнт, що відображає вплив біокомпозита на активність поліфенолоксидази та пероксидази.

Зміну загальної органічної речовини в часі, враховуючи показник сумарного окиснення, знаходимо з виразу

$$\frac{dS_{\text{орг}}}{d\tau} = -\left(\frac{\mu \cdot X_0}{Y_{X/S}}\right) K_{\text{СМО}}, \quad (19)$$

де μ – швидкість розвитку біомаси, год⁻¹; $Y_{X/S}$ – економічний коефіцієнт виходу біомаси за органічною речовиною ґрунту.

За заданою початковою умовою $\tau = 0$, $M_{\text{ґр}} = X_0$, інтегруючи рівняння (17), отримаємо:

$$\ln \frac{M_{\text{гр}}}{X_0} + \frac{M_{\text{гр}} - X_0}{Y_p \cdot K_{\text{СМО}} \cdot \left(1 + \frac{k_{\phi}}{k_d} + \frac{k_{\phi}}{k_a \cdot S_{\text{орг}} \cdot Y_{\text{біок}}} \right)} = \frac{k_{\phi}}{1 + \frac{k_{\phi}}{k_d} + \frac{k_{\phi}}{k_a \cdot S_{\text{орг}} \cdot Y_{\text{біок}}}} \cdot \tau. \quad (20)$$

Отже, здійснено опис процесу біохімічної взаємодії біогенного композита з ґрунтовим комплексом.

При цьому можна визначити відношення $\frac{k_{\phi}}{1 + \frac{k_{\phi}}{k_d} + \frac{k_{\phi}}{k_a \cdot S_{\text{орг}} \cdot Y_{\text{біок}}}} \cdot \tau = OЗБ_r$,

$\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ доба, як окисну здатність біомаси ($OЗБ_r$) в процесі взаємодії в системі «біотична складова – біогенний продукт», що детермінує захисні механізми ґрунтового комплексу при сумісній трансформації з біокомпозитом. Цей показник вміщує взаємовідношення констант, що відображають зміни стану ґрунтового біому за дії біокомпозиту.

Отже, відповідно до розробленої концепції еколого-синергетичного підходу до процесу утилізації фосфогіпсу науково обґрунтовано, що в процесі анаеробної стабілізації його з МО відбуваються перетворення компонентів біокомпозита, які характерні для структурних змін агрегатів ґрунтового комплексу, ґрунтуються на синергетичному механізмі автокаталітичного регулювання буферних властивостей складних систем та які можна використовувати для біохімічного зв'язування поллютантів у ґрунті.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено положення еколого-синергетичного підходу до оцінювання ситуації на територіях техногенного навантаження від відвалів фосфогіпсу. Це дозволяє вирішувати питання екобезпеки в умовах впливу техногенезу на природні системи, зокрема ґрунт, проводити аналіз екосистемних процесів при їх нелінійності. Досліджено синергічний ефект сумісного впливу різних факторів у системі «НС – масив відвалів» для визначення основних чинників впливу відвалів фосфогіпсу на стан природних компонентів довкілля; розглянуто напрями деградації природно-антропогенних ландшафтів поблизу відвалів.

2. Здійснено математичне моделювання динамічних характеристик процесу міграції ВМ із масиву фосфогіпсових відвалів залежно від ряду факторів: часу вимивання компонентів із фосфогіпсу, частки розчинних форм ВМ із загального їх об'єму, глибини залягання ґрунтових вод, кінетики розвитку мікроорганізмів-індикаторів процесу мінералізації органіки, температурного режиму ґрунтів, розподілу опадів у цій місцевості тощо. Одержані результати свідчать про досить повільний зсув концентрацій ВМ углиб ґрунтового профілю, що може бути спричинено впливом на процеси їх трансформації в екосистемі власне буферних властивостей ґрунтового комплексу та надходження ВМ із масиву відвалу в малорозчинній формі.

3. Розроблено еколого-синергетичну концепцію утилізації фосфогіпсу, що містить модель послідовності взаємодій етапів його конверсії в біосорбційних процесах захисту компонентів довкілля з інтеграцією окремих технологічних рішень захисту гідросфери, атмосферного повітря та ремедіації забруднених ґрунтів. Цей взаємозв'язок виявляється в суміжних сферах використання мінеральних носіїв із фосфогіпсу. Розроблено схему досліджень процесів самоорганізації природно-техногенних систем на основі еколого-синергетичних механізмів нівелювання негативних впливів, що дозволяє оцінити ефективності використання фосфогіпсу в технологіях захисту НС. Визначено напрями еколого-синергетичних трансформацій компонентів фосфогіпсу, що дозволяє обґрунтувати ефективність використання модифікованих гранул фосфогіпсу як джерела необхідних макро- і мікроелементів для стимулювання бактеріального розвитку. Основні принципи способу одержання таких носіїв на основі фосфогіпсу захищені патентом України на винахід.

4. Науково обґрунтовано еколого-синергетичний підхід до зниження техногенного навантаження на довкілля при використанні фосфогіпсу в процесі біоконверсії сірчаних сполук у біосірку в системах газоочищення, що забезпечує формування нового напрямку його використання в технологіях захисту атмосферного повітря зі створенням екологічно безпечної технології оброблення фосфогіпсу та отриманням корисних продуктів. Здійснено дослідження еколого-синергетичних механізмів процесу розвитку матриксу бактерій на модифікованих гранулах фосфогіпсу та науково обґрунтовано ряд синергетичних перетворень, що дозволяють при використанні гранул фосфогіпсу з модифікованою поверхнею підвищити продуктивність систем біодесульфуризації для розширення можливостей їх залучення до природоохоронних технологічних систем.

5. Запропоновано математичну модель конверсії сірководню в біосірку, що дозволяє врахувати вплив величини біохімічної ємності завантаження з фосфогіпсу на зміну концентрації сірководню в часі в процесі очищення газових потоків для оптимізації параметрів роботи технологічних систем захисту атмосферного повітря. Для оцінювання окисної здатності біоплівки запропоновано враховувати біохімічні параметри системи і фізико-механічні властивості гранульованого завантаження, зокрема, враховувати активну поверхню біофільтра, що містить бактеріальну плівку та відповідно питому площу поверхні біоплівки, розвинену на мінеральному носії з фосфогіпсу. Між величинами, одержаними внаслідок розв'язання математичної моделі, та експериментальними даними спостерігається тісний кореляційний зв'язок ($r = 0,923$).

6. Визначено оптимальні рівні фізико-хімічних параметрів ведення процесу біодесульфуризації газових потоків у технологіях захисту атмосферного повітря. Установлено, що для досягнення ефективності очищення вище ніж 95 % за різних рівнів навантаження за вмістом сполук сірки в газових потоках необхідно додержуватися таких параметрів проведення процесу: час контакту сірководню в просторі біофільтра при очищенні біогазу – 1,5 год, газових потоків із високим вмістом сполук сірки – 10 год; оптимальне

значення рН – 5,0–5,5 од.; доза дозавантаження модифікованих гранул фосфогіпсу – 14 % від загального об'єму завантаження з фосфогіпсу в біофільтрі; при очищенні біогазу доза дозавантаження гранул подається в систему на 55-ту добу, а при очищенні газових потоків із високим умістом сірководню (не менше ніж 10 % від загального об'єму газу) – на 45-ту добу роботи біофільтра; час промивання завантаження з фосфогіпсу від біосірки – 1,0 год.

7. Розроблено технологічну схему утилізації відвального фосфогіпсу з рециклінгом матеріальних потоків, що забезпечить формування нового напрямку його використання в технологіях захисту атмосферного повітря зі створенням екологічно безпечної технології оброблення фосфогіпсу та отриманням корисних продуктів утилізації. Розроблено аеробні установки для біохімічного очищення газових потоків від сполук сірки з використанням завантаження з фосфогіпсу, що дозволять забезпечити високоякісне очищення газів від сполук сірки та отримати вторинний органо-мінеральний продукт – біосірку, яку доцільно використовувати в сільському господарстві. Основні принципи технології та її конструктивне виконання захищено патентом України на корисну модель. Результати дослідно-промислових випробувань технології біодесульфуризації з використанням мінерального носія з фосфогіпсу апробовані на Сумському НДІ «МІНДІП» м. Сум та підтвердили високу ефективність газоочищення від сполук сірки (вище ніж 95 %).

8. Науково обґрунтовано напрями зниження техногенного навантаження на довкілля при утилізації фосфогіпсу в системах анаеробної стабілізації стічних вод та МО для інтенсифікації процесів їх детоксикації та дефосфатації. Теоретично та експериментально обґрунтовано еколого-синергетичні механізми вивільнення в анаеробних умовах фосфат-іонів, що відбувається на принципах самоорганізації еколого-трофічних груп мікроорганізмів при стимулюючій дії фосфогіпсу та дозволяє підвищити ефективність водоочищення на станціях біологічного очищення міських очисних споруд.

9. Здійснено математичне моделювання основних параметрів біореактора стадії дефосфатації, що враховує фізико-хімічні властивості фосфогіпсу та показники синергічної дії різних еколого-трофічних груп мікроорганізмів в одній асоціації та регресійне моделювання кінетики вивільнення фосфат-іонів із МО під час оброблення разом із фосфогіпсом з урахуванням сумісного ефекту дії величини ХСК та дози фосфогіпсу.

10. Здійснено дослідження впливу дози фосфогіпсу на процес анаеробної дефосфатації МО. При цьому досягається потенціал вилучення сполук фосфору не менше ніж 80 %. Обґрунтовано синергічний ефект сумісного впливу навантаження за ХСК та концентрації фосфогіпсу на метаболічну активність анаеробних груп мікроорганізмів. Одночасно із збільшенням значення співвідношення ХСК/ФГ до 0,1 спостерігалось збільшення кількості виділених фосфатів у розчин. Одержано відповідні рівняння регресійних залежностей процесу відновлення фосфатів від концентрації дигідратного фосфогіпсу та співвідношення ХСК/ФГ. Основні принципи технології та її конструктивне виконання захищено патентом України.

11. Розроблено еколого-синергетичну модель стабілізації сполук МО разом із фосфогіпсом в технологіях захисту водних екосистем та відповідні технологічні рішення дефосфатації, що включають аеробно-анаеробний процес конверсії для забезпечення просторової сукцесії мікроорганізмів і трофічного ланцюга гідробіонтів із залученням техногенних мінеральних ресурсів (фосфогіпсу) для стимулювання розвитку необхідних еколого-трофічних груп.

12. Сформовано еколого-синергетичні механізми фіксації ВМ в системі «грунт – мікробний біом – біокомпозит», виявлено ряд протекторних чинників, що визначають довгострокову фіксацію ВМ у нерозчинних/малорозчинних структурах органо-мінеральних агрегатів, та визначено роль біотичної компоненти ґрунтового комплексу в перетворенні органічної речовини та біохімічному зв'язуванні токсичних речовин.

13. У процесі математичного моделювання обґрунтовано еколого-синергетичні механізми впливу біогенного композиту, що є продуктом анаеробної стабілізації МО та фосфогіпсу, на захисні функції ґрунту та відповідно розроблено модель його впливу на процес природнього регулювання буферних властивостей в системі «грунт – мікробний біом – токсикант» з утворенням низки екологічно безпечних продуктів взаємодії, які формуються при залученні до процесу біохімічних перетворень компонентів біокомпозита біотичної складової ґрунту в напрямку селективної фіксації іонів металів, сумісної агрегації органо-мінеральних ґрунтових частинок і біокомпозита, біосорбції та біоосадження ВМ.

14. Сформовано рекомендації щодо реалізації процесу очищення ґрунтів від сполук ВМ при використанні біокомпозита. За результатами мікропольових досліджень процесу ремедіації забруднених земель для підвищення агроекологічного ефекту встановлено, що на відновленому ґрунті кислотність становила 6,5 та спостерігалось зменшення обмінної фракції ВМ на 84 %. Найбільш значні зміни в фракційному складі пов'язані з органічною речовиною та залишковою фракцією. При відновленні ґрунтів, забруднених Pb та Cd, спостерігається значне збільшення відносної частки залишкової фракції за всіх рівнів кислотності відповідно з 5,6–9,05 % до 45,3–51,7 %, це свідчить про детоксикацію ґрунтового комплексу та фіксацію ВМ у нерозчинній фракції, що нівелює можливість міграції токсикантів в екосистемі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Монографії

1. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю. Синергетика: нелинейные процессы в экологии : монография. Сумы, 2016. 229 с.

Здобувачу належать розділи за напрямками: синергетика мікробіологічних систем, синергетика на екосистемному рівні та синергетика природно-технічних систем.

Статті у фахових наукових виданнях із переліку МОН України

2. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю. Биологическое удаление фосфора из осадков сточных вод в процессе биосульфидной обработки. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 4 (87). С. 152–158.

Здобувач сформував на синергетичних задах теоретичну концепцію стимулювання видалення сполук фосфору із мулових осадів за дії дигідратного фосфогіпсу в анаеробних умовах.

3. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., Пляцук Д. Л. Синергетика: экосистемные процессы. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 6 (89), ч. 1. С. 137–142.

Здобувач здійснив опис основних взаємозв'язків на різних рівнях екосистемного розвитку на синергетичних засадах за впливу чинників техногенезу.

4. Черныш Е. Ю. Экобиотехнология обработки иловых осадков: удаление соединений фосфора. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2014. № 2 (13). С. 60–66.

5. Черныш Е. Ю., Пляцук Л. Д. Адсорбционная иммобилизация сульфид-окисляющих бактерий в массе носителя, изготовленного из фосфогипса. *Технологический аудит и резервы производств*. 2015. № 3/4 (23). С. 4–7.

Здобувач здійснив іммобілізацію тіонових бактерій на мінеральному носії із фосфогіпсу та визначив екологічні фактори впливу на розвиток біоплівки.

6. Plyatsuk D. L., Chernysh Y. Y. Integrated express-assessment of air quality under condition of changing industry infrastructure of the region. *Екологічна безпека*. 2015. № 1 (19). С. 46–49.

Здобувач здійснив формування методологічного підходу до процесу біоіндикації стану атмосферного повітря.

7. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., Яхненко Е. Н. Фосфогипсовые отходы в технологиях защиты окружающей среды. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 3 (92). С. 157–164.

Здобувач сформував концептуальні засади використання фосфогіпсових відходів у системі захисту довкілля.

8. Черныш Е. Ю., Яхненко О. М. Интенсификация процесса биологического газоочистения за допомогою іммобілізаційного носія із фосфогіпсу. *Екологія та промисловість*. 2015. № 3. С. 46–50.

Здобувач здійснив експериментальне моделювання процесу біодесульфуризації газів в фільтраційних системах із гранулами фосфогіпсу.

9. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю. Эколого-синергетический подход к процессу накопления и утилизации иловых осадков. *Екологічні науки*. 2015. № 8. С. 54–68.

Здобувач здійснив дослідження ефекту синергізму при утилізації мулових осадів разом із фосфогіпсом.

10. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю. Синергетичний підхід до екологічної проблеми накопичення мулових осадів. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2015. № 2 (12). С. 94–100.

Здобувач розглянув основні положення синергетичної теорії складних систем у контексті аналізу екологічної проблематики накопичення мулових осадів довкілля.

11. Черниш Е. Ю., Яхненко Е. Н. Определение режимных параметров работы высоконагруженных систем биодесульфуризации с применением фосфогипса. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». 2016. № 12 (1184). С. 207–212.

Здобувач здійснив регресійне моделювання факторів впливу на процес газоочищення у системах біофільтрації з завантаженням із гранул фосфогіпсу.

12. Яхненко О. М., Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д., Трунова І. О. Самозаростання відвалу фосфогіпсу як показник рівня техногенного навантаження на довкілля. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2016. № 1 (13). С. 110–119.

Здобувач визначив синергетичні фактори впливу на стан екосистеми та розвиток природних угруповань рослин в районі складування фосфогіпсу.

13. Черниш Є. Ю., Яхненко О. М., Пляцук Л. Д. Оптимізація процесу гранулювання фосфогіпсу для систем біодесульфуризації. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». 2016. № 43 (1016). С. 217–222.

Здобувач здійснив оптимізацію факторів впливу на процес формування гранул фосфогіпсу.

14. Черныш Е. Ю., Пляцук Л. Д. Обоснование возможности применения минерального носителя из фосфогипса для очистки выбросов теплоэнергетических установок. *Екологія та промисловість*. 2016. № 3. С. 49 – 54.

Здобувач науково-теоретично обґрунтував можливість використання біодесульфуризації з використанням фосфогіпсу при очищенні газоподібних викидів від оксидів сірки.

15. Черныш Е. Ю. Моделирование окислительной способности биопленки, иммобилизированной на гранулированном фосфогипсе в процессе газоочистки. *Енерготехнології та ресурсосбереження*. 2016. № 3. С. 52–58.

16. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Екологічна формалізація напрямків впливу відходів переробки фосфоритової сировини. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 2 (103), ч. 1. С. 105–109.

Здобувач сформував єдину синергетичну концепцію впливу процесу перероблення фосфоритової сировини на стан довкілля.

17. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д., Яхненко О. М. Розробка моделі процесу міграції та біохімічної конверсії компонентів фосфогіпсу в ґрунтовому профілі. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2017. № 1 (15). С. 146–155.

Здобувач здійснив моделювання процесів трансформації та акумуляції компонентів фосфогіпсу в ґрунтовому комплексі.

18. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Моделювання процесу стимулювання захисних функцій ґрунтового комплексу при використанні біогенного композиту на основі техногенних відходів. *Екологічні науки*. 2017. № 1–2 (16–17). С. 129–140.

Здобувач здійснив науково-теоретичне обґрунтування та математичне моделювання впливу біокомпозита, що містить продукти трансформації фосфогіпсу, на буферні властивості ґрунті на принципах автокаталізу відкритих систем.

19. Chernysh Ye. Yu., Plyatsuk L. D., Yakhnenko O. M., Trunova I. O. Modelling of the vertical migration process of phosphogypsum components in the soil profile. *Journal of Engineering Sciences*. 2017. Volume 4. Issue 2. P. G 6–G 11.

Здобувач здійснив експериментальне дослідження процесу міграції компонентів фосфогіпсу в модулі ґрунтового комплексу та біохімічна формалізація цього процесу.

20. Черниш Є. Ю., Яхненко О. М., Васькін Р. А. Розробка екологічно безпечних технологічних рішень утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту навколишнього середовища. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористання*. 2017. № 2 (16). С. 140–147.

Здобувач сформував єдину концепцію технологічних рішень захисту компонентів довкілля при залученні як вторинного ресурсу фосфогіпсу.

21. Черниш Є. Ю. Розробка інтегрованої моделі екологічно безпечної утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту навколишнього середовища. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». 2017. № 53 (1274). С. 152–158.

22. Plyatsuk L. D., Chernysh Y. Y., Ablieieva I. Y., Kozii I. S., Balintova M., Matiash Y. O. Sulfur Utilization in the Systems of Biological Wastewater Denitrification. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5, iss. 1. P. H 7–H 15.

Здобувач здійснив формалізацію напряму використання продукту утилізації фосфогіпсу в системах біодесульфуризації.

23. Chernysh Y., Plyatsuk L., Yakhnenko O., Trunova I., Kozii I. Research of migration patterns of heavy metals in the area of phosphogypsum storage influence. *Environmental problems*. 2018. Vol. 3. № 1. P. 49–52.

Здобувач у польових умовах здійснив дослідження процесу міграції важких металів на прилеглих до фосфогіпсового відвалу територіях.

24. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Екологічно безпечне використання фосфогіпсу в технологіях захисту водних екосистем. *Екологія та промисловість*. 2018. № 2. С. 86–92.

Здобувач здійснив дослідження факторів впливу на процес сумісної обробки мулових осадів та фосфогіпсу при видаленні сполук фосфору в технологічних системах захисту водних екосистем.

25. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Науково-теоретичне обґрунтування впливу органо-мінерального біокомпозиту на мобільність радіонуклідів і важких металів у ґрунті. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2018. № 1 (17). С. 30–38.

Здобувач здійснив науково-теоретичне обґрунтування впливу біокомпозиту, що містить продукти стабілізації МО та фосфогіпсу, на процес фіксації токсикантів.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science

26. Plyatsuk L. D., Chernish E. Intensification of the anaerobic microbiological degradation of sewage sludge and gypsum waste under bio-sulfidogenic conditions. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*. 2014. Vol. 40, No 1. P. 10–23. (Scopus).

Здобувач здійснив експериментальне моделювання процесу анаеробної конверсії мулових осадів та фосфогіпсу та визначено біохімічні засади цього процесу.

27. Chernysh Y. Y., Plyatsuk L. D., Dorda V. A. Ecotechnology for hydrogen sulfide removal and production of elemental sulfur. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2014. № 15 (2–4). P. 189–202. (Scopus).

Здобувач здійснив дослідження режимних параметрів реалізації екотехнології видалення сірководню в аеробних біофільтраційних системах із завантаженням з фосфогіпсу.

28. Черныш Е. Ю., Пляцук Л. Д. Разработка биотехнологии выдалення сірководню із біогазу з використанням іммобілізаційного матеріалу на основі фосфогіпсу. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2/6 (74). С. 49–51. (Scopus).

Здобувач дослідив процес продукування біометану в системах з іммобілізованими на фосфогіпсовому носії сіркоокисними бактеріями.

29. Черныш Е. Ю. Применение фосфогипса в экотехнологии газоочистки с образованием элементарной серы. *Экологический вестник*. 2015. № 1 (31). С. 73–79.

30. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., Яхненко Е. Н., Трунова И. А. Системный подход к экологическому мониторингу в районе размещения отвала фосфогипсовых отходов. *Экологический вестник*. 2015. № 4 (34). С. 77–85.

Здобувач здійснив удосконалення окремих аспектів системного підходу щодо розвитку системи моніторингу території фосфогіпсових відвалів з урахуванням синергетичних закономірностей розвитку природних процесів асиміляції речовинних потоків у довкіллі.

31. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю. Формализация нелинейных закономерностей развития экосистемных процессов при воздействии антропогенеза. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 2/4 (80). С. 25–31. (Scopus).

Здобувач провів математичну формалізацію синергетичних закономірностей розвитку екосистемних процесів при впливі на них антропогенезу.

32. Chernish Ye., Plyatsuk L. Opportunity of biochemical process for phosphogypsum utilization. *The Journal of Solid waste technology and management*. 2016. Vol.42, No 2. P.108–115. (Scopus).

33. Plyatsuk L. D., Chernysh Y. Y. The Removal of Hydrogen Sulfide in the Biodesulfurization System Using Granulated Phosphogypsum. *Eurasian Chemico-Technological Journal*. 2016. Vol. 18, No 1. P.47–54. (Scopus).

Здобувач дослідив параметри роботи систем видалення сірководню з використання біологічних фільтрів із гранульованим носієм із фосфогіпсу.

34. Черниш Є. Ю., Яхненко О. М., Пляцук Л. Д., Козій І. С. Дослідження впливу обсягу гранульованого завантаження на основі фосфогіпсу на процес газоочищення в системах біодесульфуризації. *The scientific heritage*. 2017. № 7. С. 109–113.

Здобувач науково-теоретично обґрунтував залежність між обсягом гранул фосфогіпсу та ступенем розвитку біоплівки, що здійснює конверсію сірчаних сполук у процесі газоочищення.

35. Черныш Е. Ю., Пляцук Л. Д. Математическое моделирование процесса миграции компонентов фосфогипсового отвала в окружающей среде. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2017. № 3. С. 115–120.

Здобувач здійснив математичне моделювання процесів міграції компонентів фосфогіпсу у ґрунтовому комплексі при залученні біотичної компоненти.

36. Черныш Е. Ю. Дослідження екологічної безпечності продуктів утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту навколишнього середовища. *The scientific heritage*. 2018. № 19. С. 57–62.

37. Chernysh Y., Balintova M., Plyatsuk L., Holub M., Demcak S. The Influence of Phosphogypsum Addition on Phosphorus Release in Biochemical Treatment of Sewage Sludge. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018. № 15. P. 1269–1283. (Scopus, Web of Science).

Здобувач розробив модель трансформацій сполук фосфору при введенні в систему водоочищення фосфогіпсу на синергетичних принципах.

38. Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablieieva I., Burla O., Hurets L. Research into biotechnological processes of plant S-nutrition stimulation by the products of phosphogypsum disposal in gas cleaning system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/10 (93). P. 6–14. (Scopus).

Здобувач науково-теоретично обґрунтував екологічно безпечне використання продукту трансформації фосфогіпсу (біосірки) для покращення живлення рослин.

39. Chernysh Y. The Environmental Friendly Solution for Stimulation of the Soil Protective Properties. *Studia Periegetica*. 2018. Vol. 4 (24). P. 15–25.

40. Chernysh Y., Plyatsuk L. The Carrier Development for Biofilms on the Basis of Technogenic Wastes for Pollutants Treatment in the Environmental Protection Technologies. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*. P. 422–432. (Scopus).

Здобувач здійснив дослідження специфічних факторів розвитку біоплівки в технологічних системах захисту навколишнього середовища при їх іммобілізації на гранулах, що містять фосфогіпс.

Статті в інших наукових виданнях

41. Черныш Е. Ю., Пляцук Л. Д. Зв'язування важких металів у ґрунтовому комплексі при внесенні біокомпозиту на основі мулових осадів та фосфогіпсу. *Молодий вчений*. 2018. № 1 (53). С. 446–450.

Здобувач сформував концепцію конверсії біокомпозита, що містить продукти трансформації фосфогіпсу, на процес зв'язування важких металів в ґрунтовому комплексі в контексті розвитку єдиних синергетичних засад утилізації фосфогіпсу.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

42. Черныш Е. Ю. Биохимические процессы преобразования токсических веществ в агроэкосистемах. *Збалансоване природокористування : традиції та інновації* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 15–17 жовтня 2014). Київ, 2014. С. 172–173.

43. Черныш Е. Ю., Пляцук Л. Д. Анализ возможностей удаления фосфора из сточных вод и их осадков. *Вода. Екологія. Суспільство* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 20–21 березня 2014). Харків, 2014. С. 85–87.

44. Черныш Е. Ю. Экобиотехнология сероочистки газов с применением фосфогипса. *Экология и защита окружающей среды* : сб. тез. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. (Мінськ, 25 березня 2015). Мінськ, 2015. С. 163–165.

45. Черныш Е. Ю., Яхненко О. М. Утилізація фосфогіпсу в екологічній очищенні газових потоків від сполук сірки. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : матеріали X Міжнар. наук.-техн. конф. (Миколаїв, 5–7 червня 2015). Миколаїв, 2015. С. 84–86.

46. Яхненко О. М., Черныш Е. Ю. Використання фосфогіпсу в якості іммобілізаційного матеріалу для систем біологічної очистки. *Екологія. Людина. Суспільство* : матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 27–29 травня 2015). Київ, 2015. С. 148.

47. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю. Системно-синергетический подход к исследованию и моделированию состояния окружающей среды. *Проблеми екологічної безпеки* : зб. тез доповідей XIII Міжнар. наук.-техн. конф. (Кременчук, 6–8 жовтня 2015). Кременчук, 2015. С. 52.

48. Яхненко Е. Н., Черныш Е. Ю. Анализ направлений утилизации вторичного продукта биообессеривания газовых потоков. *Актуальные вопросы наук о земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств* : материалы науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (Гомель, 16 березня 2016). Гомель (Беларусь), 2016. С. 360–363.

49. Черныш Е. Ю., Лего К. В. Розробка біохімічного напрямку регулювання буферних властивостей Чорнобильської зони відчуження. *Екологія. Людина. Суспільство* : матеріали XIX Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 12–13 травня 2016). Київ, 2016. С. 136.

50. Черныш Е. Ю. Еколого-біохімічний підхід до використання біогенних композитів на основі відходів хімічної промисловості як напрямку зниження

техногенного навантаження на довкілля. *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2017* : зб. тез доповідей XX Міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 10-річчю створення екологічного факультету (Харків, 19–22 квітня 2017). Харків, 2017. С. 223–224.

51. Chernysh Y. Y. Phosphogypsum utilization with the biocomposite materials production for environmental protection systems. *Проблеми екологічної безпеки* : зб. тез XV Міжнар. наук.-техн. конф. (Кременчук, 11–13 жовтня 2017). Кременчук, 2017. С. 73.

52. Черниш Є. Ю. Методологічні основи оцінки техногенного навантаження від місць накопичення та складування фосфогіпсу. *Вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси* : сборник научных статей : в 2 ч. (Гомель, 10 ноября 2017). Гомель (Беларусь), 2017. Ч. 1. С. 385–389.

53. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Математичне моделювання впливу біокомпозиту на основі техногенних відходів на відновлення забруднених важкими металами ґрунтів. *Молоді вчені 2018 – від теорії до практики* : зб. матеріалів IX Міжнар. конф. молодих вчених (Дніпро, 16 лютого 2018) Дніпро, 2018. С. 338–341.

54. Chernysh Y., Plyatsuk L. By-products utilization for bioconversion with production of environmentally friendly products. *10th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD* : collection of publications (Electronic Collection) (Tatranská Lomnica, 26 – 27 April 2018), Tatranská Lomnica (Slovak Republic). P. 47 – 52.

55. Chernysh Y., Plyatsuk L. The carrier development for biofilms on the basis of technogenic wastes for pollutants treatment in the environmental protection technologies. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018* : book of abstracts (Sumy, 12–15 June 2018). Sumy, 2018. P. 110.

56. Chernysh Y. The environmental friendly solution for stimulation of the soil protective properties. *Current challenges of local and regional development* : book of abstracts (Poznan, 11–13 September 2018). Poznan (Poland), 2018. P. 76.

57. Chernysh Y. The environmental friendly solution for organic and inorganic wastes recycling. *The Protection of Nature and the Environment in Southeast Europe: Players, Discourses, Strategies of Action* : collection of materials of International University Week 2018 (Electronic Collection) (Tutzing, 1–5 October 2018), Tutzing, 2018. P. 17.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

58. Установка анаеробної переробки органічних відходів: пат. 87422 Україна. № u201309173; заявл. 22.07.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. 7 с.

Здобувач розробив установку анаеробної переробки органічних відходів разом із фосфогіпсом.

59. Спосіб видалення сполук сірки із потоку газів: пат. 103687 Україна. № u201506324; заявл. 26.06.2015; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24. 10 с.

Здобувач визначив стадії процесу видалення сполук сірки із потоку газів в системах біофільтрації із завантаженням з фосфогіпсу.

60. Спосіб отримання гранульованого носія, що містить іммобілізовані мікроорганізми: пат. 114664 Україна. № а 2015 09035; заявл. 21.09.2015; опубл. 10.07.2017. Бюл. № 13. 10 с.

Здобувач розробив спосіб отримання гранульованого носія, що містить іммобілізовані мікроорганізми, на основі фосфогіпсу.

61. Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю. Разработка минерального носителя на основе фосфогипсовых отходов для систем биологической газоочистки. *V Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : збірник наукових праць (Вінниця, 23–26 вересня, 2015). Вінниця, 2015. С. 182.

62. Черныш Е. Ю., Яхненко О. М. Шляхи утилізації відходів фосфогіпсу за допомогою біотехнологічних процесів. *Развитие науки в XXI веке* : сборник публикаций Научно-информационного центра «Знание» по материалам IV Международной заочной научно-практической конференции (Харків, 24 липня 2015). Харків, 2015. С. 103–106.

63. Яхненко Е. Н., Черныш Е. Ю. Мониторинговые исследования процесса накопления и складирования фосфогипсовых отходов в окружающей среде. *Еколого-правові та економічні аспекти екологічної безпеки регіону* : зб. тез доповідей X Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 20–21 жовтня 2015). Харків, 2015. С. 99–101.

64. Черныш Е. Ю., Сафонова Я. О. Еколого-енергетичні аспекти використання тепла стічних вод. *Екологічна безпека держави*: тези доповідей IX Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Київ, 16 квітня 2015). Київ, 2015. С. 44.

65. Лего К. В., Черныш Е. Ю. Еколого-системний підхід до характеристики бар'єрної ролі Чорнобильської зони відчуження. *Екологія та екологічна безпека* : матеріали науково-практичної конференції Всеукраїнського студентського конкурсу (Полтава, 16–18 березня 2016). Полтава, 2016. С. 35.

66. Черныш Е. Ю., Яхненко О. М. Визначення впливу вапна та солі манган сульфату на біохімічну активність модифікованих гранул фосфогіпсу при використанні їх в якості мінерального носія в біофільтрах. *Екогеофорум-2017. Актуальні проблеми та інновації* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 22–25 березня 2017). Івано-Франківськ, 2017. С. 53–54.

67. Черныш Е. Ю., Яхненко Е. Н. Разработка экспериментальной модели биоочистки газовых потоков с использованием гранулированного фосфогипса. *Обмен результатами исследований в рамках международного сближения ученых* : материалы VII Междунар. Конф. (Монреаль, 27 марта 2016). Монреаль (Канада), 2016. С. 68–72.

68. Черныш Е. Ю., Яхненко О. М. Математичне моделювання процесу біодесульфуризації газового потоку в технологіях захисту атмосферного повітря при використанні завантаження із фосфогіпсу. *Наука в современном мире* : сб. публикаций XIII Междунар. науч.-практ. конф. (Київ, 25 січня 2017). Київ, 2017. С. 92–95.

69. Пляцук Л. Д., Черниш Є. Ю., Алієва М. О. Огляд проблематики комплексної переробки фосфогіпсу. *Освіта, наука та виробництво: розвиток і перспективи* : матеріали II Всеукраїнської науково-методичної конференції (Шостка, 20 квітня 2017). Суми, 2017. С. 17–18.

70. Горова А. А., Черниш Є. Ю. Економічне обґрунтування ефективності анаеробної технології рециклінгу відходів. *STABICONsystems–2017* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Суми, 27–29 квітня 2017). Суми, 2017. С. 35–37.

71. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Перспективи використання фосфогіпсу в технологіях захисту навколишнього середовища. *Сталий розвиток – погляд у майбутнє* : зб. тез семінару (приурочений 60-річчю д-ра техн. наук, професора, зав. кафедри екології та збалансованого природокористування М. С. Мальованого) (Львів, 15 вересня 2017). Львів, 2017. С. 21.

72. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Екологічно безпечна утилізація фосфогіпсу в технологіях захисту навколишнього середовища. *VI Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. матеріалів наук.-практ. конф. (Вінниця, 21–24 вересня 2017). Вінниця, 2017. Т. I. С. 220.

73. Chernysh Y. Y., Plyatsuk L. D. Phosphogypsum utilization in the dephosphotation treatment of wastewater and sewage sludge. *Водопостачання та водовідведення : проектування, будова, експлуатація, моніторинг* : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 18–20 жовтня 2017). Львів, 2017. С. 10.

74. Черниш Є. Ю. Напрямки природної регуляції захисних властивостей ґрунтового комплексу. *Екологія і природокористування в системі оптимізації відносин природи і суспільства* : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Тернопіль, 27–28 квітня 2017). Тернопіль, 2017. С. 131–133.

75. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Науково-методичні засади досліджень процесу утилізації фосфогіпсу в технологіях захисту навколишнього середовища. *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2018* : зб. тез доповідей XXI Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 18–20 квітня 2018 року). Харків, 2018. С. 194–197.

76. Черниш Є. Ю., Чубур В. С. Еколого-біохімічний підхід до проблеми утворення та накопичення фосфогіпсу у довкіллі. *Екологічна безпека держави: тези доповідей XII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, присвяченої пам'яті професора Я. І. Мовчана (з міжнародною участю)* (Київ, 19 квітня 2018). Київ, 2018. С. 214.

77. Черныш Е. Ю. Закономерности биогеохимических процессов миграции тяжелых металлов в экосистеме. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства* : матеріали XXV Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (Кременчук, 25–26 квітня 2018). Кременчук, 2018. С. 137–138.

78. Chernysh Y., Yakhnenko O. Environmentally safe recycling of technogenic wastes. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 14 вересня 2018). Львів, 2018. С. 5.

79. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д. Застосування процесів біокаталізу в технологічних системах захисту навколишнього середовища. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : зб. матеріалів 5-й Міжнар. конгресу (Львів, 26–29 вересня 2018). Львів, 2018. С. 103.

80. Шуліпа Є., Черниш Є. Засади екологічного моніторингу вмісту важких металів у ґрунті. *GeoTerrace–2018* : зб. матеріалів Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених (Львів, 13–15 грудня 2018). Львів, 2018. С. 52–55.

АНОТАЦІЯ

Черниш Є. Ю. Наукові засади еколого-синергетичного підходу до процесу утилізації фосфогіпсу для зменшення техногенного навантаження на довкілля. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. Сумський державний університет, 2019. Спеціалізована вчена рада Д 55.051.04.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми зниження рівня техногенного навантаження на довкілля від відвалів відходів хімічної промисловості на основі розроблення еколого-синергетичного підходу до визначення синергетичних ефектів процесів накопичення та складування масивів фосфогіпсу, що сприяють зниженню впливу на прилеглі до урбоекосистем території.

Сформовано еколого-синергетичні засади моделювання впливу відвалів фосфогіпсу на природні компоненти довкілля, зокрема, розроблено наукові засади оцінювання техногенного впливу процесу накопичення фосфогіпсу на екосистему та здійснено моделювання міграції важких металів (ВМ) із техногенного масиву відвалу в ґрунтовий комплекс едафотопу.

Розроблено наукові засади створення технологічних схем утилізації фосфогіпсу в системах біодесульфуризації газових потоків з рециклінгом матеріальних потоків, що забезпечить формування нового напрямку його використання в технологіях захисту атмосферного повітря зі створенням екологічно безпечної технології оброблення та отриманням корисних продуктів утилізації, що ґрунтуються на еколого-синергетичних процесах сорбційної іммобілізації на носії з фосфогіпсу.

Для підвищення екологічної безпеки станцій очищення стічних вод обґрунтовано напрям утилізації фосфогіпсу в системах анаеробної стабілізації стічних вод та мулових осадів (МО) для інтенсифікації процесів дефосфатації. Визначено еколого-синергетичні механізми вилучення фосфатів зі стоків і МО при введенні в систему фосфогіпсу в технологіях захисту водних екосистем.

Для підвищення рівня екологічної безпеки природно-антропогенних ландшафтів, забруднених ВМ, досліджено еколого-синергетичні механізми впливу біокомпозита у системі «ґрунт – мікробний біом – токсикант» та виявлено ряд протекторних перетворень, що визначають довгострокову фіксацію ВМ у стійких нерозчинних структурах. Здійснено математичне моделювання впливу біокомпозита як продукту анаеробної стабілізації МО та

фосфогіпсу на захисні функції ґрунту та відповідно розроблено еколого-синергетичну модель його впливу на процес природного регулювання буферних властивостей ґрунтового комплексу.

Практична значущість роботи підтверджена результатами промислових випробувань розроблених екологічно безпечних технологій, одним патентом на винахід України, двома патентами на корисну модель та актами впровадження у виробничий і навчальний процеси.

Ключові слова: еколого-синергетичний підхід, утилізація фосфогіпсу, техногенне навантаження, довкілля, екологічно безпечні технології.

АННОТАЦІЯ

Черныш Е. Ю. Научные основы эколого-синергетического подхода к процессу утилизации фосфогипса для уменьшения техногенной нагрузки на окружающую среду. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность. Сумский государственный университет, 2019. Специализированный ученый совет Д 55.051.04.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы снижения уровня техногенной нагрузки на окружающую среду от отвалов отходов химической промышленности на основе разработки эколого-синергетического подхода к определению синергетических эффектов процессов накопления и складирования массивов фосфогипса, способствующих снижению воздействия на прилегающие к урбоэкосистемам территории.

Сформированы эколого-синергетические основы моделирования влияния отвалов фосфогипса на природные компоненты окружающей среды, в частности, разработаны научные основы оценки техногенного воздействия процесса накопления фосфогипса на экосистему и осуществлено моделирование миграции тяжелых металлов (ТМ) из техногенного массива отвала в почвенный комплекс едафотопа.

Разработаны научные основы создания технологических схем утилизации отвального фосфогипса в системах биодесульфуризации газовых потоков с рециклингом материальных потоков, обеспечивающие формирование нового направления его использования в технологиях защиты атмосферного воздуха с созданием экологически безопасной технологии обработки и получением полезных продуктов утилизации, основанных на эколого-синергетических процессах сорбционной иммобилизации на носителе из фосфогипса.

Для повышения экологической безопасности станций очистки сточных вод обосновано направление утилизации фосфогипса в системах анаэробной стабилизации сточных вод и иловых осадков (ИО) для интенсификации процессов дефосфатации. Определены эколого-синергетические механизмы изъятия фосфатов из стоков и ИО при введении в систему фосфогипса в технологиях защиты водных экосистем.

Для повышения уровня экологической безопасности природно-антропогенных ландшафтов, загрязненных ТМ, исследованы эколого-

синергетические механизмы влияния биокомпозита в системе «почва – микробный биом – токсикант» и выявлено ряд протекторных преобразований, определяющих долгосрочную фиксацию ТМ в устойчивых нерастворимых структурах. Проведено математическое моделирование влияния биокомпозита как продукта анаэробной конверсии ИО и фосфогипса на защитные функции почвы и соответственно разработана эколого-синергетическая модель его влияния на процесс естественного регулирования буферных свойств почвенного комплекса.

Практическая значимость работы подтверждена результатами промышленных испытаний разработанных экологически безопасных технологий; одним патентом на изобретение Украины, двумя патентами на полезную модель и актами внедрения в производственный и учебный процессы.

Ключевые слова: эколого-синергетический подход, утилизация фосфогипса, техногенная нагрузка, окружающая среда, экологически безопасные технологии.

ABSTRACT

Chernysh Ye. Yu. Scientific basis of environmental synergetic approach to phosphogypsum recycling to reduce manmade load on environment. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Engineering Sciences Degree by specialty 21.06.01 – ecological safety. Sumy State University, 2019. Specialized Academic Council D 55.051.04.

The thesis deals with the solution of scientific-applied issue of reducing the manmade impact on the environment of waste dumps of chemical industry. The environmental synergetic approach reducing the manmade impact on the territories adjacent to urban ecosystems has been developed to determine the synergistic effects of accumulation and storage of phosphogypsum arrays.

The environmental synergetic basis for modeling of phosphogypsum dumps effect on the environment components has been formed. In particular, the scientific basis for estimation of manmade impact of phosphogypsum accumulation on an ecosystem and heavy metals (HM) migration from a man-made dump to a soil complex of an edaphotop has been developed.

The scientific basis of flow diagrams of phosphogypsum dumps recycling in biodesulfurization systems of gas flows with material flows recycling has been developed. They promote a new direction of phosphogypsum application in the atmospheric air protection technologies with the formation of environmentally safe processing technologies and the production of useful recycling products based on the environmental synergistic processes of immobilization sorption on phosphogypsum carrier.

To increase the environmental safety of wastewater treatment plants the recycling of phosphogypsum in the anaerobic stabilization systems of wastewater and sludge sediments (SS) in order to intensify dephosphatation has been substantiated. Environmental synergistic mechanisms of phosphate and SS removal from effluents

are determined at phosphogypsum processing in the protection systems of aquatic ecosystems.

The environmental synergistic mechanisms of biocomposite influence in the system “soil – microbial biome – toxicant” has been investigated to increase environmental safety of natural and anthropogenic landscapes contaminated with HM. A number of sacrificial transformations were identified that determine long-term fixation of HM in stable insoluble structures. Mathematical modelling of the biocomposite effect as a product of anaerobic conversion of SS and phosphogypsum on the soil protective functions has been carried out and, accordingly, the environmental and synergetic model of its influence on the natural regulation process of the buffer properties of the soil complex has been developed.

The practical significance of the paper was confirmed by the results of industrial tests of the developed environmentally safe technologies, one patent for invention of Ukraine, two patents for utility model and introduction acts in the manufacturing and training processes.

Key words: environmental synergetic approach, phosphogypsum recycling, manmade load, environment, environmentally safe technologies.

Підписано до друку 26.04.2019.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 2,7. Обл.–вид. арк. 2,5. Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.