

РОЗВИТОК СОРБЦІЙНИХ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ В КОНТЕКСТІ ПОДОЛАННЯ НАСЛІДКІВ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ В УКРАЇНІ

Плаван В. П.¹, Ляшок І. О.¹, Тарасенко Н. В.², Вале́йка Віргіліус³

¹ Київський національний університет технологій і дизайну
вул. Мала Шияновська, 2, 01011, м. Київ

² Національний університет «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
пр. Берестейський, 37, 03056, м. Київ

³ Каунаський технологічний університет
K. Donelaičio str. 73, LT-44249 Kaunas, Lithuania
plavan.vp@knuud.edu.ua, tarasenko.nv@ukr.net, virgilijus.valeika@ktu.lt

Війна в Україні має катастрофічний вплив на екологічну безпеку всього світу, зокрема через загрози для продовольчої безпеки та наслідки для зміни клімату. Тому розробка нових матеріалів для очищення водного середовища та технологій їх застосування є актуальним завданням, яке відповідає інтересам всіх європейських країн. Розроблені матеріали також можуть використовуватись в технологіях водоочищення для відновлення забруднених водойм. Стаття присвячена створенню нових сорбційно-активних композиційних матеріалів і технологій водоочищення на їх основі для ліквідації наслідків забруднення довкілля, спричинених воєнними діями чи техногенними аваріями. Нові сорбційні матеріали для очищення води від важких металів передбачають поєднання сорбційних властивостей модифікованого кератину, отриманого з відходів шерсті, які утворюються під час лужних обробок у виробництві шкіри з нетканими матеріалами, отриманими з відходів хімічних волокон. Подальше наповнення глинопорошками монтморилонітового типу дозволить покращити сорбційну здатність матеріалу завдяки збільшенню площі питомої поверхні та явищу хемоадсорбції на активних центрах глинистих мінералів.

Створені сорбційно-активні матеріали можуть застосовуватись для виготовлення адсорбційно-фільтрувальних елементів у складі картриджних фільтрів. Застосування глинистих мінералів через введення їх у волокнисту основу у складі полімерних дисперсій дозволить знизити гідрравлічний опір шару сорбенту, не використовуючи сорбент грубих фракцій. Це не призведе до зниження площі активної поглинаючої поверхні та унеможливить від утворення пиловидного продукту на початковій стадії обробки, відповідно не буде потреби очищувати воду від дрібнодисперсного сорбенту. Очищувальні установки можуть вміщувати по декілька адсорбційно-фільтрувальних елементів одночасно для підвищення ефективності водоочищення. *Ключові слова:* сорбційно-активні матеріали, технології водоочищення, неткані матеріали, відходи хімічних волокон, фільтрувальні матеріали.

Development of sorption methods for water purification in the context of overcoming the consequences of military actions in Ukraine. Plavan V., Lyashok I., Tarasenko N., Valeika V.

The war in Ukraine has a catastrophic impact on the ecological security of the whole world, in particular due to threats to food security and consequences for climate change. Therefore, the development of new materials for cleaning the aquatic environment and technologies for their application is an urgent task that meets the interests of all European countries. The developed materials can also be used in water purification technologies for the restoration of polluted water bodies. The article is devoted to the creation of new sorption-active composite materials and water purification technologies based on them to eliminate the consequences of environmental pollution caused by military actions or man-made accidents. New sorption materials for water purification from heavy metals involve a combination of the sorption properties of modified keratin obtained from wool waste, which are formed during alkaline treatments in the production of leather, with non-woven materials obtained from chemical fiber waste. Further filling with montmorillonite-type clay powders will improve the sorption capacity of the material due to an increase in the specific surface area and the phenomenon of chemisorption on the active centers of clay minerals.

The created sorption-active materials can be used for the manufacture of adsorption-filtering elements as part of cartridge filters. The use of clay minerals by introducing them into a fibrous base as part of polymer dispersions will reduce the hydraulic resistance of the sorbent layer without using coarse-grained sorbent. This will not lead to a decrease in the area of the active absorbing surface and will prevent the formation of a dusty product at the initial stage of processing, accordingly, there will be no need to purify water from finely dispersed sorbent. Purification plants can accommodate several adsorption-filtering elements at the same time to increase the efficiency of water purification. *Key words:* sorption-active materials, water purification technologies, nonwoven materials, chemical fiber waste, filter materials.

Постановка проблеми. З огляду на суворі вимоги до промисловості, сільського господарства та комунальних послуг, забруднення навколишнього середовища можна контролювати досить ефективно. З іншого боку, забруднення важко контролювати у випадку природних катастрофічних явищ, таких як

землетруси, урагани, повені тощо. Одними з найсерйозніших випадків забруднення довкілля є військові дії, які, насамперед призводять до значних людських втрат і, водночас, мають серйозний вплив на навколишнє середовище. Більше того, цей вплив не обмежується територією, де відбуваються військові дії, а має глобальний характер. Конфлікти високої інтенсивності, такий як війна росії проти України, потребують величезну кількість палива, що призводить до масових викидів CO_2 , та сприяє зміні клімату. Перші три роки вторгнення росії в Україну призвели до вироблення 230 млн тон CO_2 , що еквівалентно річним викидам Австрії, Угорщини, Чеської Республіки та Словаччини разом узятих [1]. При цьому вперше було зроблено спробу підрахувати викиди від будь-якого конфлікту.

Актуальність дослідження. В умовах сучасної війни водойми забруднюються різноманітними хімічними речовинами, які мігрують далеко за межі зони бойових дій, роками утримуються в ґрунті, рослинності, здатні накопичуватися і потрапляти в організм людини. Причинами загострення екологічних проблем внаслідок війни є зброя та індустріальні об'єкти, які у випадку руйнування можуть стати джерелами екологічних катастроф. Руйнування дамб і розлив річок призводить до деградації значних територій і забруднення ґрунтів і вод. Масивні матеріали та інші нафтопродукти потрапляють у воду від підбитої і знищеної військової техніки, що призводить до забруднення ґрунтів і водних ресурсів. Потрапляння уламків техніки у водні ресурси також небезпечно, бо окислення металів може призводити до забруднення води. Небезпеку становлять і уламки боєприпасів: солі важких металів, отруйні органічні речовини потрапляють у ґрунт, потім до ґрунтових вод, а згодом – до харчових ланцюгів тварин і людей [2, 3]. Важливо, що після закінчення бойових дій (або навіть до), такі забруднювачі – сполуки важких металів, нафтопродукти тощо – потрібно буде видаляти, щоб зробити середовище придатним для існування живих організмів, а для цього знадобиться велика кількість максимально недорогих і простих засобів і методів.

Війна в Україні має катастрофічний вплив на екологічну безпеку всього світу, зокрема через загрози для продовольчої безпеки та наслідки для зміни клімату. Тому розробка нових матеріалів для очищення водного середовища та технологій їх застосування для відновлення вже забруднених водойм є актуальним завданням, яке відповідає інтересам всіх європейських країн.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. В останнє десятиліття, як альтернатива існуючим методам, таким як хімічне осадження, мембранна фільтрація, електрохімічна обробка, екстракція розчинниками, іонний обмін, випарювання [4–6], особлива увага приділяється сорбційним методам контролю забруд-

нення важкими металами. Сорбційне вилучення металів із стічних вод отримало досить широке поширення завдяки високій ефективності і можливості вилучення з водних розчинів металів різних концентрацій. Волокнисті сорбційно-активні матеріали мають вищу хімічну і термічну стійкість, однорідність пористої структури і можливість її регулювання, значний об'єм мікропор і вищий коефіцієнт масопередачі.

Науковці КНУТД мають досвід розробки технологій очищення стічних вод хімічного виробництва [7] та створення пристроїв для електрохімічної обробки стічних вод [8]. Авторами розроблені технології одержання ультратонких синтетичних волокон з фільтрувальними властивостями [9, 10]. Крім того, дисертаційна робота одного з авторів [11] була присвячена розробці способу отримання екологічно безпечного полімерного композиційного матеріалу із сорбційними властивостями із волокнистих відходів текстильної промисловості, які містять 70 % поліуретанового волокна і 30 % поліаміду. Також були запропоновані рекомендації щодо практичного застосування отриманого матеріалу в технологіях водоочищення. Дослідницька група Каунаського технологічного університету має досвід у вивченні властивостей кератину, інших волокнистих білків та їхніх похідних, переробки відходів та їх потенційного застосування [12–14]. Розробка технологій модифікації кератину для підвищення його сорбційних властивостей та створення нових сорбентів з модифікованого кератину або в комбінації з синтетичними чи природними волокнами є своєчасним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переважна більшість сорбційних способів вилучення іонів важких металів із водних розчинів ґрунтуються на явищі хемосорбції. Різні типи сорбентів – зокрема вуглецеві наноматеріали, глини, полімерні матеріали та їхні комбіновані форми – продемонстрували здатність ефективно усувати із стічних вод багато видів органічних і неорганічних забруднень, включаючи іони важких металів.

Хемосорбційні матеріали мають низку унікальних властивостей, які роблять їх незамінними в інженерних та екологічних застосуваннях, зокрема мають високу адсорбційну активність [15]; високу хімічну стабільність, що дозволяє їм зберігати свої адсорбційні властивості за різних зовнішніх факторів протягом тривалого періоду часу [16, 17]. Хемосорбційні матеріали можуть бути спеціально розроблені для вибіркового зв'язування певних забруднювачів. Авторами [18] розроблений сорбційний метод вилучення іонів важких металів за допомогою цеоліту із стічних вод з концентрацією їх від 50 до 300 мг/л. Різна сорбційна ємність цеоліту по відношенню до різних важких металів є недоліком вказаного методу. Зокрема, ефективність вилучення становить приблизно 32 % для Cd, 75 % для Cu, 28 % для Ni, 99 % для Pb та 59 % для Zn.

Існує багато досліджень щодо сорбції іонів Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} та Cr^{6+} за допомогою активованого вугілля та біовугілля [19, 20], отриманих шляхом переробки відходів кукурудзи та інших сільськогосподарських культур. Однак впровадження цих технологій є досить складним, оскільки вони потребують дорогого обладнання, характеризуються високою енергоємністю та ускладненою процедурою регенерації сорбенту. Також відомо про використання силікатних мінералів [21] для сорбції окремих важких металів із промислових стічних вод. Однак ці матеріали проявляють вибірковість; зокрема, їх сорбційна ємність зменшується у такій послідовності: $\text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$, хоча вони є доступними та відносно дешевими, мають вищу сорбційну здатність у порівнянні з іншими мінеральними сорбентами. До того ж хемосорбційні матеріали можуть бути регенеровані, що дозволяє використовувати їх повторно [22].

З огляду на ці властивості хемосорбційних матеріалів, є можливість створювати сорбенти з високою сорбційною активністю та селективністю, що обумовлює їх ефективність у вирішенні проблем забруднення довкілля сполуками важких металів. Поєднання різних матеріалів при створенні хемосорбційних композитів забезпечує досягнення високої ефективності та селективності у вилученні забруднювачів. Вибір відповідних базових матеріалів є одним з перших кроків у створенні хемосорбційних композитів. Текстильні матеріали, зокрема волокнисті відходи [23], можуть служити хорошими базовими матеріалами для створення хемосорбційних композитів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Стаття присвячена розробці нових сорбційно-активних композиційних матеріалів на основі відходів хімічних волокон в комбінації з відходами модифікованого кератину шерсті/волосся для видалення іонів важких металів і нафтопродуктів з водного середовища після військових дій і техногенних аварій, оскільки проблема ефективного очищення стічних вод від мінеральних і органічних забруднювачів до сьогодні остаточно не вирішена. Потребують уточнення параметри технології комплексного водочищення із застосуванням волокнистих сорбційних матеріалів. Дослідження сорбційних властивостей отриманих матеріалів/композитів та цілеспрямована модифікація цих властивостей дозволить ефективно вирішувати проблему видалення іонів важких металів та нафтопродуктів із водного середовища.

Новизна, методологічне значення досліджень. Як відомо, полімерні матеріали різного призначення можуть набувати свої споживчі властивості за рахунок комбінування матричних полімерів, наповнювачів, модифікаторів, технологічних та інших добавок, що використовуються відповідно до вимог згідно областей застосування. При цьому найважливіші

базові властивості матеріалів можуть в досить широких межах варіюватися за допомогою різних добавок при змішуванні. Крім того, за допомогою цілеспрямовано підібраних наповнювачів полімерним матеріалам можуть надаватися абсолютно нові властивості, не обумовлені структурою матричного полімеру.

Виходячи з вищенаведеного, основним методичним підходом у роботі є реалізація новітніх методів модифікації для цілеспрямованого та тонкого керування структурою та властивостями матеріалів за рахунок використання: гібридних наповнювачів, які дозволяють реалізувати синергетичні ефекти при одержанні фільтрувальних матеріалів; мінеральних поверхнево-модифікованих наповнювачів, які дозволяють покращити механічні та еластичні характеристики конструкційних матеріалів; фізично модифікованих волокнистих систем (наповнених, пористих) для отримання багатошарових нетканих поліфункціональних матеріалів із сорбційними властивостями, що є абсолютно новим засобом підвищення ефективності процесу сорбції іонів важких металів та забезпечить селективність по відношенню до іонів різних металів, створить умови для регенерації сорбентів.

Виклад основного матеріалу. Базовою сировиною для отримання сорбційно-активних матеріалів можуть бути волокнисті відходи шкіряного, текстильного і полімерного виробництва. Для поліпшення сорбційних характеристик до складу може вводиться 30–50 % відходів натуральних волокон або модифікованого кератину, що також підвищує однорідність пористої структури матеріалу.

Шерсть є одним з кращих природних сорбентів за своєю здатністю до поглинання. При цьому природна пружність шерсті дозволяє проводити часткову або повну регенерацію сорбенту, але після декількох циклів шерсть стає непридатною для подальшого використання [24]. Висока вартість шерсті, недостатня її кількість і високі вимоги до зберігання (ризик ураження комахами і гризунами чи біохімічного перетворення) не дозволяють вважати її перспективним сорбентом. Як сорбенти можна використовувати широкий спектр відходів, включаючи такі кератинові матеріали як вовна, пір'я, волосся і ріг, які також є відносно поширеними і недорогими матеріалами, що утворюються у великих кількостях, і які, завдяки високому вмісту карбонових, гідроксильних, амінних і сірчаних функціональних груп, можуть бути ефективно використані для видалення важких металів. Використання кератинових відходів для отримання сорбентів значно їх здешевлює, а поєднання сорбційних властивостей кератину з іншими матеріалами створює умови для успішної регенерації сорбенту. Необроблений кератин вовни / волосу або пір'я має властивість поглинати і зв'язувати іони важких металів [25]. При виробленні шкір, коли волос / шерсть видаляються з її поверхні в результаті обробки суспензіями $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і Na_2S , волос / шерсть імунізуються і не руйнуються.

При цьому утворюється велика кількість імунізованих волосу/вовни, кератин яких відрізняється за своїми властивостями від необробленого. Для активації сорбційних властивостей цей кератин або інший відпрацьований кератин можна модифікувати під дією лужних речовин і ферментів, як разом, так і окремо.

Кератин має високу потенційну здатність до взаємодії з різними реагентами, зокрема солями важких металів, однак для її реалізації необхідно створювати певні технологічні умови шляхом підготовки структури кератину з метою збільшення доступності активних груп білків до відповідних реагентів, що досягається в результаті лужних або/і ензимних обробок [26]. Тож поєднання сорбційних властивостей модифікованого кератину, отриманого з відходів шерсті, які утворюються під час лужних обробок у виробництві шкіри, з нетканими матеріалами, отриманими з відходів хімічних волокон у суміші з натуральними волокнами льону чи конопель, дозволить отримати нові сорбційні матеріали для очищення води від важких металів. Подальше наповнення глинопорошками монтморилонітового типу дозволить покращити сорбційну здатність матеріалу завдяки збільшенню площі питомої поверхні та явищу хеомадсорбції на активних центрах глинистих мінералів.

Неткані фільтрувальні матеріали знайшли найбільше використання у змінних фільтрувальних елементах [27], зокрема для картридж-фільтрів циліндричної форми. Більшість картриджних фільтрів мають гофрований носій, який називають «складчатою упаковкою». Для того щоб складки стали фільтрувальними елементами, їх треба стабілізувати за допомогою різних опорних конструкцій, таких як ущільнювачі, торцеві кришки, опорні рами, розділювачі складок, пристрої для фіксації складок тощо. Картриджні фільтри – це частина системи фільтрації, яку можна вилучити з основного корпусу для утилізації чи заміни або очищення та повторного використання. У деяких випадках їх можна очистити на місці за допомогою таких процедур, як зворотний потік, і повторно використовувати без видалення.

Існує велика різноманітність картриджних фільтрів і широкий вибір фільтрувальних матеріалів, які використовуються в цих картриджах: ткани матеріали, мембрани, намотана пряжа та/або філаменти, сітчасті ситові матеріали та інші нові фільтрувальні середовища. На рисунку 1 зображено конструкцію складчастого елемента з використанням повсті. Складчастий фільтр підтримується жорсткою решітчастою опорною сіткою, щоб запобігти згортанню складок. Одноразовий картридж або елемент є достатньо недорогим, тому будь-яка спроба очистити та повторно використовувати картридж буде економічно не виправданою.

Обробка води природними сорбентами може проводитись пропусканням води через шар сорбенту, або змішуванням води із сорбентом із подальшим розділенням [28]. Обидва методи мають свої переваги та

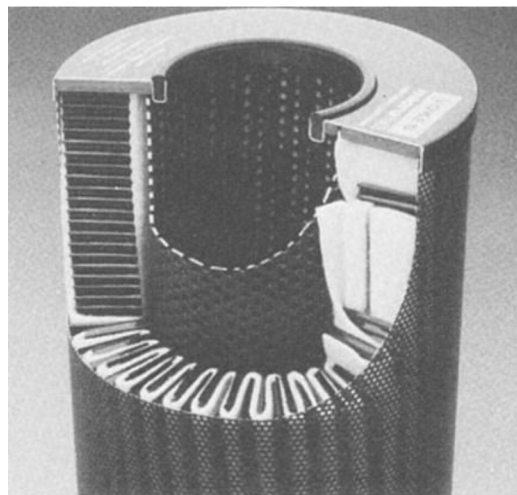


Рис. 1. Складчастий фільтрувальний елемент [27]

недоліки. Пропускання води дозволяє уникнути стадії відділення відпрацьованого сорбенту. Значний гідравлічний опір дрібнопомеленого шару сорбенту можна віднести до недоліків цього методу. Знизити опір можна застосовуючи сорбент грубих фракцій, хоча при цьому є ризик зниження площі активної поглинаючої поверхні. В процесі помелу природних сорбентів, незалежно від величини отриманої фракції, утворюється деяка кількість пиловидного продукту, який вимивається водою на початковій стадії обробки. В такому випадку необхідно передбачати стадію очищення води від дрібнодисперсного сорбенту.

Наявність волокнистої основи дозволить поєднати сорбційні і фільтрувальні властивості, що підвищить ефективність очищення природних водойм. Можливо застосування такого адсорбенту для замулених стоків без загрози забивання адсорбента. Застосування глинистих мінералів через введення їх у волокнисту основу у складі полімерних дисперсій дозволить знизити гідравлічний опір шару сорбенту, не використовуючи сорбент грубих фракцій. Це не призведе до зниження площі активної поглинаючої поверхні та забезпечить від утворення пиловидного продукту на початковій стадії обробки, відповідно не буде потреби очищувати воду від дрібнодисперсного сорбенту. Системи водоочищення можуть вміщувати по декілька сорбційно-фільтрувальних елементів одночасно, що підвищує ефективність видалення забруднювачів.

Головні висновки. Створення нових сорбційно-активних композиційних матеріалів на основі відходів хімічних волокон в комбінації з відходами модифікованого кератину шерсті/волосся і технологій водоочищення на їх основі для ліквідації наслідків забруднення довкілля, спричинених воєнними діями чи техногенними аваріями, розширить спектр природоохоронних технологій України і Литви. Крім того, розробка таких сорбційно-активних матеріалів дозволить утилізувати відходи шерсті, натуральних і хімічних волокон, які зазвичай вивозяться на зва-

лица. Це створить умови для кооперації між підприємствами різних напрямків діяльності, забезпечить зниження собівартості основної продукції. Завдяки цілеспрямованому впливу на структуру композитних матеріалів можливе надання їм комплексу нових характеристик, що сприятиме розширенню галузей їх застосування.

Створені сорбційно-активні матеріали можуть застосовуватись для виготовлення сорбційно-фільтрувальних елементів у складі картриджних фільтрів. Очищувальні установки можуть вміщувати по декілька сорбційно-фільтрувальних елементів одночасно для підвищення ефективності водоочищення.

Перспективи використання результатів дослідження. Одержані результати стануть підґрунтям для стійкого розвитку промислових підприємств та отримання додаткових соціально-економічних, інноваційно-технологічних та екологічних ефектів за рахунок створення нового інноваційного продукту, а саме нових сорбційно-активних композиційних матеріалів з керованими характеристиками їх мікро-

та макроструктури. Завдяки цілеспрямованому впливу на структуру матеріалів можливе надання їм комплексу нових характеристик, що сприятиме розширенню сфери їх застосування і відповідно створюватиме підґрунтя для широкої кооперації підприємств різних галузей: легкої, хімічної, медичної, машинобудівної та інших.

Виробництво сорбційних матеріалів в подальшому може бути організовано на базі одного з підприємств, яке спеціалізується на випуску волокнистих матеріалів іншого призначення. Це сприятиме кооперації між підприємствами різних напрямків діяльності, що дозволить зменшити техногенне навантаження на довкілля. Отримані матеріали можуть бути використані в технологіях водоочищення для забезпечення населення чистою водою і збереження водних ресурсів.

Таким чином, застосування нових матеріалів в процесах водоочищення сприятиме відновленню забруднених в результаті воєнних дій водойм, що відповідає інтересам всіх європейських країн.

Література

1. How does war damage the environment? *Law and Policy* : веб-сайт. URL: <https://ceobs.org/how-does-war-damage-the-environment/> (дата звернення: 25.11.2025).
2. Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., Gleick P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48, №. 5. P. 631–647. DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
3. Stokral V., Kurovska A., Stokral M. More river pollution from untreated urban waste due to the Russian-Ukrainian war: a perspective view. *Journal of Integrative Environmental Sciences*. 2023. Vol. 20, №. 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/1943815X.2023.2281920>
4. Wang Y.-H., Lin S.-H., Juang R.-S. Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using various low-cost adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*. 2003. Vol. 102, №. 2–3. P. 291–302. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00218-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00218-8)
5. Volesky B. Detoxification of metal-bearing effluents: Biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*. 2001. Vol. 59, №. 2–3. P. 203–216. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00160-2)
6. Wang J.-L., Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*. 2009. Vol. 27, №. 2. P. 195–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.002>
7. Bessarabov V., Vasylenko V., Vakhitova L., Kuzmina G., Zderko N., Plavan V., Zagoriy G. Development of a decontamination system for decomposing N-(phosphonomethyl)glycine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3(6(99)). P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168391>
8. Пристрій для електрохімічної обробки стічних вод : пат. 29352 Україна : МПК C02F 1/46. № 98062829 ; заявл. 01.06.1998 ; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5.
9. Beloshenko V. A., Plavan V. P., Rezanova N. M., Savchenko B. M., Vozniak I. Production of high performance multilayer fine fibrous filter material by application of material extrusion-based additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101(9–12). P. 2681–2688. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3152-x>
10. Beloshenko V. A., Chishko V. V., Plavan V. P., Rezanova N. M., Savchenko B. M., Sova N. V., Vozniak I. Production of filter material from polypropylene/copolyamide blend by fused deposition modeling: role of production conditions and ZrO₂ nanoparticles. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 8, №. 4. P. 253–262. DOI: <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0195>
11. Тарасенко Н. В. Створення хемосорбційних композиційних матеріалів на основі волокнистих відходів для очищення водних розчинів від іонів важких металів : дис. ... д-ра філософії : 161 Хімічні технології та інженерія / Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. Київ, 2023. 180 с.
12. Valeika V., Širvaitytė J., Bridžiuvienė D., Švedienė J. An application of advanced hair-save processes in leather industry as the reason of formation of keratinous waste: few peculiarities of its utilisation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26(6). P. 6223–6333.
13. Širvaitytė J., Šiugždaitė J., Valeika V. Application of commercial essential oils of eucalyptus and lavender as natural preservative for leather tanning industry. *Revista de Chimie*. 2011. Vol. 62(9). P. 884–893.
14. Biškauskaitė R., Miškūnaitė L., Plavan V., Valeika V. Hydrolysis of used leather and application of hydrolysates. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2024. Vol. 73(1). P. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.3176/proc.2024.1.07>
15. Pourhakkak P., Taghizadeh A., Taghizadeh M., Ghaedi M., Haghdoust S. Fundamentals of adsorption technology. *Interface Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 1–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818805-7.00001-1>
16. Angove M. J., Johnson B. B., Wells J. D. The influence of temperature on the adsorption of cadmium(II) and cobalt(II) on kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1998. Vol. 204(1). P. 93–103. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5549>
17. Al-Degs Y., et al. Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. *Dyes and Pigments*. 2008. Vol. 77(1). P. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2007.03.001>

18. Shaheen S. M., Derbalah A. S., Moghanm F. S. Removal of heavy metals from aqueous solution by zeolite in competitive sorption system. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2012. Vol. 3(4). P. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJESD.2012.V3.248>
19. Duan C., Ma T., Wang J., Zhou Y. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering*. 2020. Vol. 37. Article 101339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339>
20. Kołodyńska D., Krukowska J., Thomas P. Comparison of sorption and desorption studies of heavy metal ions from biochar and commercial active carbon. *Chemical Engineering Journal*. 2017. Vol. 307. P. 353–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.088>
21. Karnib M., Kabbani A., Holail H., Olama Z. Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 50. P. 113–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014>
22. Baskar A. V., et al. Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 822. Article 153555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153555>
23. Liu X., et al. Preparation of modified montmorillonite and its application to rare earth adsorption. *Minerals*. 2019. Vol. 9(12). P. 747. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9120747>
24. Nikiforova T., Kozlov V., Islyaikin M. Sorption of d metal cations by keratin from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019. Vol. 7(5). Article 103417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103417>
25. Zhang H., Carrillo F., López Mesas M., Palet C. Valorization of keratin biofibers for removing heavy metals from aqueous solutions. *Textile Research Journal*. 2018. Vol. 89(7). P. 1153–1165. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517518764008>
26. Simonič M., Fras Zemljič L. Functionalized wool as an efficient and sustainable adsorbent for removal of Zn(II) from an aqueous solution. *Materials*. 2020. Vol. 13(14). Article 3208. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13143208>
27. Hutten I. M. Liquid filter applications. In: *Handbook of Nonwoven Filter Media*. Ed. by I. M. Hutten. Elsevier, 2007. P. 291–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-185617441-1/50022-6>
28. Мальований М. С., Петрушка І. М., Сакалова Г. В., Василінич Т. М. Розвиток і відтворення ресурсного потенціалу суб'єктів еколого-економічних, туристичних та екоінформаційних систем: монографія / за ред. М. С. Мальованого. Львів: В-во Львівської політехніки, 2015. 340 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025