

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 66

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.1>**О. Р. БЄЛЯНСЬКА**

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8026-8004

Л. В. ВАЩЕНКО

завідувач лабораторії кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0006-6464-2784

Д. С. ГРОМОВА

магістр кафедри фізичної, органічної та неорганічної хімії
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
ORCID: 0009-0003-5735-5240

А. Л. КОВАЛЕНКО

кандидат хімічних наук, доцент,
завідувач кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0003-1496-6634

О. В. КРАВЧЕНКО

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
професор кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0006-8833-3441

**ВИКОРИСТАННЯ ГЛАУКОНІТУ В ТЕХНОЛОГІЇ ЗНЕШКОДЖЕННЯ
РІДКИХ ВІДХОДІВ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Через обмеження у доступі до широкого асортименту вугільних марок, промисловість вимушена використовувати тільки 2–3 марки вугілля. Такий технологічний прийом негативно впливає на уловлення і переробку хімічних продуктів коксування. Цехи спроектовані на певні склади шихт, де можуть утилізуватися рідкі відходи тільки обмеженим вмістом поліютантів. Утворені рідкі відходи не знешкоджуються повністю на стадії біохімічного очищення і, коли надходять на гасіння коксу, випаровуються, потрапляють у навколишнє середовище.

Метою роботи є моделювання процесу сорбції поліютантів на глауконіті, що впливає на ведення технології переробки рідких відходів коксохімічного виробництва. Глауконіт не має єдиної хімічної формули через коливання його вмісту. Формула змінюється у залежності від родовища, де він утворився. Узагальнена хімічна формула глауконіту має вигляд $(K, Na)(Fe^{3+}, Al, Mg)_2[(OH)_2(Si, Al)_2O_{10}]$. Великі родовища глауконіту є у Західно-Волинському регіоні та у Адамівському родовищі Хмельницької області.

У роботі шляхом математичного моделювання створено фрагмент структури глауконіту Адамівського родовища Хмельницької області (довжина зв'язку між Калієм і Оксигеном становить 2,265 Å; кут зв'язування Алюміній-Оксиген-Сіліцій становить 133°; довжина зв'язку Алюміній-гідроксид становить 1,834 Å; енергія фрагмента після оптимізації геометрії становить 758,992 кДж/моль). Запропоновано механізм сорбції поліютантів із рідких відходів коксохімічного виробництва на глауконіті. Висока специфічність сорбції глауконіту до наведених поліютантів обумовлюється дисперсійними силами Ван-дер-Ваальсових взаємодій та іонообмінним механізмом.

Пропонується методом обкатки або екструзією отримувати гранульований сорбент із хімічно-активованого глауконіту для знешкодження рідких відходів коксохімічного виробництва, що містять широкий спектр поліютантів.

Наведено удосконалену технологічну схему установки знефенолення стічних вод біохімічним методом із попереднім доочищенням рідких відходів шляхом адсорбції на кислотно-активованому гранульованому глауконіті. Після зниження ефективності вилучення фенолів нижче 50 % пропонується проводити десорбцію HCl 0,1 М протягом 6–12 діб.

Ключові слова: рідкі відходи, коксохімічна галузь, адсорбція, стічні води, глауконіт, кислотна активація, Avogadro 1.2.1, Molview.

O. R. BELYANSKA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemical and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0000-0001-8026-8004

L. V. VASHCHENKO

Head of the Laboratory of the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0006-6464-2784

D. S. GROMOVA

Master at the Department of Physical, Organic and Inorganic Chemistry
Dnipro National University named after Oles Honchar
ORCID: 0009-0003-5735-5240

A. L. KOVALENKO

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemical and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0000-0003-1496-6634

O. V. KRAVCHENKO

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,
Professor at the Department of Chemical and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0006-8833-3441

THE USE OF GLAUCONITE IN THE TECHNOLOGY OF THE DISPOSAL OF LIQUID WASTE OF THE COKE CHEMICAL PRODUCTION

Due to restricted access to a wide range of coal grades, the industry is forced to utilize only 2–3 coal types. Such a technological approach negatively impacts the technology of capturing and processing the chemical products of coking. These plants are designed for specific compositions of charge materials, where liquid waste with only limited pollutant content can be utilized. The formed liquid waste is not completely neutralized in the biochemical purification stage and, upon entering the coke quenching process, evaporates, releasing pollutants into the environment.

The purpose of the work is to model the process of pollutant sorption on glauconite, which affects the technology of processing liquid waste of coke chemical production. Glauconite does not have a single chemical formula due to fluctuations in its content. The formula varies depending on the deposit where it was formed. The generalized chemical formula of glauconite has the form $(K, Na)(Fe^{3+}, Al, Mg)_2[(OH)_2(Si, Al)_4O_{10}]$. There are large deposits of glauconite in the Western Volyn region and in the Adamiv deposit of the Khmelnytskyi region.

Using mathematical modeling in the research, a fragment of the structure of Adamivka deposit glauconite in Khmelnytskyi region was created (the bond length between Potassium and Oxygen is 2.265 Å; the Aluminum-Oxygen-Silicon bonding angle is 133°; the Aluminum-hydroxide bond length is 1.834 Å; the energy of the fragment after geometry optimization is 758.992 kJ/mol). A mechanism for the sorption of pollutants from liquid waste of coking chemical production on glauconite has been proposed. The high specificity of glauconite's sorption to the mentioned pollutants is determined by van der Waals dispersion forces and an ion exchange mechanism.

It is proposed to obtain a granular sorbent from chemically activated glauconite by the method of running-in or extrusion for the disposal of liquid waste from coke-chemical production containing a wide range of pollutants.

An improved technological scheme for the installation of phenol removal from wastewater by biochemical methods with preliminary purification of liquid waste through adsorption on acid-activated granulated glauconite is provided. If the efficiency of phenol removal decreases below 50%, it is proposed to conduct desorption with 0.1 M HCl for 6–12 days.

Key words: liquid waste, coking industry, adsorption, wastewater, glauconite, acid activation, Avogadro 1.2.1, Molview.

Постановка проблеми

В умовах військової агресії через відсутність можливості транспортування різноманітних марок вугілля постає проблема створення коксу із тих марок, що є більш доступними: газового, коксового, слабоспівливого. Використання тільки 2–3 х марок вугілля впливає не тільки на якість утвореного коксу, але й на всю технологію загалом. Цехи вловлення і переробки хімічних продуктів коксування спроектовані на певні склади шихт, де може

утворюватися якісний кокс із заданими високими його характеристиками. Із такою зміною складу шихти відбувається зміна у складі коксового газу, хімічних речовин, складу рідких відходів. Такі рідкі відходи не знешкоджуються повністю на стадії біохімічного очищення і, потрапляючи на гасіння коксу, випаровуються у навколишнє середовище.

Відомі роботи [1–4], де поряд із біохімічним методом знешкодження рідких відходів коксохімічного виробництва використовується попередня сорбція на природному сорбенті – глауконіті. Використання гравітаційних комбінованих фільтрів із завантаженням кислотного-активованого глауконіту і активованого вугілля допоможе знизити навантаження на стадію біохімічної очистки та поліпшити екологічний стан територій коксохімічних підприємств та дотичних територій. Слід відмітити, що у попередніх роботах недостатньо сформульовано механізм сорбції, тому саме описання механізму сорбції на глауконіті для глибшого розуміння і прогнозування технології знешкодження рідких відходів коксохімічного виробництва є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [1] представлено удосконалену технологію сорбційних методів очистки стічних вод на модифікованому гранульованому глауконіті. Ефективність вилучення важких металів із стічних вод гальванічної дільниці підприємства ПАТ «ДВРЗ» становила 74–95 %.

Вченими [2] запропоновано цікавий технологічний прийом використання активної сорбційної мінеральної добавки – подрібнений мінеральний порошок глауконіту. Технологія введення сорбційної добавки у будівельні матеріали дозволяє знизити вміст природних радіонуклідів у сумішах та виробках. Досліджено [3] гібридні мінерал-полімерні композитні матеріали на основі поліаніліну та кремнезем-глауконіту. Виявлено, що участь поверхні мікрочастинок глауконіт-кремнезему у процесі полімеризації аніліну призводить до суттєвого зростання структурованості полімеру в композиті.

Проведено порівняльні дослідження адсорбційної здатності глауконіту і активованого вугілля БАУ-А для створення комбінованого сорбенту [4]. Виявлено, що глауконіт ефективніше за активоване вугілля поглинає альдегіди і вищі спирти. Запропоновано використовувати суміш сорбційну в малих ємностях, що містить 10 % активованого вугілля і 90 % глауконіту. У промислових масштабах пропонується встановлювати окремо адсорбер із глауконітом, окремо, із активованим вугіллям, вугілля повинно бути наприкінці технологічної лінії для кращої його регенерації і довгого строку експлуатації адсорбційної установки.

Запропонована принципова технологічна схема доочистки оборотних вод із використанням натуральних силікатних сорбентів [5]. За проведеною техніко-економічною оцінкою вилучення іонів важких металів, собівартість очищення води за традиційною іонообмінною технологією становить 2 грн/м³, а з використанням КУ-2-8-М знижується до 0,51 грн/м³.

Відомо, що глауконіт є найбільш поширеним мінералом – алюмосилікатом, де в якості катіонів виступають Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺. Глауконіт міститься у осадових породах. Використання глауконіту в якості сорбенту обумовлює його високими іонообмінними, буферними та сорбційними властивостями. Глауконіт міститься у пісках, глинах, вапняках, і надає зеленого кольору породі. Кислотно-активованій сорбент на основі глауконіту має високі експлуатаційні показники, не вимагає додаткових заходів по промиванню фільтраційної колонки і її перезавантаженню.

Глауконіт не має єдиної хімічної формули через коливання його вмісту. Формула змінюється у залежності від родовища, де він утворився. Узагальнена хімічна формула глауконіту має вигляд (K, Na)(Fe³⁺, Al, Mg)₂[(OH)₂(Si, Al)₄O₁₀] [6]. Великі родовища глауконіту є у Західно-Волинському регіоні та у Карачаївському, Адамівському родовищі Хмельницької області.

При обробці глауконітів кислотою відбувається «розчинення» внутрішньої решітки, пов'язаної з видаленням основної маси гідратованих оксидів. Так, при обробці HCl 0,1 М і витримкою продовж 12 тижнів статична об'ємна ємність глауконіту становить 0,25 ммоль/г, а при обробці KOH 0,1 М через той самий час статична об'ємна ємність глауконіту становить 0,21 ммоль/г. При цьому на поверхні глауконіту утворюються тонкі шари аморфної фази. Незначні зміни сорбційної ємності, обробленого розчином кислоти, глауконіту пов'язані з не істотною зміною структури глауконіту. Обробка розчинами луку призводить до адсорбції ОН-комплексів алюмосилікатним каркасом, в результаті чого, збільшується кількість обмінних центрів та зростає значення обмінної ємності [7].

Серед головних факторів, що впливають на ведення процесу адсорбції на глауконіті слід виділити наступні: вихідна концентрація поллютанту; кількість сорбенту; рН (збільшення рН із 6,5 до 8,5 підвищує ефективність очистки на глауконіті на 10 %); температура розчину; час адсорбції; гідродинамічні умови (статична чи динамічна адсорбція). Тому, дослідження механізму адсорбції на глауконіті є важливим аспектом у розумінні процесу та прогнозуванні результатів сорбції.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є моделювання процесу сорбції поллютантів на глауконіті, що впливає на ведення технології переробки рідких відходів коксохімічного виробництва.

Викладення основного матеріалу дослідження

Доведено [8], що при вихідній концентрації фенолів від 100 до 400 мг/дм³ у рідких відходах коксохімічного виробництва (стічні води) можливо вилучення фенолів до залишкової концентрації 4 – 2,0 мг/дм³ після адсорбції

на необробленому природному глауконіті (питома активна поверхня 30 м²/г, величина адсорбції 37,6 мг/г). На кислотно-активованому глауконіті (питома активна поверхня 153–370 м²/г, величина адсорбції 63,8–79,6 мг/г) спостерігається 100 % вилучення фенолів із стічних вод. Температура розчину у обох випадках була 20 °С, рН 6,5. Отже, використання гранульованого кислотно-активованого глауконіту у адсорбері знешкодження коксохімічних рідких відходів є важливим технічним моментом у переробці рідких відходів.

Шляхом молекулярного моделювання (програма Avogadro 1.2.1 [9], вебдодаток Molview [10]), створено фрагмент структури глауконіту Адамівського родовища Хмельницької області, що представлена на рисунку 1.

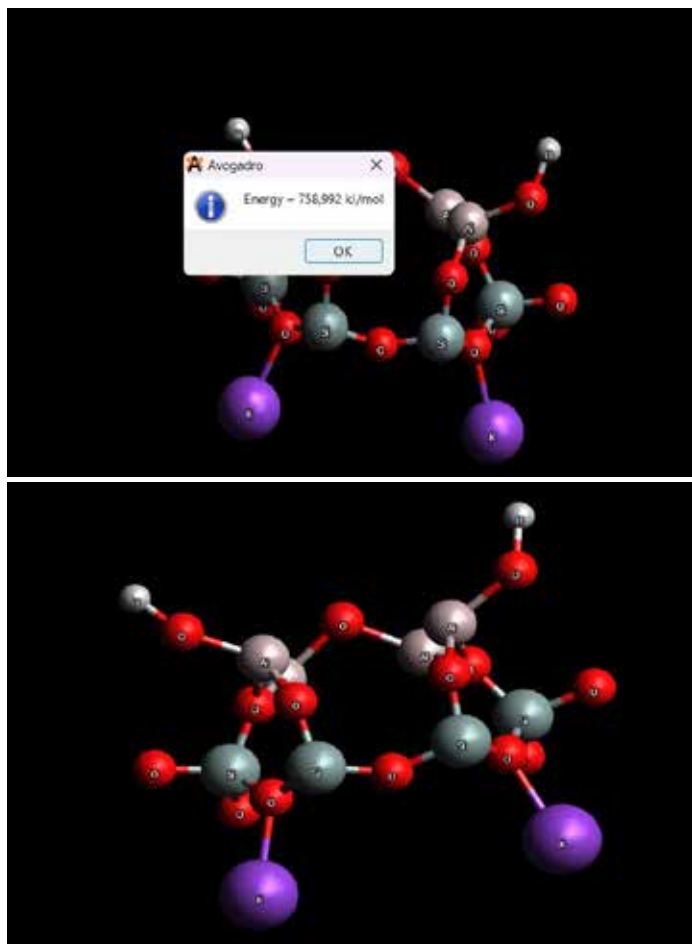


Рис. 1. Фрагмент структури глауконіту

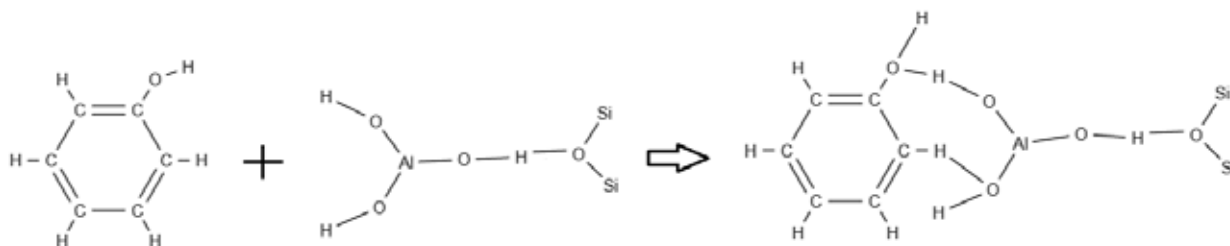
Довжина зв'язку між Калієм і Оксигеном становить 2,265 Å. Кут зв'язування Алюміній-Оксиген-Сіліцій становить 133°. Довжина зв'язку Алюміній-гідроксид становить 1,834 Å. Енергія фрагмента після оптимізації геометрії становить 758,992 кДж/моль.

Досліджено сорбційні процеси вилучення поллютантів із рідких відходів, зокрема фенолів і аміаку на глауконіті. Для ілюстрації наявності металу у фрагменті структури представлено наявність іонів Al.

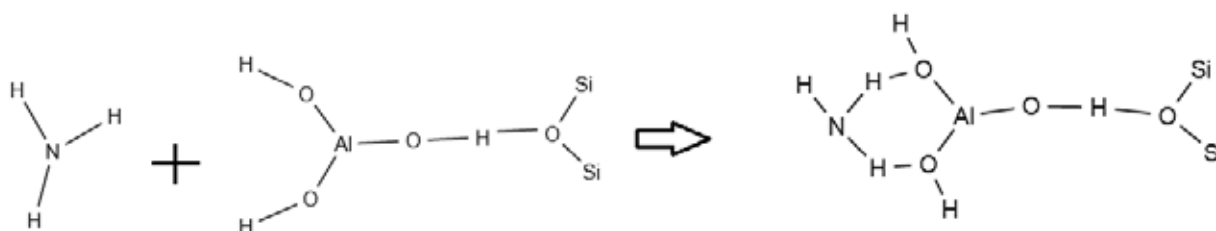
Моделювання структури глауконіту проводилося після математичного розрахунку геометричних координат кожного з атомів фрагмента структури глауконіту (рис. 1) на основі довідкових даних про довжини зв'язків. З використанням алгоритму оптимізації при пошуку структури, що відповідає мінімуму потенційної енергії, проводили оптимізацію геометрії структури глауконіту. Методами молекулярної механіки взаємодіючи атоми частинки глауконіту і фенолів, аміаку встановлювали на рівноважній відстані Ван-дер-Ваальсової взаємодії та знову оптимізували геометрію системи.

Взаємодія у сорбційному комплексі «фенол – глауконіт» може мати специфічний характер, який обумовлено утворенням водневих зв'язків поллютанту з атомами кисню глауконіту: У цьому випадку вільна пара гідроксильних груп, що залишилася, здатна до подальшого утворення водневих зв'язків, може ініціювати наступне зростання ланцюжка. Цей процес пояснює вид кривих, що спостерігаються при багаторазовій адсорбції. Оскільки зростання ланцюгів при багаторазовій адсорбції починає проходити асинхронно, відповідно в адсорбційному шарі одночасно починають утворюватися ланцюжки з одним і двома кінцевими центрами утворення водневого

зв'язку:



Таким чином, сорбція поллютантів, фенолів та аміаку на глауконіті забезпечується водневими зв'язками і включає в себе періодичне утворення одного або двох таких зв'язків.



Створене комп'ютерне моделювання дозволяє передбачити високу селективність матеріалу не тільки до фенолів і аміаку. За представленим вище механізмом відбувається сорбція і інших поллютантів, таких як піридин, роданіди, гідроген сульфід та ін., що містяться у рідких коксохімічних відходах. Через структуру, що утворює довгі ланцюжки із прошарком води, поллютанти із рідких відходів можуть прикріплюватися вздовж усього ланцюжка. Висока специфічність сорбції глауконіту до наведених поллютантів обумовлюється дисперсійними силами Ван-дер-Ваальсових взаємодій та іонообмінним механізмом. Отримані результати узгоджуються із попередніми дослідженнями за темою сорбції на природних глинах [8].

Отже, методом обкатки або екструзією можливо отримувати гранульований сорбент із хімічно-активованого глауконіту, який буде ефективно знешкоджувати рідкі відходи коксохімічного виробництва від широкого спектру поллютантів, і буде придатний до подальшого використання за схемою сорбція – десорбція.

На рисунку 2 представлено удосконалену технологічну схему установки для знефенолення стічних вод біохімічним методом із використанням попереднього доочищення рідких відходів шляхом адсорбції на глауконіті.

Удосконалена технологічна схема установки для знефенолення стічних вод біохімічним методом (рис. 2) містить 1 врівнювальний резервуар, 2 пісколовку, розподільчу камеру, 4 первинний відстійник, 5 масловідділювач, 6 холодильники для охолодження над смольної води, 7 склад суперфосфату, 8 баки для приготування розчину суперфосфату, 9 повітредувка, 10 насос для відкачки смоли та масла, 11 збірник смоли та масла, 12 збірник фенольних вод, 15 насоси для перекачування фенольних вод, 16 збірник над смольної води, 17 збірник очищеної води, 18 вторинний відстійник, 19 адсорбер із гранульованим глауконітом, 20 біологічний басейн, 21 пропеллерні насоси, 22 запасні ємності для активного мулу, 23 усереднювач, 24 ерліфт, 25 дренажні площини.

Ємності для зберігання рідин проведення процесу десорбції та обслуговуючі насоси не виведені на схему. Передбачається, що гранульований кислотно-активованій глауконіт буде завантажуватися у адсорбер 19 (питома активна поверхня 153–370 м²/г, величина адсорбції 63,8–79,6 мг/г, рН не менше 6,5 [8]). Після зниження ефективності вилучення фенолів нижче 50 % пропонується проводити десорбцію HCl 0,1 М протягом 6–12 діб.

Висновки

Створено фрагмент структури глауконіту шляхом молекулярного моделювання (довжина зв'язку між Калієм і Оксигеном становить 2,265 Å; кут зв'язування Алюміній-Оксиген-Сіліцій становить 133°; довжина зв'язку Алюміній-гідроксид становить 1,834 Å; енергія фрагмента після оптимізації геометрії становить 758,992 кДж/моль).

Встановлено, що сорбція поллютантів, зокрема фенолів та аміаку на глауконіті забезпечується водневими зв'язками і включає в себе періодичне утворення одного або двох таких зв'язків. Запропоновано механізм сорбції поллютантів із рідких відходів коксохімічного виробництва на глауконіті. Висока специфічність сорбції глауконіту до наведених поллютантів обумовлюється дисперсійними силами Ван-дер-Ваальсових взаємодій та іонообмінним механізмом.

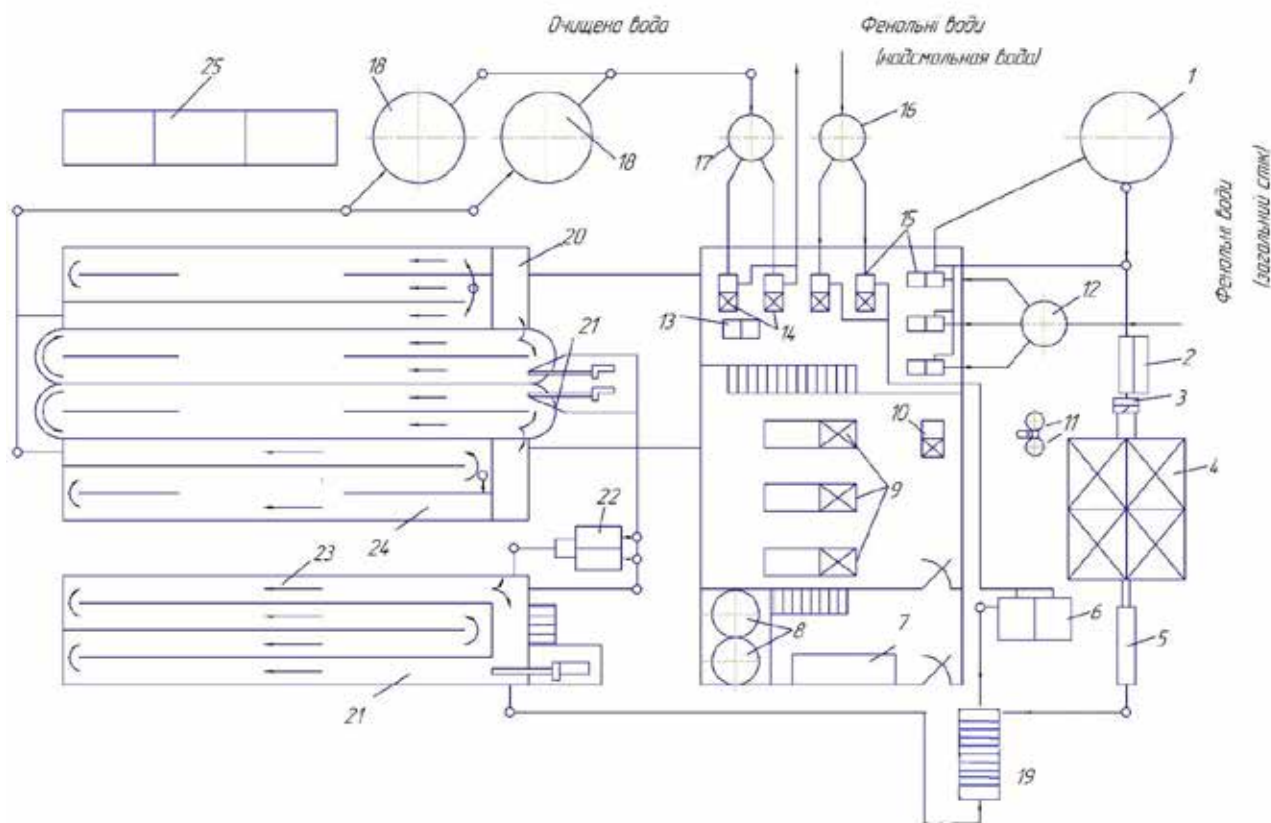


Рис. 2. Удосконалена технологічна схема установки для знефенолення стічних вод біохімічним методом

Запропоновано удосконалену технологічну схему установки знефенолення стічних вод біохімічним методом із попереднім доочищенням рідких відходів шляхом адсорбції на кислотно-активованому гранульованому глауконіті. Після зниження ефективності вилучення фенолів нижче 50 % пропонується проводити десорбцію HCl 0,1 М протягом 6–12 діб.

Список використаної літератури

1. Коваленко А. (2021) Удосконалення сорбційних методів очистки стічних вод від солей важких металів [Електронний ресурс]. Український державний університет науки і технологій. Режим доступу: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/de5bb5d1-24f1-4c02-a4da-be647874c554/content> (дата звернення: 15.11.2023).
2. Друкований М. Ф., Ковальський В. П., Бурлаков В. П. Зниження радіоактивності будівельних матеріалів та виробів [Електронний ресурс] / Матеріали ХІХ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27–28 квітня 2020 р. Електрон. текст. дані. 2020. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/8959>.
3. Yatsyshyn M., Reshetnyak O., Dumanchuk N., Kulyk Yu., Fartushok N., Stadnyk Yu. Hybrid mineral-polymeric composite materials on the basis of the polyaniline and glauconite-silica/ Chemistry & Chemical Technology. Vol. 7, No. 4, 2013. P. 441–444.
4. Ткачук Н.А., Мельник Л.М. Порівняння адсорбційних властивостей глауконіту та активного вугілля при очищенні бортивок. / Харчова промисловість. № 10. 2011. С. 208–212.
5. Хохотва А. П., Маслянка К. С. Сорбція міді та нікелю фосфорильованими сорбентами у статичних умовах / Вісник НТУ «ХП»: Нове рішення в сучасних технологіях. 2019. № 5 (1330). С. 169–174.
6. Білоніжка П. Глауконіт, сколіт, селадоніт: кристалохімія, номенклатура, систематика, умови утворення./ Мінералогічний збірник. 2012. № 62. Вип. 1. С. 38–51.
7. Вплив кислотної активації на структурно-сорбційні характеристики глауконіту та гідрослюди / С.В. Паховчишин, Є.В. Корякіна, А.К. Матковський, Є.М. Нікіпелова, А.В. Панько, В.Ф. Гриценко // Український хімічний журнал. 2007. Т. 73, № 4. С. 92–95.
8. Zango, Z.U.; Rozaini, M.N.; Bakar, N.H.H.A.; Zango, M.U.; Haruna, M.A.; Dennis, J.O.; Alsadig, A.; Ibaouf, K.H.; Aldaghri, O.A.; Wadi, I.A. Advancements in Clay Materials for Trace Level Determination and Remediation of Phenols from Wastewater: A Review. Separations 2023, 10, 125. <https://doi.org/10.3390/separations10020125>.

9. Molview. Режим доступу: <https://molview.org/>(дата звернення: 15.11.2023).
10. Avogadro. Режим доступу: <https://avogadro.cc/>(дата звернення: 15.11.2023).

References

1. Kovalenko A. (2021). Improvement of sorption methods of wastewater treatment from heavy metal salts [Electronic resource]. Ukrainian State University of Science and Technology. Retrieved from: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/de5bb5d1-24f1-4c02-a4da-be647874c554/content> (date of application: 20.11.2023).
2. Drukovany M.F., Kovalskyi V.P., Burlakov V.P. Reduction of radioactivity of building materials and products [Electronic resource] / Materials of the XIIX scientific and technical conference of the divisions of the VNTU. Vinnytsia, Vinnytsia National Technical University, April 27–28, 2020. Retrieved from: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/8959>.
3. Yatsyshyn M., Reshetnyak O., Dumanchuk N., Kulyk Yu., Fartushok N., Stadnyk Yu. (2013). Hybrid mineral-polymeric composite materials on the basis of the polyaniline and glauconite-silica. *Chemistry & Chemical Technology*, 7 (4). P. 441–444.
4. Tkachuk N.A., Melnyk L.M. (2011). Comparison of the adsorption properties of glauconite and activated carbon in the cleaning of sidewalls. *Food Industry*, 10. P. 208–212.
5. A. P. Khokhotva (2019). Sorption of copper and nickel by phosphorylated sorbents under static conditions. *Bulletin of NTU «KhPI». A new solution in modern technologies*, 5 (1330). P. 169–174.
6. Bilonizhka P. (2012). Glauconite, scolite, celadonite: crystal chemistry, nomenclature, systematics, conditions of formation. / *Mineralogical collection*, 62 (1). P. 38–51.
7. Pakhovchyshyn S.V., Koryakina E.V., Matkovskiy A.K., Nikipelova E.M., Panko A.V., Hrytsenko V.F. (2007) The influence of acid activation on the structural and sorption characteristics of glauconite and hydromica. *Ukrainian Chemical Journal*, 73(4). P. 92–95.
8. Zango, Z.U.; Rozaini, M.N.; Bakar, N.H.H.A.; Zango, M.U.; Haruna, M.A.; Dennis, J.O.; Alsadig, A.; Ibnaouf, K.H.; Aldaghri, O.A.; Wadi, I.A. Advancements in Clay Materials for Trace Level Determination and Remediation of Phenols from Wastewater [Electronic resource]: A Review. *Separations* 2023, 10, 125. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/separations10020125>.
9. Molview. Retrieved from: <https://molview.org/> (date of application: 15.11.2023).
10. Avogadro. Retrieved from: <https://avogadro.cc/> (date of application: 15.11.2023).