

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**М'ЯКАЄВА ГАННА МИКОЛАЇВНА**

УДК 504.5:502.51(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ ОБ'ЄКТІВ  
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ НА ГІДРОСФЕРУ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека  
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ М'якаєва Г.М.

Науковий керівник – Пляцук Леонід Дмитрович, д-р техн. наук, професор

Суми – 2018

## АНОТАЦІЯ

**М'якаєва Г.М. Моделювання техногенного впливу об'єктів теплоенергетики на гідросферу.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 21.06.01 «Екологічна безпека». – Сумський державний університет, Суми, 2018.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04. Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2018.

Дисертаційна робота присвячена актуальній проблемі зменшення техногенного навантаження на гідросферу тепловими електростанціями шляхом моделювання та прогнозування процесів поширення забруднюючих речовин (ЗР) в зоні розміщення об'єктів теплоенергетики. Результати роботи пройшли достатню апробацію та мають впровадження, що підтверджено відповідними актами.

Метою роботи є вирішення наукової проблеми підвищення рівня екологічної безпеки при функціонуванні теплоелектростанцій шляхом оцінки, моделювання впливу та розробки заходів із зменшення навантаження об'єктів теплоенергетики на гідросферу.

Аналіз теоретичних і практичних досліджень з проблеми оцінки та моделювання впливу об'єктів теплоенергетики на гідросферу показав необхідність подальшої деталізації, конкретизації та врахування цілої низки природних та техногенних факторів при моделюванні техногенного навантаження. В дисертаційній роботі розглянуто та систематизовано фактори, які впливають на інфільтрацію та фільтрацію ЗР в зоні розташування об'єктів теплоенергетики.

Математична модель перенесення ЗР по профілю ґрунту включає в себе рівняння фільтрації та масоперенесення ЗР. Урахування зміни напору та водонасичення в залежності від інтенсивності опадів, кліматичних умов, дозволило провести прогнозування стану підземних вод в зоні аерації теплоелектростанцій та при фільтрації із золошлаконакопичувача. На основі метода кінцевих елементів розроблено алгоритми чисельного рішення задач профільної фільтрації та масоперенесення ЗР. Для розв'язання задачі фільтрації використовується метод додаткових потоків, для задачі масоперенесення – метод зважування вверх по течії.

Адекватність математичної моделі фільтрації перевірялась в порівнянні з результатами експериментальних досліджень фільтрації ЗР при постійному водонасиченні, що моделює умови перенесення токсикантів з тіла золошлаконакопичувача. Відхилення результатів математичної моделі та експерименту не перевищує 5%.

Проведений розрахунок залежності концентрації ЗР від глибини ґрунту при змінному водонасиченні в умовах інфільтрації показав, що найбільша концентрація забруднень в зоні аерації спостерігається на глибині 20 см. Порівняння даних розрахунку за математичною моделлю та результатів досліджень по міграції важких металів в ґрунтах зони аерації Сумської ТЕЦ показало, що відхилення становить 5-7 %, це свідчить про адекватність математичної моделі.

З метою оцінки впливу Сумської ТЕЦ на стан прилеглих територій та виявлення шляхів міграції ЗР проведені дослідження снігового покриву, ґрунтів та рослинності на вміст важких металів. Виявлені перевищення фонових значень концентрацій важких металів в сніговому покриві являються джерелом забруднення підземних вод при інфільтрації ЗР та призводять до порушення природного співвідношення форм знаходження важких металів. Проведена оцінка забруднення ґрунтів за сумарним показником забруднення показала, що рівень забруднення ґрунтів в зоні

аерації – припустимий, в зоні золівдвалу: для верхнього горизонту – середній, для нижнього – низький, що свідчить про комплексний вплив на гідросферу, забруднення атмосферного повітря та міграцію речовин з тіла золошлаконакопичувача.

Оцінка інтенсивності поглинання представницькими видами рослинності іонів важких металів за коефіцієнтом біогеохімічної активності показала максимальну здатність до акумуляції іонів міді у пирія повзучого, іонів цинку – у кульбаби лікарської, що дає можливість для використання цих рослин в якості індикаторів забруднення ґрунтів.

З метою оцінки стану підземних вод в районі впливу Сумської ТЕЦ був проведений аналіз моніторингових даних з 2009 по 2017 роки. Обробка моніторингових даних по спостережним свердловинам на майданчику Сумської ТЕЦ показала, що мінералізація води змінюється несуттєво. Коливання мінералізації води у часі невеликі, відбуваються переважно за рахунок вмісту гідрокарбонатів і пов'язані із сезонними коливаннями у живленні водоносного горизонту. Перевищень ГДК ЗР для підземних вод в усіх свердловинах на майданчику ТЕЦ не виявлено. Відносна стабільність хімічних показників підземних вод на майданчику ТЕЦ пояснюється їх поглибленим заляганням (до 30 м від поверхні землі) і, відповідно, уповільненою реакцією на сезонні коливання в інфільтраційному живленні. Результати досліджень підземних вод першого від поверхні четвертинно-верхньокрейдового водоносного комплексу на ділянці золошлаконакопичувача вказують на наявність трансформації їх хімічного складу навколо нього за рахунок фільтрації вод із золівдвалу. Ознаками цього є підвищений вміст у воді із спостережних свердловин хлоридів, сульфатів, натрію, заліза.

З метою зменшення впливу місць складування золошлакових відходів на гідросферу розроблено заходи, які передбачають улаштування захисного екрану в золошлаконакопичувачі та переробку золошлаків. У результаті

проведених досліджень підтверджена можливість використання у якості сорбентів місцевих глинистих матеріалів. В результаті обробки експериментальних даних отримані значення коефіцієнтів в рівнянні Фрейндліха. З метою вивчення ефективності процесів поглинання іонів  $Ni^{2+}$ , а також встановлення ступеня входження іонів в структуру глинистих мінералів були проведені дослідження по десорбції відпрацьованих глинистих сорбентів. Результати дозволяють стверджувати, що іони нікелю надійно затримуються в структурі мінералів. Здатність глин поглинати і утримувати іони важких металів дозволить використовувати їх в якості природних геохімічних бар'єрів.

З метою розробки пропозицій по зменшенню кількості відходів було проведене обстеження золошлаків Сумської ТЕЦ, яке показало можливість їх використання в будівництві.

**Ключові слова:** екологічна безпека, теплоелектростанція, гідросфера, фільтрація, конвекція, математична модель, чисельні методи, моніторинг.

### **Наукові праці, в яких опубліковані наукові результати дисертації**

1. Большаніна С.Б., Гурець Г.М., Балабуха Д.С, Міляєва Д.В. Очищення стічних вод гальванічних виробництв сорбційними методами. *Екологічна безпека*. 2014. № 1(17). С. 114–118.

2. Пляцук Л. Д., М'якаєва Г. М., М'якаєв О. В. Моніторинг підземних вод в районі розміщення Сумської ТЕЦ. *Екологічна безпека.: Розробка та експлуатація систем екологічного моніторингу*. 2016. №2 (22). С. 29–34.

3. Pliatsuk L.D., Hurets L.L., Miakaieva H.M., Miakaiev O.V. Assessing the impact of Sumy CHP on soil. *Environmental Problems*. 2017. Vol. 2, No. 2. P. 58–64.

4. Hurets L. L., Kozii I. S., Miakaieva H. M. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of Engineering Sciences*. 2017. Vol. 4. Issue 2. P. G12–G16.

5. М'якаєва Г.М. Вплив Сумської ТЕЦ на екологічний стан прилеглих територій. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* 2017. № 53 (1274). С.124–131.

6. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М., М'якаєв О.В. Оцінка захищеності підземних вод в районі розташування Сумської ТЕЦ. *Екологічна безпека: Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля.* 2017. № 2 (24). С.59–63.

7. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М., М'якаєв О.В. Зниження впливу золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ на гідросферу. *Вісник НТУ «ХПІ»: Нові рішення в сучасних технологіях.* 2018. № 9 (1285). С. 230–235.

8. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М., М'якаєв О.В. Математичне моделювання фільтрації забруднюючих речовин в місцях розташування золошлаконакопичувачів теплоелектростанцій. *Sciences Of Europe.* 2018. № 26. С. 28–33.

#### **Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації**

9. Пляцук Л.Д., Гурець Г.М. Моніторинг підземних вод в районі золовідвалу Сумської ТЕЦ. *Матеріали III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (Суми, 22–25 квітня 2014).* Суми, 2014. С.34–35.

10. Пляцук Л.Д., Гурець Г.М. Оцінка впливу золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ на підземні води. *I Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Ресурсозбереження і хіміко-екологічні проблеми технологічних процесів» (Харків, 10–12 листопада 2014).* Харків, 2014. С. 174–175.

11. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Програми для прогнозування забруднення підземних вод. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція*

*«Проблеми екологічної безпеки»*(Кременчук, 6–8 жовтня 2015). Кременчук, 2015 р. С.73.

12. М'якаєва Г.М. Фактори впливу на інтенсивність забруднення підземних вод. *Сучасні технології у промисловому виробництві: IV Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 19–22 квітня 2016)*. Суми, 2016. С.48.

13. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Вплив золовідвала Сумської ТЕЦ на гідросферу. *IV Міжнародний конгрес «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 21–23 вересня 2016)*. Львів, 2016. С.46.

14. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М., М'якаєв О.В. Прогнозування забруднення підземних вод в районі Сумської ТЕЦ. *Міжнародна науково-практична конференція «ЕКОГЕОФОРУМ-2017. Актуальні проблеми та інновації» (Івано-Франківськ, 22–25 березня 2017)*. Івано-Франківськ, 2017. С.304–305.

15. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Переробка відходів газоочищення ТЕЦ. *Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету «Технічних систем та енергоефективних технологій» «Сучасні технології у промисловому виробництві» (Суми, 18–21 квітня 2017)*. Суми, 2017. С.136.

16. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Вплив Сумської ТЕЦ на довкілля. *Семінар «Сталий розвиток - погляд у майбутнє» кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка» (Львів, 15 вересня 2017)*. Львів, 2017. С. 46

17. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Біомоніторинг ґрунтів в зоні розміщення Сумської ТЕЦ. *V Міжнародна наукова конференція молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» (м. Харків, 29–30 листопада 2017)*. Харків, 2017. С. 17.

18. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Методи утилізації золошлакових відходів Сумської ТЕЦ. *V Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві»* (Суми, 17–20 квітня 2018). Суми, 2018. С.181.

## ABSTRACT

**Miakaieva H.M. Modeling of technogenic influence of thermal power plants on the hydrosphere.** – Qualifying scientific work on the manuscript copyright.

Thesis for a Candidate Degree of Engineering Sciences in specialty 21.06.01 – Ecological Safety. Sumy State University, Sumy, 2018.

The thesis defense will be held at the Specialized Academic Council D55.051.04 meeting. Sumy State University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2018.

The thesis is devoted to the current problem of reducing the technogenic load on the hydrosphere caused by thermal power plant by modeling and forecasting the processes of spreading of pollutants in the area of placement of thermal power plants. The results of the work have been sufficiently tested and implemented, this is confirmed by the relevant acts.

The work objective is to improve the methodology of estimating the impact of emissions from motor vehicles on the ecological state of roadside ecosystems, taking into account the category of highway, in order to improve the accuracy of the forecast estimation of the technogenic load on roadside ecosystems.

The purpose of the work is to solve the scientific problem of increasing the level of environmental safety in the operation of thermal power plants by assessing, modeling the impact and developing measures to reduce the load of thermal power plants on the hydrosphere.



An analysis of theoretical and practical studies devoted to the problem of estimating and modeling the influence of the thermal power objects on the hydrosphere has shown the need for further elaboration, specification and consideration of a number of natural and man-made factors in the modeling of technogenic load.

The mathematical model of the transfer of pollutants in soil profile includes the equation of filtration and the mass transfer of the pollutant. Consideration of changes in pressure and water saturation depending on the intensity of precipitation and climatic conditions allowed us to predict the conditions of groundwater in the aeration zone and the territory of ash and slug dump of thermal power plants. On the basis of the finite element method, algorithms for numerical solution of the profile filtering and mass transfer processes of the pollutants are developed. The Galerkin method was used to solve the filtration problem and a method of weighing upstream was used to solve the problem of mass transfer.

The adequacy of the mathematical model of filtration was verified by comparison with the results of experimental studies of pollutant filtration in constant water saturation, which simulates the conditions for the transfer of toxicants from the body of the ash and slug dump. The difference between the results of a mathematical model and an experiment does not exceed 5%.

The calculation of the dependence of the concentration of pollutants on the depth of soil under variable water saturation under infiltration conditions showed that the highest concentration of pollutants in the aeration zone is at a depth of 20 cm. Comparison of the calculation data by a mathematical model and the results of studies on the migration of heavy metals in the soils of the aeration zone of the Sumy TPP showed that the deviation is 5-7%, that proves the adequacy of the mathematical model

The studies of the content of amount of heavy metals in snow cover, soil and vegetation were conducted in order to assess the impact of the Sumy TPP on the condition of the adjacent areas and the identification the paths of migration of

pollutants. Detected points of exceeding the background values of heavy metal concentrations in the snow cover are sources of groundwater contamination as infiltration of pollutants lead to a violation of the natural ratio of forms of heavy metals. The content of ion-exchange forms of heavy metals in soils decreases according to the following:  $Cu > Zn > Pb > Ni > Cr$ . The assessment of soil contamination by the total pollution indicator showed that the level of soil contamination in the zone of aeration is acceptable in the zone of ash dump: for the upper horizon is average, for the lower horizon is low, indicating the complex influence on the hydrosphere, atmosphere and the migration of substances from the body of ash and slug dump.

Estimation of the intensity of absorption of heavy metal ions by representative species of vegetation by the coefficient of biogeochemical activity showed the maximum ability to accumulate copper ions by *Elymus repens*, zinc ions by *Taraxacum officinale*, which makes it possible to use these plants as indicators of soil contamination.

To assess the status of groundwater in the area of influence of Sumy TPP was carried out the analysis of monitoring data from 2009 to 2017. Processing of monitoring data on observation wells at the site of Sumy TPP showed that the mineralization of water varies insignificantly. Fluctuations of the mineralization of water in time are small, occur mainly due to the content of hydrocarbons and associated with seasonal fluctuations in the nutrition of the aquifer. Excessive concentrations of pollutants in groundwater in all wells at the TPP site were not detected. The relative stability of the chemical indicators of groundwater state at the site of the TPP this is explained by their in-depth deposition (up to 30 m from the surface of the earth) and the slowed response to seasonal variations in infiltration nutrition. The results of investigations of groundwater from the first from the surface of the quaternary upper cretaceous aquifer complex on the area of ash and slug dump indicate the presence of a transformation of their chemical composition around it by filtration of water from the ash and slug dump. It's signs

are the high content in the water from the observation wells of chlorides, sulfates, sodium, iron.

The measures that involve the arrangement of a protective screen in ash and slug dump and processing of ash and slug have been developed to reduce the impact of ash and slug dump on the hydrosphere. As a result of the conducted studies it was confirmed that local clay materials can be used as sorbents. The optimal parameters of the sorption of nickel ions by clay materials were experimentally chosen. As a result of the processing of experimental data, the values of the coefficients we obtained in the Freundlich equation. Research on desorption of waste clay sorbents have been carry out to study the efficiency of ion  $Ni^{2+}$  absorption processes and to establish the degree of ion entry into the structure of clay minerals. The results argue that nickel ions are reliably delayed in the structure of minerals. The ability of clay to absorb and contain ions of heavy metals allows using them as natural geochemical barriers.

In order to develop proposals for the use of ash-slag mixtures of Sumy TPP in the construction industry, an ash and slug examination was conducted. It showed the possibility to use this ash and slug in construction.

Keywords: ecological safety, thermal power plant, hydrosphere, filtration, convection, mathematical model, numerical methods, monitoring.

**Scientific papers, in which the scientific results of the dissertation are published:**

1. Bolshanina S.B., Hurets H.M., Balabukha D.S, Miliaieva D.V. Ochyshchennia stichnykh vod halvanichnykh vyrobnytstv sorbtsiinymy metodamy [Purification of sewage of electroplating plants by sorption methods]. Ecological Safety. 2014. 1(17). P. 114-118.

2. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M., Miakaiev O.V. Monitorynh pidzemnykh vod v raioni rozmishchennia Sumskoi TETs [Monitoring of groundwater in the area of the Sumy TPP]. *Environmental safety*. 2016. № 2 (22). P. 29–34.
3. Pliatsuk L.D., Hurets L.L., Miakaieva H.M., Miakaiev O.V.. Assessing the impact of Sumy CHP on soil. *Environmental Problems*. 2017. Vol. 2, No. 2. P. 58-64.
4. Hurets L. L., Kozii I. S., Miakaieva H. M. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of Engineering Sciences*. 2017. Vol. 4. Issue 2., P. G12-G16.
5. Miakaieva H.M. Vplyv Sumskoi TETs na ekolohichni stan prylehlykh terytorii [Impact of the Sumy TPP on the environment of surrounding areas]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. 2017. № 53(1274). P.124-131.
6. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M., Miakaiev O.V. Otsinka zakhyschenosti pidzemnykh vod v raioni roztashuvannia Sumskoi TETs [Assessment of protection of groundwater in the area of the Sumy TPP]. *Ecological Safety*. 2017. №2 (24). P.59-63.
7. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M., Miakaiev O.V. Znyzhennia vplyvu zoloshlakonakopychuvacha Sumskoi TETs na hidrosferu [Reduction of the influence of the ash and slug dump of the Sumy TPP on the hydrosphere]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. 2018. № 9(1285). P. 230-235.
8. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M., Miakaiev O.V. Matematychni modeliuvannia filtratsii zabrudniuiuchykh rehovyn v mistsiakh roztashuvannia zoloshlakonakopychuvachiv teploelektrostantsii [Mathematical modeling of filtration of pollutants in the area of ash and slug dumps of thermal power plants]. *Sciences Of Europe*. 2018. № 26. P. 28-33.

**Scientific papers, which testify to the approbation of the materials of the dissertation:**

9. Pliatsuk L.D., Hurets H.M. Monitorynh pidzemnykh vod v raioni zolovidvalu Sumskoi TETs [Monitoring of groundwater in the area of the ash and

slug dump of Sumy TPP]. *Scientific and technical conference «Modern technologies in industrial production» (Sumy, 22-25 of April 2014)*. Sumy, 2014. Part 2. P. 34-35.

10. Pliatsuk L.D., Hurets H.M. Otsinka vplyvu zoloshlakonakopychuvacha Sumskoi TETs na pidzemni vody [Assessment of impact of Sumy TPP on groundwater]. *Scientific and practical internet-conference «Resource-saving and chemical-ecological problems of technological processes» (Kharkiv, 10-12 of November 2014)*. Kharkiv, 2014. P. 174-175

11. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M. Otsinka vplyvu zoloshlakonakopychuvacha Sumskoi TETs na pidzemni vody [Applications for predicting groundwater contamination]. *Scientific and technical conference «Problems of environmental safety» (Kremenchuk, 6-8 of October 2015)*. Kremenchuk, 2015. P. 73.

12. Miakaieva H.M. Faktory vplyvu na intensyvniat zabrudnennia pidzemnykh vod [Factors influencing the intensity of groundwater pollution]. *Scientific and technical conference «Modern technologies in industrial production» (Sumy, 19-22 of April 2016)*. Sumy 2016. Part 2. P. 48.

13. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M. Vplyv zolovidvala Sumskoi TETs na hidrosferu [The impact of ash and dump of Sumy TPP on hydrosphere]. *International congress «Environment protection. Energy saving. Sustainable environmental management» (Lviv, 21-23 of September, 2016)*. Lviv, 2016 p. P. 46.

14. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M., Miakaiev O.V. Prohnozuvannia zabrudnennia pidzemnykh vod v raioni Sumskoi TETs [Forecasting of groundwater pollution in the area of Sumy TPP]. *International scientific and practical conference "ECOGEOFORUM-2017. Actual Problems and Innovations» (Ivano-Frankivsk, 22-25 of March 2017)*. Ivano-Frankivsk, 2017. P.304-305.

15. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M. Pererobka vidkhodiv hazoochyschennia TETs [Processing of waste from gas purification of TPP]. *Scientific and technical*

conference «*Modern technologies in industrial production*» (Sumy, 18-21 of April 2017). Sumy, 2017. P.136.

16. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M. Vplyv Sumskoi TETs na dovkillia. [Influence of Sumy TPP on the environment.]. *Seminar "Sustainable Development - A Look into the Future" of the Department of Ecology and Sustainable Use of the National University "Lviv Polytechnic"* (Lviv, 15 of September 2017). Lviv, 2017. P.46

17. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M. Biomonitorynh gruntiv v zoni rozmishchennia Sumskoi TETs [Soil biomonitoring in the area of the Sumy TPP]. *International scientific conference of young scientists "Ecology, neecology, environmental protection and sustainable use of natural resources.* (Kharkiv, 29-30 of November 2017). Kharkiv, 2017. P. 17.

18. Pliatsuk L.D., Miakaieva H.M. Metody utylizatsii zoloshlakovykh vidkhodiv Sumskoi TETs [Methods of utilization of ash and slag waste from Sumy TPP]. *Scientific and technical conference «Modern technologies in industrial production»* (Sumy, 17-20 of April 2018). Sumy, 2018. P.181.

## ЗМІСТ

	стор.
Перелік умовних позначень, скорочень, символів.....	18
Вступ.....	20
Розділ 1 Огляд літератури за темою дисертації.....	27
1.1 Вплив об'єктів теплоенергетики на стан екологічної безпеки довкілля.....	27
1.2 Оцінка можливості забруднення підземних вод у районах впливу теплоелектростанцій.....	37
1.3. Моделювання процесів забруднення підземних вод.....	42
Висновки та постановка завдання дослідження.....	54
Розділ 2 Об'єкт та методи досліджень.....	55
2.1 Характеристика Сумської ТЕЦ як об'єкта дослідження.....	55
2.2. Природно-кліматична характеристика району дослідження.....	62
2.3 Методи дослідження міграції забруднюючих речовин.....	66
2.4 Методика дослідження масоперенесення забруднюючих речовин у ґрунтах .....	70
2.5 Методика дослідження сорбційних здатностей протифільтраційного екрану.....	71
Висновки до розділу 2.....	74
Розділ 3 Моделювання міграції забруднюючих речовин у підземні води	75
3.1 Фізична картина перенесення забруднюючих речовин у зоні впливу теплоелектростанцій.....	75
3.2 Математичне моделювання перенесення забруднюючих речовин в ґрунтах.....	79
3.2.1 Профільна задача фільтрації.....	82

3.2.1.1 Алгоритм рішення задачі профільної фільтрації методом скінченних елементів.....	84
3.2.2 Профільна задача масоперенесення забруднюючих речовин.....	87
3.2.2.1 Алгоритм рішення профільної задачі масоперенесення ЗР методом скінченних елементів.....	89
3.3 Моделювання фільтрації забруднюючих речовин з місць складування золошлакових відходів.....	93
3.3.1 Одномірна задача фільтрації.....	93
3.3.2 Перевірка адекватності математичної моделі.....	94
3.3.3 Двомірна задача фільтрації.....	97
3.4 Моделювання перенесення забруднюючих речовин у зоні аерації теплоелектростанцій.....	99
Висновки до розділу 3.....	101
Розділ 4 Дослідження міграції забруднюючих речовин у зоні впливу Сумської ТЕЦ.....	103
4.1 Оцінка захищеності підземних вод у районі Сумської ТЕЦ.....	103
4.2 Дослідження міграції забруднюючих речовин на території впливу Сумської ТЕЦ.....	105
4.2.1 Дослідження снігового покриву в зоні аерації Сумської ТЕЦ.....	106
4.2.2 Дослідження забруднення ґрунтів у зоні впливу Сумської ТЕЦ.....	111
4.2.3 Перевірка адекватності математичної моделі перенесення ЗР в зоні аерації Сумської ТЕЦ.....	117
4.2.4 Дослідження забруднення рослинності в зоні впливу Сумської ТЕЦ.....	118
4.3 Моніторинг підземних вод у районі розташування об'єктів	



Сумської ТЕЦ.....	124
4.3.1 Моніторинг підземних вод на майданчику ТЕЦ.....	124
4.3.2 Моніторинг підземних вод у зоні золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ.....	126
Висновки до розділу 4.....	132
Розділ 5. Розробка заходів щодо зниження впливу золошлаконакопичувача на гідросферу.....	134
5.1 Розробка заходів щодо улаштування захисних екранів.....	136
5.2 Розробка заходів щодо утилізації золошлакових відходів.....	142
Висновки до розділу 5.....	147
Загальні висновки.....	149
Список використаних джерел.....	151
Додатки.....	168

**Перелік умовних позначень, скорочень, символів****Умовні позначення**

$d$	– діаметр, м;
$H$	– напір, м;
$L$	– глибина, м
$\rho$	– густина, кг/м <sup>3</sup> ;
$c$	– концентрація, мг/м <sup>3</sup> ;
$k_f$	– коефіцієнт фільтрації, м/добу;
$\theta$	– пористість, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> ;
$t$	– час, с;
$T$	– температура, °С;
$D$	– гідродинамічна дисперсія, м <sup>2</sup> /с;
$D_M$	– коефіцієнт молекулярної дифузії, м <sup>2</sup> /с;
$v$	– швидкість, м/с
$x, y, z$	– декартові координати;
$p$	– тиск, Па;
$V$	– витрата, м <sup>3</sup> /с;
$W$	– вологість, %;
$S_w$	– водонасичення, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>

### Скорочення

ЗР	– забруднююча речовина;
ГДК	– гранично допустима концентрація;
ТЕЦ	– теплова електроцентрально;
ТЕС	– теплова електростанція;
ЗШВ	– золошлакові відходи;
КРЗ	– крупнорозмірний заповнювач.

### Символи

<i>gr</i>	– ґрунт;
<i>pc</i>	– рослини.

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Актуальність роботи зумовлена необхідністю зменшення техногенного навантаження на гідросферу тепловими електростанціями (ТЕС) шляхом моделювання процесів поширення ЗР у зоні розміщення об'єктів теплоенергетики.

Енергетика є найважливішою галуззю, яка визначає ефективність розвитку економіки і технічний рівень усієї промисловості країни. На сучасному етапі у світі відбувається зростання енергоспоживання на душу населення, так, у ХХ - початку ХХІ ст. виробництво і споживання енергії у світі подвоюється кожні 10-15 років. Основу енергетики України сьогодні складають теплові електростанції на органічному паливі, що забезпечують 35 - 40% усього виробництва електроенергії. Розвиток теплової енергетики прогнозується з переважним використанням вугілля, частка якого в 2030 році в паливному балансі становитиме 85,1% [1], що призводить до зростання техногенного навантаження на довкілля.

Зростаючий попит на електроенергію і тепло зумовлює підвищення обсягів їх виробництва, що призводить до комплексного негативного впливу об'єктів теплоенергетики на довкілля та підвищення ризику для населення, яке проживає в зоні впливу ТЕС. Споживаючи природні ресурси, підприємства теплоенергетики є джерелами комплексного забруднення навколишнього середовища. ЗР з відхідних газів теплоелектростанцій, які осідають на прилеглих територіях, з атмосферними опадами переносяться у поверхневі та ґрунтові води, фільтрат із золошлаковідвалів надходить в підземні водоносні горизонти. Тому для оцінки впливу об'єктів теплоенергетики на довкілля потрібно дослідження шляхів міграції ЗР у всіх компонентах навколишнього середовища. Особливо гостро стоїть питання забруднення поверхневих та підземних вод, які є джерелами господарсько-побутового та питного водопостачання.

Екологічний стан навколишнього середовища в районах розміщення ТЕС досліджували відомі вітчизняні та закордонні науковці – Барієва Е.Р., Кутовий В.О., Черенцова А.А., Миленька М.М., Горова А.І., Крупська Л.Т. Зверєва В.П., Кулиненко О.Р., Ріхтер Л.А. та ін. [2–20].

Для прогнозування впливу ТЕС, розробки ефективних природоохоронних заходів щодо зниження техногенного навантаження на довкілля та гідросферу зокрема, необхідне моделювання процесів, які відбуваються в навколишньому середовищі. Моделювання природних та техногенних процесів у різних геоморфологічних умовах є одним із основних засобів прогнозування та попередження несприятливого розвитку екологічного стану міського середовища. Однією з причин, які погіршують екологію міста є забруднення поверхневих і підземних водних об'єктів. Успішне вирішення завдань прогнозу рівня забруднення гідросфери засноване на використанні математичних моделей, що враховують фізичні особливості поширення домішок, зв'язок між концентраціями домішок і параметрами середовища.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота спрямована на вирішення екологічних проблем України відповідно до визначених Постановою Верховної Ради України «Основних напрямків державної політики України в галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки». Напрямок, мета, та результати дослідження відповідають Державній програмі України згідно наукового напрямку 04.06 – «Екологічно чиста енергетика і ресурсозберігаючі технології», плану заходів на 2010 – 2030 рр. з реалізації «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», затвердженому розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071-р від 24.07.2013.

Робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології Сумського державного університету за темами «Розробка шляхів поліпшення екологічної ситуації міст і промислових зон» (номер держреєстрації 0111U006335), «Зниження техногенного навантаження на

навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики» (номер держреєстрації 0116U006606) згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України, у яких автор брав участь як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є вирішення наукової проблеми підвищення рівня екологічної безпеки при функціонуванні об'єктів теплоенергетики шляхом моделювання їх впливу та розробки заходів із зменшення техногенного навантаження на гідросферу.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести аналіз впливу об'єктів теплоенергетики на довкілля та факторів, які визначають захищеність гідросфери;
- визначити чинники, які впливають на фільтрацію та інфільтрацію ЗР у районах розташування об'єктів теплоенергетики;
- провести математичне моделювання процесу перенесення ЗР у ґрунтах;
- оцінити вплив теплоенергетичного об'єкта на екологічний стан прилеглих територій;
- провести моніторинг впливу діючого об'єкта теплоенергетики на гідросферу;
- розробити заходи щодо зниження впливу золошлаконакопичувача на гідросферу.

**Об'єкт дослідження** – вплив об'єктів теплоенергетики на гідросферу.

**Предмет дослідження** – моделювання процесів перенесення забруднюючих речовин у місцях розміщення об'єктів теплоенергетики.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

- уперше з метою підвищення рівня екологічної безпеки гідросфери у зоні впливу теплоенергетичних об'єктів обґрунтовано наукові підходи до комплексної оцінки техногенного навантаження, що додатково враховує аераційний шлях надходження забруднюючих речовин, інфільтрацію та

фільтрацію;

– удосконалено математичну модель перенесення забруднюючих речовин у ґрунті шляхом урахування інтенсивності атмосферних опадів під час інфільтрації, що дозволило з високою точністю спрогнозувати рівень техногенного навантаження на довкілля у зоні впливу об'єктів теплоенергетики;

– уперше на підставі запропонованої математичної моделі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено закономірності поширення забруднюючих речовин через профіль ґрунту під час їх фільтрації та інфільтрації у зоні розташування об'єктів теплоенергетики, що дозволило отримати відповідні поля концентрацій;

– уперше на підставі даних проведеного моніторингу підземних вод на діючому об'єкті теплоенергетики встановлено фактори, що обумовлюють хімічний склад води, та обґрунтовано дестабілізуючі чинники екологічної безпеки компонентів гідросфери;

– набули подальшого розвитку технічні рішення щодо зниження техногенного навантаження на гідросферу місць складування золошлакових відходів шляхом створення протифільтраційних екранів із місцевої сировини.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Розроблена математична модель використовується для прогнозу впливу теплоелектростанцій на гідросферу та встановлення закономірностей просторового розподілу концентрацій ЗР, які шляхом інфільтрації та фільтрації надходять у підземні води та поверхневі водні об'єкти.

Практична реалізація запропонованого рішення щодо застосування глинистих матеріалів як протифільтраційного екрану в місцях складування золошлакових відходів теплоелектростанцій дозволила зменшити техногенне навантаження на гідросферу під час фільтрації ЗР.

Дослідження гранулометричного складу, фізичних та радіаційних властивостей золошлакових відходів Сумської теплоелектроцентралі (ТЕЦ)

показало можливість їх використання у будівництві та промисловості будівельних матеріалів, що зменшує об'єми твердих відходів та вплив теплоенергетичних об'єктів на довкілля у цілому та гідросферу зокрема.

Результати дисертаційного дослідження упроваджено в навчальний процес кафедри прикладної екології Сумського державного університету в дисциплінах «Моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища», «Техноекологія» (акт впровадження від 16.05.2018 р.).

Результати дисертаційної роботи щодо прогнозування впливу золошлаконакопичувачів ТЕЦ на гідросферу та розробки протифільтраційного екрана передані в КЕП Чернігівська ТЕЦ (акт впровадження від 09.10.2017 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні положення, результати експериментальних досліджень, узагальнення і висновки дисертаційної роботи належать авторові та його науковому керівникові.

Особистий внесок в працях, опублікованих в співавторстві: у роботі [121] здобувачем проведено узагальнення моніторингових даних стану підземних вод у районі розміщення Сумської ТЕЦ; у роботі [138] розроблено математичну модель фільтрації ЗР у місцях розташування золошлаконакопичувачів теплоелектростанцій; у роботі [140] здобувачем проведено дослідження з оцінки захищеності підземних вод і проаналізовано техногенні та природні фактори, які впливають на захищеність підземних вод в районі розташування Сумської ТЕЦ; у роботі [142] здобувачем проведено експериментальні дослідження забруднення снігового покриву та ґрунтів у районі розташування Сумської ТЕЦ; у роботі [156] проаналізовано напрямки оптимізації технологічних процесів на ТЕЦ, які дозволяють зменшити кількість відходів, що надходять у золошлаконакопичувач; в роботі [157] здобувачем проведено експериментальні дослідження адсорбції іонів нікелю глинистими сорбентами; в роботі [159] здобувачем проведено дослідження місцевих глинистих матеріалів з метою створення протифільтраційного екрану в місцях складування золошлакових відходів.



**Апробація матеріалів дисертації.** Основні наукові і практичні положення та результати дисертаційних досліджень доповідалися і обговорювалися на 10 наукових конференціях: III Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2014 р.); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Ресурсозбереження і хіміко-екологічні проблеми технологічних процесів (м. Харків, 2014 р.); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» (м. Кременчук, 2015 р.); IV Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2016 р.); IV Міжнародному конгресі «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «ЕКОГЕОФОРУМ-2017. Актуальні проблеми та інновації» (м. Івано-Франківськ, 2017 р.); Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету «Технічних систем та енергоефективних технологій» «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2017 р.); Семінарі «Сталий розвиток - погляд у майбутнє» (м. Львів, 2017 р.); V Міжнародній науковій конференції молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» (м. Харків, 2017 р.); V Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2018 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць: 8 статей, з яких 7 статей – у наукових фахових виданнях з переліку МОН України, з них 5 статей індексуються міжнародними наукометричними базами даних, 1 стаття у спеціалізованому закордонному виданні, 10 тез доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел, 6 додатків. Загальний обсяг роботи

становить 200 сторінок. Дисертаційна робота містить 34 рисунки та 24 таблиці за текстом. Список використаних джерел кількістю 162 найменувань на 17 сторінках. Додатки розміщені на 32 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### **1.1 Вплив об'єктів теплоенергетики на стан екологічної безпеки довкілля**

На сучасному етапі розвитку суспільства однією з основних проблем є забезпечення тепловою та електричною енергією, тому об'єкти теплоенергетики - це невід'ємна складова інфраструктури населених пунктів.

Стан генеруючого устаткування об'єктів теплової енергетики характеризується високим ступенем фізичної та моральної зношеності, обладнання для очищення відхідних газів від оксидів сірки та азоту практично відсутнє, що призводить до негативного впливу на всі компоненти довкілля. Діяльність ТЕС негативно відбивається на стані екосистем прилеглих до них територій. Екологічний вплив теплоелектростанцій на довкілля полягає у хімічному та механічному забрудненні атмосферного повітря, зміні природного режиму водовикористання, тепловому та хімічному забрудненні поверхневих і підземних вод, утворенні великої кількості відходів, відчуженні та порушенні земельних ресурсів. Необхідно також враховувати, що всі принесені з газовими викидами теплоелектростанцій хімічні елементи мають здатність до міграції в ґрунти, підземні та поверхневі води, що створює додаткове забруднення в цих середовищах.

У роботі [11] автори пропонують фактори екологічного впливу об'єктів теплоенергетики розділити на дві групи – безпосереднього впливу та опосередкованого впливу (табл. 1.1). До факторів безпосереднього впливу належать ті, що пов'язані з експлуатацією ТЕС, а до опосередкованих – ті, що виникають при створенні умов для функціонування цих об'єктів.

Таблиця 1.1 – Фактори впливу об'єктів теплоенергетики на довкілля [11]

<b>Фактори</b>	<b>Впливи</b>
<b>Фактори безпосереднього впливу</b>	
Загальні	Вилучення території
	Теплове забруднення повітряного басейну і водного середовища
Групові	Зволожуюче забруднення повітряного басейну
	Використання значних водних ресурсів і скиди ЗР у водне середовище та ґрунт
	Шумовий вплив
Специфічні	Забруднення газоподібними, рідкими і твердими відходами
	Утворення золівдвалів і шламонакопичувачів
	Викиди парникових газів
<b>Фактори опосередкованого впливу</b>	
Загальні	Вплив на довкілля при виготовленні електроенергетичного обладнання
Групові	Вплив на довкілля при видобутку, переробці та транспортуванні палива (створення шахт і утворення териконів)

У роботах [6, 12–16] розглянуто вплив теплоелектростанцій на атмосферне повітря. Слід зазначити, що склад газових викидів значно відрізняється залежно від видів палива. Найбільш «чисте» паливо для теплових електростанцій – газ. Найбільш «брудне» паливо – горючі сланці, торф, кам'яне та буре вугілля. За умов їх спалювання утворюється найбільша кількість твердих частинок і оксидів сірки. Річні викиди від вугільної ТЕС потужністю 1000 МВт у середньому складають: 7 млн. тонн у рік вуглекислого газу (19 тис. тонн у добу); 50-100 тис. тонн у рік оксидів сірки; 25 тис. тонн у рік оксидів

азоту; 20 тис. тонн у рік твердих часток; 400 тонн у рік токсичних металів. Добовий викид золи в атмосферу становить 35-55 тонн, і при висоті труби 150–200 м радіус забрудненої території дорівнює приблизно 50 км [9]. Енергоблоки теплових електростанцій України в більшості своїй спроектовані для спалювання кам'яного вугілля вітчизняного видобутку, яке має зольність 23-35 % і вміст сірки більше 2% (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Характеристика теплових електростанцій України [15]

Назва	Потужність, МВт	Марка вугілля	Область
Бурштинська	2321	Г (газовий)	Івано-Франківська
Запорізька	2825	ГСШ (газовий, концентрат, насіння зі штибом)	Запорізька
Курахівська	1517	Г (газовий)	Донецька
Луганська	1185	АШ (антрацит штиба)	Луганська
Зуєвська	1270	Г (газовий)	Донецька
Криворізька	2274	Г (газовий)	Дніпровська
Придніпровська	1195	АШ (антрацит штиба)	Дніпровська
Добротвірська	500	Г (газовий)	Львівська
Ладизинська	1800	ГСШ (газовий, концентрат, насіння зі штибом)	Вінницька

## Продовження таблиці 1.2

Вуглегірська	3600	ГСШ (газовий, концентрат, насіння зі штибом)	Донецька
Зміївська	2200	АШ (антрацит штиба), Т (пісне)	Харківська
Трипільська	1800	АШ (антрацит штиба)	Київська
Старобешівська	1975	АШ (антрацит штиба), Т (пісне)	Донецька
Слов'янська	880	АШ (антрацит штиба), Т (пісне)	Донецька
Сумська ТЕЦ	40	АШ (антрацит штиба)	Сумська

Авторами [15, 16] показано, що склад викидів при спалюванні твердого палива, вміст важких металів, радіоактивність, і, відповідно, вплив на довкілля, залежать від родовища вугілля. Використання показників шкідливості палива дозволяє розробити заходи щодо зменшенню викидів ЗР та контролю стану компонентів навколишнього середовища.

Осадження ЗР з газових викидів призводить до забруднення ґрунту [17,18] та міграції важких металів у підземні та поверхневі води. Для оцінки забруднення атмосферного повітря викидами теплоелектростанцій використовують моніторинг снігового покриву. Сніговий покрив є сезонним індикатором ступеню антропогенного навантаження на навколишнє середовище. Сніг має високу сорбційну здатність і осаджує з атмосфери на земну поверхню значну частину продуктів техногенезу. Багаторічний

моніторинг снігового покриву дозволяє виявити просторово-часові особливості розподілу елементів, виявити осередки забруднення і визначити тенденції у зміні якості навколишнього середовища. Серед основних причин, що зумовлюють можливість успішного застосування методів моніторингу забруднення снігового покриву і, як наслідок, природних середовищ, можна виділити такі:

- відбір проб снігового покриву надзвичайно простий і не вимагає складного обладнання порівняно з відбором проб повітря;
- сніговий покрив дозволяє вирішити проблему кількісного визначення сумарних параметрів забруднення (сухих і вологих опадів);
- при утворенні та випаданні снігу концентрація ЗР у ньому виявляється зазвичай на 2-3 порядки величини вище, ніж в атмосферному повітрі, тому вимірювання вмісту цих речовин можуть вироблятися досить простими методами і з високим ступенем надійності;
- сніговий покрив як природний планшет-накопичувач дає досить об'єктивну величину сухих і вологих опадів у холодний сезон [19, 20].

Дослідження снігового покриву прилеглих до ТЕЦ територій [19,21, 22] показало, що ЗР з газовими викидами переносяться на значні відстані та сприяють забрудненню довкілля при таненні снігу. Талим водам належить провідне місце у перенесенні ЗР з поверхні ґрунту. Фактором, який підтверджує забруднення підземних вод талими водами, можуть слугувати річні максимуми низки інгредієнтів, які співпадають за часом з періодами інтенсивного сніготанення.

У роботі [9] Прибиловою В.М. досліджена міграція ЗР в підземні води в районі розміщення ТЕЦ, та показано, що основними джерелами забруднення вод є викиди ЗР підприємства, які осідають на поверхні ґрунтів, та фільтрація забруднених вод через слабо екрановане ложе золівдвалу.

Технології спалювання вугілля на теплових електростанціях України в більшості випадків передбачають видалення золи та шлаків гідравлічним

способом та складування їх у золовідвалах. Шлаки та зола доволі токсичні, їх токсичність складається з токсичності поліароматичних вуглеводнів (в основному бенз(а)пірену), важких металів і невідомих органічних токсикантів. Концентрація оксидів важких металів у шлаку і золі на 2-3 порядки (а іноді і більше) вище, ніж у паливі. Основну масу (96-98%) золошлакових відходів складає сума оксидів: оксид кремнію – 45-60%; оксид кальцію – 2,5-9,6%; оксид магнію – 0,5-4,8%; оксид заліза – 4,1-10,6%; оксид алюмінію – 10,1-21,8% і триоксид сірки – 0,03-2,7% [9]. Крім наведених макроелементів, що складають основну масу відходів, золошлакові відходи містять мікродомішки таких елементів, як цинк, талій, свинець, хром, марганець, кобальт, нікель, ртуть, миш'як, сурма, ванадій, стронцій, германій, бор, берилій, фтор та ін. За даними [23] в золі міститься значна кількість важких металів, які надходять з палива.

З пульпою в золовідвал надходять усі виробничі стоки, що утворюються на майданчику: стоки хімоводоочищення; стоки з територій мазутного та реагентного господарств і складу вугілля; стоки від охолодження підшипників насосного та вентиляційного обладнання та продувні води котлоагрегатів. Основними ЗР у стоках хімоводоочищення є завислі речовини, реагенти для регенерації катіонних та аніонних фільтрів, а також регенерат, що містить уловлені іонообмінними фільтрами іони (переважно це  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) і не зв'язані форми реагентів ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ). Основними забруднювачами інших категорій стоків (крім продувних) є завислі речовини й нафтопродукти.

Таким чином, золовідвали ТЕС є джерелом комплексного впливу на довкілля: порушення геологічного середовища, забруднення ґрунтів при фільтрації та аераційному перенесенні ЗР з поверхні відвалу [2, 4, 5, 7, 23-26] та потенційним джерелом забруднення природних вод [27, 28]. У роботі [4] автором наведена схема взаємодії золошлаконакопичувачів із навколишнім середовищем (рис. 1.1).



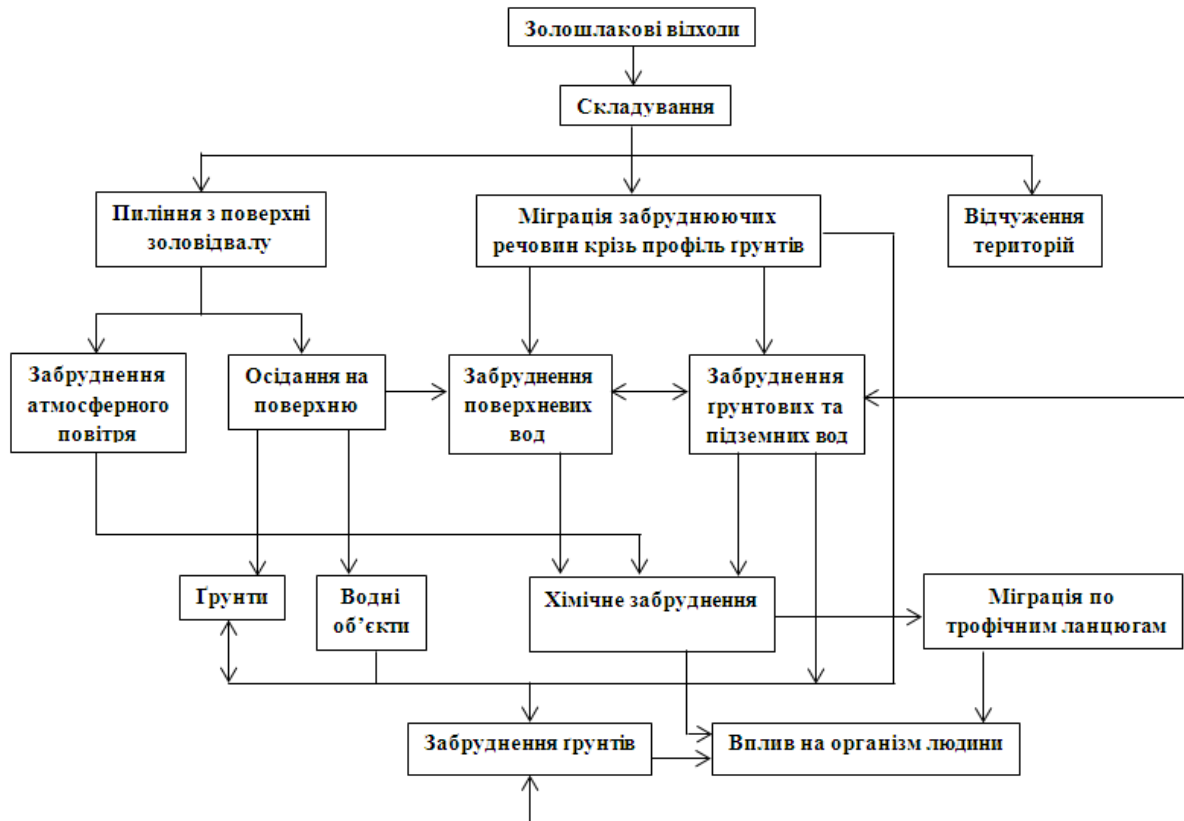


Рисунок 1.1 – Схема впливу золошлакових відходів на довкілля

Суттєвий вплив інфільтрації з території золовідвалів на хімічний склад та мінералізацію підземних вод встановлено за результатами режимних спостережень. Золовідвали є джерелами надходження у підземну гідросферу важких металів, фтору, селену, берилію, радіоактивних речовин та інших токсичних компонентів органічного походження. Літературні дані показують, що порівняно із підземними водами поверхневі води золовідвалів відзначаються різко підвищеним вмістом основних макрокомпонентів, загального феруму та фтору, дещо підвищеною загальною мінералізацією [29, 30]. Таким чином, основні джерела забруднення гідросфери об'єктами теплоенергетики – це територія підприємства, зона аерації, де шкідливі речовини з відхідних газів осідають на поверхні ґрунту та мігрують у ґрунтові води з опадами і талою водою, територія золовідвалу, з якої шкідливі речовини потрапляють в ґрунтові та підземні води.

Одним із найважливіших біогеохімічних бар'єрів для більшості поллютантів на шляху їх міграції у поверхневі та підземні води є ґрунти. Це враховується при екологічному нормуванні. У найбільш цілісному вигляді екологічне нормування ґрунтів реалізовано у Німеччині в системі стандартів DIN, які встановлено, перш за все, з метою захисту підземних вод від забруднення; при цьому критерії забрудненості залежать від пояса (зони) охорони джерела підземних вод, а також від типу і, відповідно, проникності ґрунтів [23].

Ґрунтовий покрив виконує роль буфера та детоксиканту, також ґрунт акумулює різноманітні хімічні ЗР, важкі метали та інші речовини. Хімічні речовини та їх похідні, важкі метали, флуор, оксиди нітрогену та сульфур у інтенсивно зв'язуються мінеральними та органічними речовинами ґрунту, результатом чого є зменшення їх доступності рослинам та формування загального рівня токсичності.

Важливою властивістю ґрунту є його поглинальна здатність, тобто здатність ґрунту поглинати і утримувати речовини, які знаходяться у розчинному або твердому виді, гази, а також живі організми. Поглинальна здатність регулює поживний режим ґрунту, зумовлює накопичення багатьох елементів живлення рослин і мікроорганізмів, регулює реакцію ґрунту та інше.

Серед специфічних ЗР докілька важливе місце посідають важкі метали, більшість з яких відноситься до першого та другого класу небезпеки. Їх негативний вплив на людину проявляється не тільки в прямій дії високих концентрацій, але й у віддалених наслідках, пов'язаних із здатністю багатьох металів накопичуватись в організмі.

При надходженні на поверхню ґрунту важкі метали в першу чергу вступають у контакт з шаром підстилки або опаду, які проявляють себе по-різному. З одного боку вони затримують важкі метали, а з іншого - насиченість водорозчинними органічними сполуками сприяє трансформації металів у більш міграційно-активну форму. Вплив важких металів на компоненти екологічної

системи зумовлений взаємодією з компонентами ґрунтового розчину і ґрунтово-поглинаючого комплексу за рахунок опадоутворення, іонного обміну, комплексоутворення; зміною ґрунтово-поглинаючого комплексу; зміною структурного стану ґрунтів, їх щільності, вологості і, як наслідок, зміною мікробіологічної активності. Таким чином, відбувається зміна маси і складу рослинного опаду, характеру його розкладання, трансформація гумусового стану ґрунтів. Зміна властивостей ґрунтів призводить до зміни ґрунтових процесів і режимів. Важкі метали, потрапляючи у ґрунт, утворюють нові позитивно і негативно заряджені комплекси з водорозчинними органічними лігандами в перегнійно-акумулятивному горизонті.

На поведінку важких металів у ґрунті впливають фізико-хімічні властивості ґрунту, кількість та склад органічної речовини, вологість, окислювально-відновні умови та кислотність [4, 9, 24]. Важкі метали можуть утворювати комплексні сполуки з органічною речовиною ґрунтів, тому в ґрунтах з високим вмістом гумусу вони менш доступні для поглинання рослинами.

Зміну кислотності ґрунту може викликати надходження на його поверхню кислих опадів, які містять сполуки сульфуру і нітрогену, що викидаються з відхідними газами теплоелектростанцій. Іони гідрогену можуть заміщатися катіонами, що знаходяться у ґрунті, внаслідок чого відбувається або вилугування кальцію, магнію і калію, або їх відстоювання у зневодненій формі. Зростає мобільність токсичних важких металів, таких як: марганець, мідь, кадмій. Унаслідок зростаючої кислотності ґрунтів під впливом антропогенних процесів зростає кількість кислих ґрунтів із рН ґрунтового розчину нижче 4,65. У таких ґрунтах змінюються адсорбційні властивості, що призводить до зростання концентрації у ґрунтовому розчині деяких форм важких металів. У кислому середовищі більшість металів більш рухливі. Міграційна здатність міді, нікелю, кобальту і цинку у лужному середовищі знижується на 1-2 порядки порівняно з окислювальним.

З метою оцінки забруднення довкілля під впливом техногенної діяльності та виявлення шляхів міграції ЗР часто використовується біоіндикація [31–36]. Глибина біоіндикації може бути різною: від простої візуальної діагностики рослин до вивчення імунних та генетичних змін в організмі індикаторів. Прослідкувати за ступенем антропогенного впливу можна за допомогою рослин-біоіндикаторів, які в ряді випадків більш надійно та наочно характеризують забруднення екосистем, ніж технічні прилади і слугують доповненням до інструментальних методів моніторингу [36]. Забрудненість компонентів навколишнього середовища створює стресові умови, які викликають накопичення важких металів у рослинах, що й використовується для біоіндикації забруднених територій. Елементний склад рослин є лабільною величиною, на яку впливає цілий ряд факторів. У роботі [37] наведені основні фактори, які визначають вміст елементів у рослинах: вміст елемента у ґрунті та воді; відносна кількість біодоступної форми елементів в ґрунті; вид рослини, фаза її розвитку та розподіл елемента по органам; еволюція рослин у певних геохімічних умовах та адаптація до них. Особлива увага до такого роду досліджень викликана тим, що рослинний покрив є проміжною ланкою міграції важких металів із ґрунту в організм людини за трофічними ланцюгами.

У роботі [33] показано, що забруднення рослин-індикаторів залежить від типу ґрунтів та хімічного елемента. При цьому різні рослини здатні до накопичення певного важкого металу. В умовах постійного забруднення деякі види трав'янистих рослин здатні формувати металостійкі популяції, які утворюють різноманітні системи знешкодження металів усередині самих рослин. Дослідження, проведені авторами [38], показали, що кульбаба, полин, підбіл звичайний мають високу акумуляційну здатність до важких металів, що дозволяє розглядати ці рослини як перспективні для фіторе mediaції міських територій.

## **1.2 Оцінка можливості забруднення підземних вод у районах впливу теплоелектростанцій**

Ступінь і спрямованість техногенного впливу на підземні води залежать не тільки від зовнішніх впливів, а й від здатності самої гідросфери протидіяти техногенному впливу [39]. Можливість забруднення підземних вод із поверхні землі в значній мірі визначається захищеністю водоносних горизонтів. Під захищеністю водоносного горизонту від забруднення маємо на увазі його перекриття відкладеннями, що перешкоджають проникненню ЗР із поверхні землі або з вище розташованого водоносного горизонту [30]. Вирішенню теоретичних, методичних і прикладних проблем, оцінці захищеності підземних вод від забруднення присвячено ряд робіт зарубіжних та вітчизняних науковців [39–45].

Захищеність залежить від багатьох факторів, які можна розбити на дві групи: природні та техногенні [30, 40–42].

До основних природних факторів захищеності підземних вод від забруднення належать: глибина до рівня підземних вод, наявність у розрізі та потужність слабопроникних порід, літологія і сорбційні властивості порід, співвідношення рівнів досліджуваного і вищерозташованих водоносних горизонтів. Значний вплив мають також кліматичні умови.

До техногенних факторів захищеності насамперед слід віднести умови знаходження ЗР на поверхні землі і, відповідно, характер їх проникнення у підземні води, хімічний склад ЗР і, як наслідок, їх міграційну здатність, сорбційні властивості, хімічну стійкість, час розпаду, характер взаємодії з породами і підземними водами. Значну загрозу підземним водам чинять рідкі промислові відходи, тому що для їх проникнення в підземні води необхідно менше часу, ніж для інфільтрації твердих і газоподібних відходів.

Захищеність підземних вод можна охарактеризувати якісно і кількісно [40]. У першому випадку в основному розглядаються тільки природні фактори,

а оцінка проводиться за сумою умовних балів. Кількісна оцінка базується на природних, техногенних, а також на фізико-хімічних факторах (час розпаду ЗР і т.ін.) і може бути виконана на основі визначення часу, за який ЗР досягнуть рівня підземних вод. Оцінка умов захищеності (якісна і кількісна) носить переважно порівняльний характер. Детальна оцінка захищеності підземних вод з урахуванням особливості вологоперенесення в зоні аерації і характеру взаємодії забруднення з породами і підземними водами вимагає, як правило, створення гідрогеохімічної моделі процесів проникнення забруднення у водоносний горизонт.

Бальна оцінка захищеності ґрунтових вод детально розроблена В.М. Гольдбергом [46, 47]. Сума балів, що залежить від умов залягання ґрунтових вод, потужностей слабопроникних відкладень і їх літологічного складу, визначає ступінь захищеності ґрунтових вод. За літологічними і фільтраційними властивостям слабопроникних відкладень виділяють три групи: а - супіски, легкі суглинки (коефіцієнт фільтрації ( $k$ ) - 0,1 - 0,01 м/добу), с - важкі суглинки і глини ( $k < 0,001$  м/добу), b - проміжна між а і с - суміш порід груп а і с ( $k$  0,01 - 0,001 м/добу).

Оцінка захищеності проводиться за трьома показниками: глибиною рівня ґрунтових вод, потужністю слабопроникних порід у розрізі зони аерації та коефіцієнтом фільтрації цих порід [58] (табл.1.3). Кожна категорія захищеності характеризується сумою балів. Більш високим категоріям відповідає більша сума балів. Кількість балів визначається, виходячи із часу фільтрації ЗР із поверхні землі до геологічного середовища. В якості базової одиниці для оцінки балів було прийнято час фільтрації через зону, складену добрепроникними породами ( $k = 2$  м /добу) потужністю 10 м.

Таблиця 1.3 – Бальна оцінка захищеності підземних вод

Рівень ґрунтових вод, м					Сумарна потужність (м) та літологія слабопроникного шару														
<5	10-20	20-30	30-40	>40	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
					a	b	c	a	b	c	a	B	c	a	b	c	a	b	C
1	2	3	4	5	1	1	2	2	3	4	3	4	6	4	6	8	5	7	10
Сумарна потужність (м) та літологія слабопроникного шару																			
10-12			12-14			14-16			16-18			18-20			більше 20				
a	b	c	a	b	c	a	b	c	A	b	C	a	b	c	a	b	C		
6	9	12	7	10	14	8	12	16	9	13	18	10	15	20	12	18	21		

За сумою балів виділяють шість категорій [40], які наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Категорії захищеності підземних вод

Сума балів	<5	5-10	10-15	15-20	20-25	>25
Категорія	I	II	III	IV	V	VI

. Принципи дослідження гідрогеологічної захищеності ґрунтуються на таких положеннях (за В. М. Гольдбергом та ін.) [46] :

- класифікація об'єктів і оцінка концентрації техногенних компонентів по площі і часу, що надходять у підземне середовище внаслідок техногенезу;
- вивчення структурних, літологічних, мінералого-геохімічних і ємнісних властивостей порід геологічного розрізу;

- дослідження гідрогеологічних факторів техногенної захищеності підземної гідросфери від техногенного впливу;
- встановлення характеру фізико-хімічних процесів у системі «техногенез - літосфера - підземні води»;
- типізація техногенезу і районування території по техногенному навантаженню;
- розробка рекомендацій щодо інженерного захисту літосфери від антропогенного впливу техногенних об'єктів.

Ступінь захищеності підземних вод можна визначати безпосередньо за часом фільтрації забруднених вод від поверхні землі до водоносного горизонту [9]. Визначальну захисну роль при міграції ЗР відіграють насамперед ґрунтові шари. Потім уже слід розглядати захисні властивості, що визначаються складом порід зони аерації. Найбільш універсальною є оцінка захищеності за часом фільтрації ЗР із поверхні землі до дзеркала підземних вод, а потім і в напірний горизонт. Наближена оцінка часу досягнення рівня ґрунтових вод стічними водами для умов однорідного розрізу зони аерації та сталості рівня у сховищі може бути виконана за формулою Цункера [49]:

$$t_1 = \left(\frac{nH}{k}\right) \left[\frac{m}{H} - \ln\left(1 + \frac{m}{H}\right)\right], \quad (1.1)$$

де  $H$  – висота стовпа стічних вод у сховищі, м;

$k$  і  $m$  – відповідно, коефіцієнт фільтрації, м/добу; та потужність зони аерації, м;

$n$  – недостатнє насичення порід зони аерації, %.

$$t_2 = \frac{n_2 H}{k_2} \left[ \frac{m_2}{H} - \frac{m_1}{H} \left( \frac{k_2}{k_1} - 1 \right) \ln \left( 1 + \frac{m_2}{H + m_1} \right) \right], \quad (1.2)$$



де  $n_2, m_2, k_2$  – пористість, %; потужність, м; коефіцієнт фільтрації нижньої товщі порід, м/добу.

У разі неоднорідної шаруватої будови зони аерації застосовується наближений підхід: приведення неоднорідного розрізу до однорідного із середнім коефіцієнтом фільтрації, який визначається за формулою:

$$k_{\text{сеп}} = \frac{m}{\left( \frac{m_1}{k_1} + \frac{m_2}{k_2} + \dots + \frac{m_i}{k_i} \right)}, \quad (1.3)$$

де  $m$  – потужність зони аерації ( $m = m_1 + m_2 + \dots + m_i$ ), м;

$m_1, m_2, m_i$  – потужність фільтраційних шарів, м;

$k_1, k_2, k_i$  – коефіцієнти фільтрації, м/добу.

За часом досягнення ЗР рівня підземних вод виділяють шість категорій [30] (табл.1.5)

Таблиця 1.5 – Категорії захищеності підземних вод за часом фільтрації

Категорія	I	II	III	IV	V	VI
Час фільтрації, доба	$t < 10$	$10 < t < 50$	$50 < t < 100$	$100 < t < 200$	$200 < t < 400$	$t > 400$
Бали	1	2	3	4	5	6

Існують й інші підходи щодо якісної оцінки захисної ролі зони аерації в балах, що враховують значущість впливу різних природних факторів, причому сума балів характеризує певну категорію захищеності ґрунтових вод. Зокрема, в

США, набули поширення пропозиції викладені у програмі DRASTIC [50–52], в якій в якості параметрів, що визначають умови захищеності підземних вод, враховано: глибину залягання підземних вод, ефективну інфільтрацію вод, літологію водоносного горизонту, механічний склад ґрунтів, кут нахилу денної поверхні, літологію порід аерації, коефіцієнт фільтрації водоносного горизонту. Програма DRASTIC використовується для попередніх оцінок захищеності на регіональному та локальному рівнях моніторингу підземних вод. Недоліками цієї програми є [53]: неможливість точного прогнозу поведінки ЗР; не враховане перетікання ЗР із горизонтів, які знаходяться нижче; не враховується зміна параметрів по площі забруднення та антропогенне навантаження.

Широке застосування при оцінці захищеності підземних вод знайшли ГІС-технології [54–63], які дають можливість моделювати вплив та поширення забруднення від точкових та просторових джерел на місцевості та по гідрологічній мережі. У результаті можна оперативно оцінити найближчі та майбутні наслідки впливу постійно діючих забруднювачів.

### **1.3 Моделювання процесів забруднення підземних вод**

У зв'язку з інтенсивним розвитком промисловості та енергетики, збільшенням різних антропогенних факторів впливу на навколишнє середовище виникає важливе завдання охорони водних ресурсів та попередження надходження ЗР у природні води. Прогнозування та моделювання процесів забруднення підземних вод є важливою складовою системи заходів із ліквідації та локалізації ареалів поширення цих забруднень.

Перенесення розчинних ЗР в ґрунтах залежить від великої кількості факторів навколишнього середовища і процесів, які в ньому протікають. Ступінь впливу тих чи інших процесів може відрізнятися для різних типів ґрунтів, ЗР, розглянутих моментів часу і простору [64, 65].

З фізико-хімічної точки зору міграція ЗР у ґрунтах є безперервним рядом повторюваних процесів сорбції елемента твердою фазою ґрунту із ґрунтового розчину та десорбції його в ґрунтовий розчин. Ці процеси протікають при участі мінеральних та органічних компонентів ґрунтів, які активно взаємодіють з іонами металів та відповідальні за їх сорбцію та фіксацію. До таких компонентів належать: глинисті матеріали мулової фракції; аморфні та окристалізовані оксиди та гідроксиди Fe, Mn, Al, які присутні в ґрунтах у вигляді включень, конкрецій; карбонати; органічна речовина ґрунтів.

У ґрунтах розчинні ЗР можуть перебувати як у розчинному стані (обмінній формі), так і в адсорбованому стані (необмінній формі) [66]. Зміна концентрації ЗР в обмінній формі відбувається за рахунок десорбції розчинних речовин ґрунтом, вбирання опадів із поверхні ґрунту і перенесення ЗР потоком вологи. Інтенсивність дощових опадів є головним чинником формування потоку вологи, який переносить ЗР [67–69]. Отже, перерозподіл ЗР відбувається під впливом усіх гідрологічних процесів, що визначають перерозподіл вологи в ґрунті (інфільтрація, випаровування, рух вологи і т. д.). Зміна концентрації ЗР у необмінній формі - результат сорбції ЗР із розчиненого стану. Таким чином, можна виділити два головних типи фізичних механізмів, що визначають перерозподіл ЗР у природних дисперсних середовищах [66]:

- гідролітичні: перенесення ЗР вологою;
- фізико-хімічні: сорбція-десорбція і природне розкладання.

Також слід зазначити, що на зміну концентрації ЗР впливають біологічні процеси, такі, як поглинання розчинених речовин рослинами.

Усе вищенаведене свідчить про складність опису поширення ЗР у ґрунтах, що викликає потребу у моделюванні цих процесів.

Моделювання – це процес, під яким маємо на увазі заміщення досліджуваного оригіналу його умовним поданням, або моделлю. У сучасній практиці досліджень застосовують фізичне і математичне моделювання.

Фізичне моделювання застосовують при вивченні процесів, механізм

яких недостатньо з'ясований. У цьому випадку відбувається вивчення процесів за допомогою моделей та аналіз впливу фізичних параметрів і лінійних розмірів на швидкість перебігу процесу.

Математичне моделювання застосовують для вивчення тих процесів, які мають математичний опис. У цьому випадку створюють і досліджують математичну модель процесу за допомогою обчислювальної техніки.

У поняття моделі вкладається певний фізичний або абстрактний об'єкт, характеристики і властивості якого схожі з характеристиками і властивостями цього об'єкта. Вимоги, яким повинні відповідати моделі, формулюються таким чином:

- 1) адекватність – точно, наскільки це можливо, відображення властивостей даного об'єкта;
- 2) повнота – максимальне відтворення всієї необхідної інформації про об'єкт дослідження;
- 3) гнучкість – можливість моделювання або розрахунку різних ситуацій у всьому діапазоні зміни умов і параметрів;
- 4) трудомісткість моделі повинна бути прийнятною в умовах сьогодення, часу і програмного забезпечення.

На сьогодні розроблено велику кількість методів математичного моделювання процесів перенесення ЗР у природних дисперсних середовищах [70–74].

За своєю суттю математичні методи моделювання фільтрації та масоперенесення ЗР можна розділити на три великі групи:

- 1) аналітичні (математичні формули, функції та рівняння);
- 2) статистичні (метод Монте-Карло, заснований на ідеї так званого «чорного ящика»);
- 3) чисельні (тривимірні моделі пластів).

*Аналітичні методи моделювання.* У більшості випадків аналітичні моделі будуються тільки для відносно простих систем. Подібне моделювання складних

систем несе в собі масу математичних складнощів і проблем. Щоб побудувати аналітичну модель, необхідно йти на істотне спрощення при описі властивостей і параметрів досліджуваного об'єкта. Зрозуміло, що використання спрощеної моделі дозволяє отримати лише приблизні результати. З математичної точки зору, подібні моделі цілком адекватно відображають зв'язок між вхідними і вихідними змінними і параметрами. Однак їх структура зовсім може не відображати внутрішню складову досліджуваного об'єкта. При аналітичному моделюванні його результати представляються у вигляді аналітичних виразів або рівнянь [66]. Математичне моделювання процесів масоперенесення ЗР при фільтрації у підземні води включає розв'язок рівнянь фільтрації та конвективного перенесення речовини в пористому середовищі фільтраційним потоком [66, 71, 74–76].

*Емпіричні методи моделювання.* В основному ці методи застосовуються для прогнозування розвитку екологічної ситуації на певний час уперед і не дозволяють проводити аналіз впливу тих чи інших факторів на досліджуваний процес. Тут можна виділити емпіричні моделі, що базуються на регресійних рівняннях, нейронних мережах та експертних системах. У деяких методах (наприклад, контрольних списках) чисельні оцінки окремих факторів антропогенного впливу агрегуються в єдиний індекс. Мережні діаграми відображають зв'язок між антропогенною діяльністю і впливом; у спрощеній формі корисні для виявлення впливів другого порядку; виявляють прямі та непрямі впливи; можуть бути дуже складним для використання, якщо оцінюється повномасштабна версія впливу.

Особливо бурхливий розвиток отримали методи емпіричного моделювання вертикальної міграції речовини після аварії на Чорнобильській АЕС, внаслідок наявності великих обсягів експериментальних даних із тимчасового і просторового розподілу радіонуклідів у ґрунті [69].

*Чисельні методи моделювання.* Деякі процеси перенесення ЗР у ґрунтах неможливо описати за допомогою аналітичних підходів. У таких випадках

потрібне використання чисельних методів із застосуванням спеціальних комп'ютерних програм. В основі всіх сучасних методів прогнозування лежать чисельні методи інтегрування відповідних диференціальних рівнянь у приватних похідних, що описують процеси двомірної або тривимірної багатофазної фільтрації. Чисельні методи, реалізовані на потужних ЕОМ, дозволяють здійснювати широкомасштабні математичні експерименти [70, 77].

Станом на сьогодні найбільш вживаними для вирішення практичних завдань, які порушують питання використання та захисту підземних вод, є програма MODFLOW і ряд пов'язаних з нею програм: MODPATH, MT3DMS, PEST та ін. MODFLOW - програма Геологічної служби США [78], що реалізує блочно-центрований балансовий метод кінцевих різниць (МКР) стосовно до умов нестационарного (в окремому випадку - стаціонарного) тривимірного, неоднорідного за фільтраційними властивостям потоку. Розробку цього пакету програм розпочато понад 20 років тому, і на сьогодні він є найбільш відтестуваним і надійним. MODFLOW і пов'язані з нею програми фактично є світовим стандартом для вирішення проблем фільтрації і масоперенесення. Велика частина завдань, пов'язаних із насиченою однофазною фільтрацією у підземній гідросфері, вирішується на основі використання цих програм. У США пакет програм, пов'язаних з MODFLOW, рекомендується до використання Агентством навколишнього середовища і Геологічної служби. На сайтах цих організацій вони можуть бути отримані разом із тестовими прикладами, які підтверджують правильність результатів розрахунків.

Теорія фільтрації була започаткована працями Анрі Дарсі, який встановив лінійну залежність між швидкістю фільтрації води та втратами напору – закон Дарсі. Теоретичне обґрунтування закону Дарсі виконано Ж. Дюпюї, який отримав формулу для визначення об'ємної витрати свердловин. Австрійський вчений Ф. Форхгеймер розглянув більш складні задачі з фільтрації при наявності горизонтального напору. Робота радянського вченого Н. Н. Павловського послужила основою для розвитку гідротехнічного

напрямку школи фільтрації. Павловський Н.Н. [79] розглядав завдання підземної гідромеханіки як крайові задачі математичної фізики і вказав загальні прийоми їх вирішення.

Подальший розвиток теорії фільтрації отримала завдяки працям учених, серед яких слід відмітити роботи Баснієва К. С. [80], В.Л.Данилова [81], В. Н. Ніколаєвського [82, 83], М. Д. Розенберга [84], Є. С. Ромма [85], М. І. Швидлера [71], Д. А. Ефроса [86] та ін.

Велике значення для розвитку теорії фільтрації мають фундаментальні роботи закордонних учених: М. Маскета [87], А. Е. Шейдеггера [88], Р. Коллінза [89], Х. Азіза і Е. Сеттарі [90].

У сфері математичного моделювання гідроекологічних досліджень протягом останніх років опубліковано значну кількість наукових праць, зокрема, праці Лаврика В. І. [73, 74, 91, 92], Олійника А. П. [93–96], Шестакова В. М. [75, 97] та інші [98–100], які присвячені питанням перенесення забруднювачів у підземних водах.

У роботі [101] узагальнена та систематизована інформація щодо геологічних та гідрологічних умов території України та класифікації основних схем геофільтрації. У роботі [102] автор представив математичну модель переміщення забруднень у підземних водах для оцінки екологічного ризику довкілля.

Математичні моделі процесу масоперенесення ЗР розвинені в роботах [72, 103]. Вивченням процесів розчинення солей і їх переміщенням під дією молекулярної і конвективної дифузії за допомогою методів математичної фізики займалися багато дослідників, зокрема М.М. Веригин, А.В. Шибанов, Б.С. Шержуков [104, 105], П.Я. Полубаринова – Кочина [106], Сергієнко І.В. [107] та інші.

У названих вище роботах розглядалися процеси вологоперенесення та солеперенесення окремо в областях повного та неповного насичення,

відповідно, проведено дослідження вологоперенесення без урахування солеперенесення в цих областях водонасичення.

Важливим питанням при математичному моделюванні процесів перенесення ЗР є врахування неоднорідності ґрунту. Для урахування фізико-хімічних властивостей ґрунтів автори робіт [108, 109] враховують активну пористість середовища, коефіцієнт фільтрації, густину середовища. У роботі [110] Толпаєв В.А. представив модель двомірної фільтрації в анізотропних середовищах. У статті [111] описаний процес міграції хлориду в гетерогенному ґрунті.

Математична модель масоперенесення розчинених речовин у фільтраційних потоках ЗР [101] описує взаємодію між ґрунтами та стічними водами, які фільтруються, за допомогою рівнянь матеріального балансу і рівняння кінетики та вирішується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних другого порядку зі змінними коефіцієнтами. У випадку тривимірної плоско-вертикальної сталої фільтрації за умови сталості коефіцієнта конвективної дифузії процес описується системою рівнянь (1.4) – (1.6):

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad v_x + \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v_y + \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad v_z + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (1.4)$$

$$D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) - v_x \frac{\partial c}{\partial x} - v_y \frac{\partial c}{\partial y} - v_z \frac{\partial c}{\partial z} - v_x \frac{\partial N}{\partial t} = \sigma \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \alpha(\sigma c - \beta N), \quad (1.6)$$

де  $v = \{v_x, v_y, v_z\}$  - вектор швидкості фільтрації, м/добу;

$\varphi(x, y, z, t)$  - потенціал фільтрації, м/добу;

$c(x, y, z, t)$  і  $N(x, y, z, t)$  - концентрація речовини, що дифундує, відповідно в рідкій і твердій фазах, г/см<sup>3</sup>;



$D$  - коефіцієнт конвективної дифузії, м<sup>2</sup>/добу;

$\sigma$  - пористість середовища, %;

$t$  – час, доба;

$\nabla$  – оператор Гамільтона;

$\alpha$  – коефіцієнт масообміну, с<sup>-1</sup>;

$\beta$  – коефіцієнт розподілу речовини між фазами в умовах рівноваги по лінійній ізотермі Генрі  $c_p = \beta N$ .

Для спрощення системи рівнянь шляхом усереднення величин, що шукаються, (концентрації, швидкості фільтрації і д.р.) зменшують розмірність по одній або декількох просторових координатах. Вертикальне усереднення по координаті  $z$  призводить рівняння до двовимірної профільної моделі, яка дає можливість оцінити поширення стічних вод вглиб ґрунтового шару.

У багатьох практичних завданнях можна обмежитися вивченням процесу масоперенесення розчинних у фільтраційному потоці речовин тільки на основі рівнянь, що описують конвективний процес, а саме:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad v_x + \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v_y + \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (1.7)$$

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial N}{\partial t} + \sigma \frac{\partial c}{\partial t} = 0, \quad (1.8)$$

причому масообмін визначається наступною залежністю:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \alpha(\sigma c - c_n), \quad \gamma = \alpha \sigma \quad (1.9)$$

де  $c_n$  – концентрація граничного насичення, мг/м<sup>3</sup>.

Наведені рівняння описують міграцію й фізичну трансформацію (сорбцію, десорбцію) консервативних водорозчинних речовин.

У випадку вертикальної фільтрації рівняння руху підземних вод запишуться у вигляді [112]:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0; \quad v_x + \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v_y + \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad \varphi = -\chi h, \quad (1.10)$$

де  $\chi$  - коефіцієнт фільтрації, м/добу;

$h$  - напір, м, що визначається рівністю:

$$h = \frac{p}{\rho g} - y \quad (1.11)$$

причому вісь  $Oy$  спрямована вертикально вниз;

$p$  – тиск, Па;

$\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  - прискорення сили тяжіння, м<sup>2</sup>/с.

Рівняння конвективної дифузії у випадку плосковертикальної фільтрації запишеться у вигляді:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial \psi^2} - \frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial \varphi} - \frac{\gamma}{Dv^2} (c - c_{\text{п}}) = \frac{\sigma}{Dv^2} \frac{\partial c}{\partial t}. \quad (1.12)$$

У роботах [75, 82] розглянуто причини і фізичні аспекти процесу забруднення підземних вод, викладені дані про існуючі математичні моделі процесу забруднення підземних вод та шляхи їх реалізації. Наприклад, у роботі Фріда [75] показано аналітичне рішення у випадку двовимірного потоку, коли водоносний горизонт горизонтальний, одношаровий і однорідний. Швидкість руху води вважається постійною і паралельною осі  $Ox$ , а коефіцієнти дифузії постійні і пропорційні швидкості. Запускається забруднювач концентрації  $c_0$  і

витраті  $Q$  у джерелі. За період  $dt$  маса запущеного забруднювача складе  $c_0 Q dt$ . Початкова концентрація дорівнює нулю. Область не обмежена, а концентрація на нескінченності дорівнює нулю. Рівняння, що описує цей процес, має вигляд:

$$\alpha_L u \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \alpha_T u \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (1.14)$$

де  $\alpha_L$  та  $\alpha_T$  – структурні параметри, що залежать від виду ґрунту, проникності та консолідації.

$$c(x, y, t) = \frac{1}{4\pi ut(\alpha_L \alpha_T)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{(x-ut)^2}{4\alpha_L ut} - \frac{y^2}{4\alpha_T ut} \right], \quad (1.15)$$

Рішення цього рівняння в момент часу  $t = 0$  одиничного забруднювача в джерелі має вигляд:

$$c(x, y, t) = \frac{1}{4\pi ut(\alpha_L \alpha_T)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{(x-ut)^2}{4\alpha_L ut} - \frac{y^2}{4\alpha_T ut} \right], \quad (1.16)$$

і рішенням рівняння буде:

$$c(x, y, t) = \frac{c_0 Q dt}{4\pi ut(\alpha_L \alpha_T)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{(x-ut)^2}{4\alpha_L ut} - \frac{y^2}{4\alpha_T ut} \right] \quad (1.17)$$

Для безперервного надходження стічних вод при витраті  $Q$  рішення для моменту часу  $t$  буде:

$$c(x, y, t) = \frac{c_0 Q}{2\pi u(\alpha_L \alpha_T)^{1/2}} \int_0^t \exp \left[ \frac{(x-u\theta)^2}{4\alpha_L u\theta} - \frac{y^2}{4\alpha_T u\theta} \right] \frac{d\theta}{\theta} \quad (1.18)$$

Математична модель спільної міграції вологи і розчиненої в ній ЗР в ґрунті і чисельне вирішення низки завдань, що характеризують особливості розподілу забруднень наведені в роботах А. Ю. Беляєва [113], С. І. Кундаса [69].

У роботі [114] наведена феноменологічна математична модель поширення розчинів у неоднорідних водоносних пластах, що містить взаємопов'язані рівняння двофазної фільтрації та дифузійного масоперенесення в області з рухомою межею. На конкретних прикладах аналізуються особливості різних сценаріїв забруднення. У роботі [115] розглядається перенесення розчиненої речовини, яке піддається нелінійному гетерогенному впливу і використовується багаторазове збільшення масштабу для моделювання адвекційно-дифузійного процесу на поверхні розділу фаз «рідина - тверде тіло». У роботі [116] запропоновано метод знаходження асимптотичного руху забруднених підземних вод, який виникає при вирішенні задач щодо стабілізації процесу міграції забруднення. У роботі [117] пропонується метод чисельного рішення нестационарних задач при течії двохкомпонентної рідини в пористому середовищі, що моделюють перенесення солей, розчинених у ґрунтових водах.

Процес багаторазового несистематичного зволоження інфільтраційного шару ґрунту, який супроводжується явищами масоперенесення рухомих хімічних компонентів забруднень, досить важко піддається математичній формалізації з прийнятними рішеннями в силу некоректності крайових умов. Але в багатьох практично доцільних випадках можуть бути виправдані інженерні підходи до комп'ютерного прогнозування змін концентраційного фону забруднення на основі мінімальної кількості інтегральних характеристик ґрунтово-водних систем.

У роботі [118] запропонована двовимірна модель міграції розчинних компонентів, що враховує градієнт рельєфу як основну причину руху води в поверхневих шарах ґрунту непромивного або періодично промивного типу:

$$c = C_0 + \frac{C_p - C_0}{B\varepsilon} [1 - \exp(-Bkt)] \exp\left(-\frac{k}{\varepsilon_1} \tau\right), \quad (1.19)$$

де  $C$  – осереднена концентрація забруднення в ґрунтовому розчині інфільтраційного шару, мг/м<sup>3</sup>;

$C_0, C_p$  – початкові концентрації забруднення відповідно в інфільтраційному потоці та застійних зонах ґрунту, мг/м<sup>3</sup>;

$B = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon}$  – структурний параметр ґрунту;

$\varepsilon, \varepsilon_1$  – відносні об'єми проточних і застійних зон, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$k$  – коефіцієнт масовіддачі, м/с ;

$t$  – інтегральний час просування концентраційного фронту забруднення від вододілу до контрольної точки, с;

$\tau$  – інтегральний час випадання опадів за контрольний період, с.

Припущення авторів щодо певного фіксованого середнього співвідношення об'ємів застійних та проточних зон значно спростило аналітичне рішення рівняння (1.19), зберігаючи при цьому відповідну чутливість моделі до особливостей структури ґрунту.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел показав, що математичні моделі впливу стічних вод на стан ґрунтів повинні формуватися з урахуванням: типу стічних вод, властивостей домішок, які знаходяться в них і можуть взаємодіяти з частинками ґрунтів; характеристик ґрунтів, тобто породи, структури, форми пор і тріщин ґрунту, а також присутності вологи в його складі; процесів взаємодії між ними. Розроблені моделі адаптовані до конкретних випадків, і не дають повною мірою можливості прогнозування стану об'єктів гідросфери при нестационарних умовах.

При розв'язанні задач масоперенесення класичними чисельними методами виникають труднощі, які пов'язані з особливостями математичної моделі. Для того, щоб ці методи могли використовуватись для прогнозування перенесення ЗР, вони повинні бути модифіковані.

### **Висновки та постановка завдання дослідження**

Аналіз теоретичних і практичних досліджень з проблеми оцінки та моделювання впливу об'єктів теплоенергетики на гідросферу показав необхідність подальшої деталізації, конкретизації та врахування цілої низки природних і техногенних факторів при моделюванні техногенного навантаження. На підставі проведеного літературного дослідження стає очевидним, що існуючі та розроблені моделі адаптовані до конкретних випадків, і не дають повною мірою можливості прогнозування стану об'єктів гідросфери в зоні впливу теплоелектростанцій.

Результати проведеного аналізу дали можливість сформулювати актуальність поставлених у дисертаційній роботі наукових завдань і виділити основні напрямки проведення досліджень. Ці завдання сформульовані таким чином:

- провести аналіз впливу об'єктів теплоенергетики на довкілля та факторів, які визначають захищеність гідросфери;
- визначити чинники, які впливають на фільтрацію та інфільтрацію ЗР у районах розташування об'єктів теплоенергетики;
- провести математичне моделювання процесу перенесення ЗР у ґрунтах;
- оцінити вплив теплоенергетичного об'єкта на екологічний стан прилеглих територій;
- провести моніторинг впливу діючого об'єкта теплоенергетики на гідросферу;
- розробити заходи щодо зниження впливу золошлаконакопичувача на гідросферу.

Основні результати опубліковані в таких роботах: [39, 52].

## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Характеристика Сумської ТЕЦ як об'єкта дослідження

Об'єктом дисертаційного дослідження є вплив об'єктів теплоенергетики на гідросферу.

Масштаби техногенного впливу теплових електростанцій на довкілля розглянемо на прикладі ТЕЦ ТОВ «Сумитеплоенерго», яка є основним джерелом теплопостачання міста Суми. ТОВ «Сумитеплоенерго», до складу якого входить Сумська ТЕЦ, є одним із найбільших забруднювачів повітря Сумської області. Викиди підприємства за 2016 р. становили 3,371 тис. тонн або 19,49 % від загального обсягу викидів по Сумській області [119], що негативно впливає на стан довкілля. За 2016 рік підприємством викинуто 1561,2 тис.тонн суспендованих твердих частинок, 436, 7 тис.тонн оксидів азоту, 66,23 тис. т оксиду вуглецю, 1253, 5 тис.т діоксиду сірки [120].

Встановлена потужність підприємства становить 40 МВт, потужність виробництва електроенергії в середньому становить 112988 тис. кВт/год., теплової енергії – 723250 Гкал. Як паливо на станції використовують вугілля марки АШ та природний газ.

Підприємство є джерелом комплексного забруднення довкілля в цілому та гідросфери зокрема. Джерелами забруднення навколишнього середовища є промисловий майданчик Сумської ТЕЦ і золошлаконакопичувач (рис. 2.1). Розташування ТЕЦ у безпосередній близькості до ріки Псел сприяє підвищеному негативному впливу на поверхневі водні об'єкти за рахунок аераційного забруднення та фільтрації ЗР.



1 – територія проммайданчика; 2 – золошлаконакопичувач  
Рисунок 2.1 – Схема розташування об'єктів Сумської ТЕЦ

За даними інвентаризації викидів, Сумська ТЕЦ викидає в атмосферне повітря 35 ЗР, серед них - ртуть металічна, свинець, хром шестивалентний, миш'як, оксиди міді, нікелю, цинку. Викиди важких металів збільшились при переході на тверде паливо (рис.2.2).

Потенційними джерелами забруднення підземних вод є вугільне поле і реагентне господарство промислового майданчика та золошлаконакопичувач [121]. Крім того, можлива міграція ЗР із зони аерації теплової електростанції, де шкідливі речовини, осідаючи з відхідних газів на поверхні ґрунту, переносяться вниз по профілю з опадами та талою водою. У районі золошлаконакопичувача міграція ЗР можлива за рахунок забруднення прилеглих територій при пилінні.



На Сумській ТЕЦ утворюються такі категорії стічних вод: теплообмінні води, транспортні води від системи гідрозолошлаковидалення, промивні та регенераційні води після хімоводоочищення, а також дощові води з території проммайданчика та господарсько-побутові.

Золошлакова суміш шляхом гідротранспортування надходить у золошлаконакопичувач, який розташований на лівому низькому березі ріки Псел та на сьогодні вже практично заповнений [119].

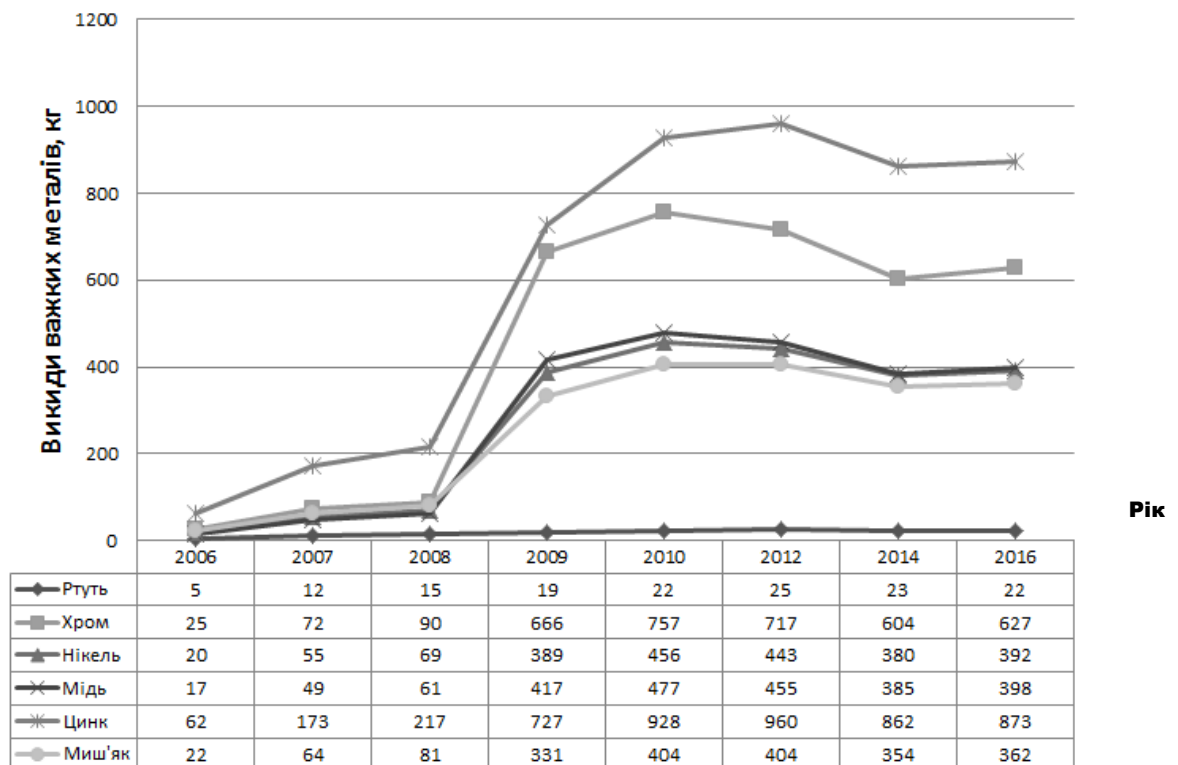


Рисунок 2.2 – Динаміка викидів важких металів Сумською ТЕЦ

Золошлаконакопичувач представляє собою двосекційний відстійник ємністю 195 тис. м<sup>3</sup>, з розмірами секцій у плані 150x178 м кожна, загальною площею 5,3 га. Секції золошлаковідвалу розділені дамбою. Весь золошлаконакопичувач огорожений дамбою, яка має висоту 5,5 м та ширину по гребню 3 м (рис. 2.3). Золошлакова пульпа надходить у секцію № 1, де відбувається її відстоювання і освітлення, з подальшим випуском освітленої

води в басейн для повторного використання. Секція № 2 використовується для накопичення стоків хімводоочищення. В секції № 2 виконаний протифільтраційний екран із глинистих ґрунтів.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд золошлаконакопичувача

Відкоси дамби закріплені посівами трав на шарі рослинного ґрунту. Для попередження розмиву низу дамб у період проходження паводка виконано мощення з каменю по шару щебеню. Низовий відкіс огорожувальних дамб золошлаковідвалу повністю покритий рослинністю (дерева та чагарники).

Золошлаки в чаші золошлаковідвалу мають такі фізико-механічні характеристики: насипна щільність  $1350 \text{ кг/м}^3$ , коефіцієнт фільтрації –  $3,5 \text{ м/добу}$ . За даними авторів роботи [122] в золі та шлаках Сумської ТЕЦ міститься значна кількість важких металів (табл. 2.1). Під час контакту золошлакової суміші з атмосферними опадами вони здатні вилугуватися,

переходити у розчинні форми і забруднювати ґрунти та підземні води. Радіоактивність золошлаків – 18 мR/год.

Таблиця 2.1 – Середній вміст важких металів у шлаках та золі Сумської ТЕЦ, мг/кг [122]

Тип зразка	Назва металу									
	Mn	Ni	Co	V	Cr	Mo	Cu	Pb	Zn	Sn
Шлаки	1000	200	40	500	400	4	300	200	80	8
Зола	1000	200	20	400	350	2	200	300	300	8

Кількість води системи гідрозоловидалення, що надходить до золовідвалу, становить близько 733000 м<sup>3</sup>/рік, загальні об'єми стічних вод системи хімводоочищення та живлення котлів – 723000 м<sup>3</sup>/рік. Система гідрозоловидалення включає оборотне використання освітленої води, яка після відстоювання подається із золовідвалу до майданчика ТЕЦ. З урахуванням річної кількості атмосферних опадів та випаровування води із золовідвалу, приблизно 600000 м<sup>3</sup>/рік води випаровується або інфільтрується до першого від поверхні водоносного горизонту.

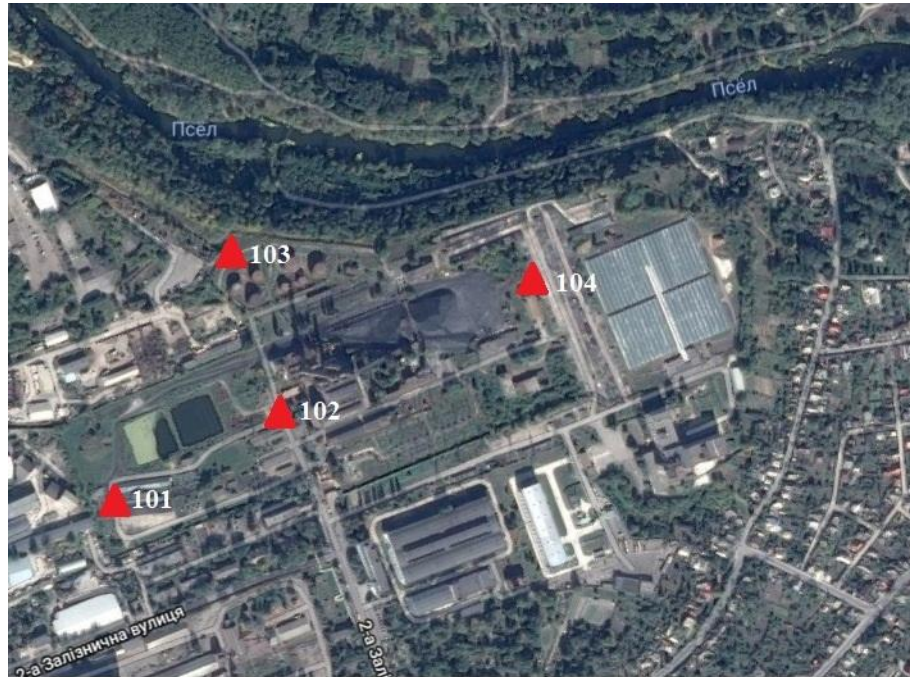
Розташування Сумської ТЕЦ у безпосередній близькості від річки Псел висуває завдання контролю стану поверхневих і підземних вод. З цією метою обладнана мережа пунктів спостережень за станом об'єктів гідросфери.

На сьогодні до складу пунктів спостереження входять 9 спостережних свердловин, призначених для контролю першого від поверхні водоносного горизонту, відбираються поверхневі проби води із секції золошлаконакопичувача, природної водойми під обвалуванням накопичувача, а також річки Псел у створах вище і нижче за течією об'єктів ТЕЦ.

На майданчику ТЕЦ розміщено чотири спостережні свердловини (рис. 2.4), призначені для дослідження стану підземних вод першого від поверхні палеоцен-верхньокрейдового водоносного горизонту на глибині

25–40 м від поверхні землі.

Параметри конструкцій спостережних свердловин № 101 - 104 на майданчику ТЕЦ наведені в таблиці 2.2 [123].



Пункти спостережень

▲ - спостережні свердловини

Рисунок 2.4 – Розташування спостережних свердловин проммайданчика Сумської ТЕЦ (супутникові знімки GeoEye 2017)

Таблиця 2.2 – Параметри конструкцій спостережних свердловин на майданчику ТЕЦ

№ свердловини	Водоносний горизонт	Абс. відм. устя, м	Глибина свердловини, м	Інтервал фільтруючої частини, м	Статичний рівень, м	
					від поверхні землі	абс. рівень
101	Pg <sub>1sm</sub> – K <sub>2</sub>	148,8	33,6	25,7 – 33,6	17,01	131,79
102		151,5	49,5	25,5 – 49,5	23,18	128,32
103		157,5	45,5	35,8 – 45,5	31,15	126,35
104		156,0	44,6	32,8 – 44,6	31,20	124,80

У районі золошлаковідвалу обстежується п'ять спостережних свердловин № 201-205 (рис.2.5).



Пункти спостережень  
 ● - спостережні свердловини

Рисунок 2.5 – Розташування спостережних свердловин золошлакозачисувача Сумської ТЕЦ (супутникові знімки GeoEye 2016)

Свердловини обладнані на першому від поверхні водоносному горизонті у четвертинних і верхньокрейдових відкладах на глибині 10–15 м від поверхні землі. Свердловина № 201 розташована на південному обвалуванні, біля насосної станції, і розкриває переважно розріз насипних ґрунтів дамби золовідвалу, проникаючи до корінних порід. Свердловини №№ 202, 204 і 205 розташовані нижче обвалування золовідвалу, з його південного боку, в напрямку фільтрації підземних вод до річки Псел. Спостережна свердловина № 203 знаходиться під обвалуванням золовідвалу, з

його північного боку, і призначена для отримання фонових показників стану підземних вод та контролю розтікання вод золошлакової суміші, що фільтруються.

Параметри свердловин наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри конструкцій свердловин на ділянці золовідвалу

№ свердловини	Водоносний горизонт	Абс. відм. устя, м	Глибина буріння, м	Глибина до вибою, м	Інтервал фільтру, м	Статичний рівень, м	
						від поверхні землі	абс. рівень м
201	tQ IV	130,38	10,3	10,15	8,3-9,3	6,50	123,75
202	K <sub>2</sub> -aQ IV h	125,6	10,0	10,12	3,0-4,0	2,35	123,13
203		126,5	12,5	12,25	9,0-11,0	2,66	123,81
204		125,65	14,5	15,30	10,0-14,0	2,41	123,2
205		125,9	15,0	15,71	7,5-9,5	3,63	122,3

## 2.2. Природно-кліматична характеристика району дослідження

Одним з факторів, які впливають на поширення ЗР у складові довкілля, є природно-кліматичні умови розташування промислового підприємства.

Територія міста Суми розташована в південно-західній частині Сумської області, в межах Хотинсько-Краснопільського фізико-географічного району Сумської лісостепової області. В цілому територія області характеризується помірно континентальним кліматом. Середньорічна температура повітря становить 6,8 °С, найнижча вона у січні (мінус 6,3 °С), найвища – в липні (19,8 °С). Температурний градієнт - 280 К на поверхні ґрунту та 275 К - на глибині трьох метрів. У середньому за рік у м. Суми випадає 675 мм атмосферних опадів, найменше – в лютому, найбільше – в липні. У середньому

за рік у місті спостерігається 154 дні з опадами; найменше їх (по 10) у вересні та жовтні, найбільше (18) – у грудні. Середньорічна кількість опадів по м. Суми складає 0,0017 м/добу. Щороку в м. Суми утворюється сніговий покрив, максимальна висота якого звичайно спостерігається в лютому (до 25 см). Відносна вологість повітря в середньому за рік становить 78%, найменша вона у травні (64%), найбільша – у грудні (89%). Найбільшу повторюваність у місті мають вітри з південного сходу, найменшу – з півночі та північного сходу. Найбільша швидкість вітру – взимку, найменша – у липні-серпні. У січні вона в середньому становить 4,4 м/с, у липні – 3,1 м/с. Середні метеорологічні показники наведені у табл. 2.4 (згідно з даними метеорологічного сайту для м. Суми).

Таблиця 2.4 – Середні метеорологічні показники для м. Суми (2017 р.)

Клімат м. Суми													
Показник	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Тра.	Чер.	Лип.	Сер.	Вер.	Жов.	Лис.	Груд.	Рік
Абсолютний максимум, °С	8,0	13,5	21,0	30,0	33,4	38,5	36,6	32,7	31,1	27,9	19,7	11,3	39,9
Середня температура, °С	-7,7	-6,4	-1,1	7,9	14,9	18,0	19,2	18,2	13,0	6,6	0,6	-4,2	6,6
Абсолютний мінімум, °С	-36,0	-33,0	-33,4	-14,9	-6,5	-0,4	4,7	1,1	-5,5	-19,0	-22,9	-30,7	-36,0
Норма опадів, мм	48,0	33,0	38,0	39,0	55,0	68,0	77,0	62,0	45,0	38,0	52,0	53,0	603,0
Середня швидкість вітру, м/с	4,4	4,6	4,3	4,1	3,5	3,3	3,1	3,1	3,3	3,9	4,4	4,7	3,9

У геоморфологічному відношенні територія міста являє собою приуслово-терасний затон річки Псел з перепадами висот близько 24 метрів. Переважаючі рівні висот прив'язані до притерасних територій і складають

147,0 м, а мінімальні відмітки прив'язані до затону – 124,0 м. Максимальні ухили поверхні до 15% зафіксовані на крутих схилах річкової долини.

*Майданчик Сумської ТЕЦ.*

У геоморфологічному відношенні майданчик Сумської ТЕЦ розташований на правому березі річки Псел у межах її IV надзаплавної тераси. Верхня частина геологічного розрізу цієї території складається із четвертинних палеогенових і крейдових відкладів. Крейдові відклади представлені білою крейдою, у верхній частині тріщинуватою водоносною, покрівля якої залягає на глибині 23–25 м. Крейда перекривається зеленувато-сірими тріщинуватими опоками, потужність яких становить близько 5 м. Завдяки відсутності у розрізі витриманого водотриву, ця товща утворює єдиний безнапірний водоносний комплекс з достатньо глибоким від поверхні землі рівнем залягання ґрунтових вод – до 30 м. Водовмісними породами виступають тріщинуваті опоки палеоцену та крейда, що й зумовлює хімічний склад підземних вод. Цей комплекс перекриває товща четвертинних пісків і суглинків потужністю до 18 м, а з глибини 10–11 м до поверхні землі залягають лесоподібні суглинки з прошарками викопних ґрунтів. Потік підземних вод даного горизонту відбувається переважно у північно-східному напрямку, тобто у бік річки Псел, з достатньо великими градієнтами потоку (від 0,0039 до 0,01).

*Ділянка золошлаковідвалу Сумської ТЕЦ.*

Золошлаковідвал розташований на лівому низькому березі річки Псел. На цій ділянці покрівля верхньокрейдових відкладів залягає на глибині 8–22 м від поверхні землі. Крейда перекривається четвертинними алювіальними піщано-глинистими відкладами заплавних і старичних фацій (піски від дрібних до пилюватих, супіски з малопотужними прошарками замулених, місцями заторфованих суглинків). Тріщинуваті мергельно-крейдові породи утворюють із четвертинними осадками єдиний безнапірний водоносний комплекс з рівнями залягання підземних вод - 2,5–7 м від поверхні землі. Безпосередньо на майданчику золовідвалу, розріз доповнюється техногенними



насипними утвореннями - золошлаковою сумішшю і грунтами, що складають обвалування. Рух підземних вод на цій ділянці спрямований за рельєфом на південь у бік русла річки Псел з градієнтом потоку - близько 0,007.

Склад ґрунтів буде відігравати важливу роль у міграції ЗР. Основну роль у закріпленні важких металів у ґрунті відіграють органічні речовини, глинисті мінерали та гідроксиди заліза і марганцю. Спочатку важкі метали сорбуються в основному неспецифічно, але з часом вони укріплюють зв'язок із ґрунтово-поглинальним комплексом. Це виражається у зменшенні вмісту водорозчинних та неміцно зв'язаних форм сполук. У природних умовах цьому сприяє часта зміна режимів зволоження та осушення ґрунтів. Важкі метали у процесі сорбції ґрунтом мобілізуються і переходять на нетоксичні форми, деякі входять у кристалічну решітку алюмосилікатів. Наприклад, техногенні свинець і мідь трансформуються у ґрунті в менш рухливі, а цинк і кадмій - у більш рухливі [124]. Органічні речовини ґрунтів фіксують важкі метали шляхом специфічної і неспецифічної адсорбції. Муліста фракція ґрунтів збагачена цинком і збіднена міддю та свинцем порівняно з усією ґрунтовою масою. Рівень міцності зв'язків важких металів з органічними речовинами залежить і від властивостей металу. Так, мідь зв'язується міцніше, ніж цинк і кадмій, але менш міцно, ніж свинець. У нижніх ґрунтових горизонтах основну роль у закріпленні важких металів відіграють оксиди і гідроксиди заліза, марганцю та алюмінію. Міграційна здатність ґрунтів знижується при підвищеному вмісті органічної речовини і важкому гранулометричному складі ґрунтів.

У районі розміщення Сумської ТЕЦ переважають сірі лісові ґрунти. Сірі лісові ґрунти мають яскраво виражений сірий гумусовий горизонт. У сірих лісових ґрунтах, виражено певною мірою опідзолування, тобто верхня частина ґрунтової товщі біліша за іншу, й утворюється біляста присипка. Сірі лісові ґрунти збіднені на органічну речовину і вміст гумусу в них становить 1,1 – 1,34%. Реакція ґрунтового розчину змінюється від кислої (рН 5,5) до нейтральної (рН 7). Гідролітична кислотність становить 1,8 мг-екв на 0,1 кг

грунту. Сума ввібраних основ – 0,28 – 0,34 мг-екв на 1 кг ґрунту, тобто ґрунти мало насичені основами, ступінь насиченості складає 48%. Ґрунти бідні на рухомі форми поживних речовин [125]. Водний режим ґрунтів перебуває у прямій залежності від клімату та рельєфу місцевості. Тип водного режиму напівпромивний і промивний. Зволоження в основному атмосферне, а на понижених місцях – ґрунтове та ґрунтово-атмосферне.

### **2.3 Методи дослідження міграції забруднюючих речовин**

Для вивчення міграції ЗР у зоні розташування ТЕЦ проводились дослідження снігового покриву, ґрунтів, рослинності, вод.

#### *Дослідження снігового покриву.*

Дослідження снігового покриву проводилось відповідно до «Методических рекомендаций по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве» [126]. Сніг відбирався в лютому, на початку періоду сніготанення з рівної поверхні. Керни снігу відбирались з площі 25x25 см на всю товщину снігового покриву без приземного шару (2–3 см), щоб унеможливити попадання у пробу частинок ґрунту. Проби снігової маси відбирали протягом однієї доби у всіх пунктах спостереження для виключення випадіння снігових опадів, що може зменшити ступінь достовірності результатів. Об'єм талої води становив 2,5 л.

Визначення рН відібраних проб здійснювалось за допомогою іоніметра рХ-150 МІ (Білорусь) зі скляним комбінованим електродом «ЕКС-10603». Межа основної похибки приладу  $\pm 0,05$  одиниці рН. Вміст важких металів визначали на спектрофотометрі С115-М1 (ВАТ «СЕЛМІ», Україна) з електротермічним атомізатором. Вміст завислих речовин визначався гравіметричним методом.

### *Дослідження ґрунтів.*

Відбір проб ґрунтів проводили відповідно до вимог [127–129].

Різка зміна морфологічних і фізичних властивостей міських ґрунтів і особливості їх генезису відображаються на характері розподілу елементів за профілем. У більшості випадків накопичення важких металів виявляється у верхньому 20-сантиметровому шарі і перевищує їх вміст у нижчих шарах у 2-3 і більше разів. Але бувають і протилежні випадки, коли під верхнім незабрудненим шаром залягають сильно забруднені. Крім того, можливий розподіл важких металів із декількома максимумами за профілем. Тому недостатньо проводити оцінку екологічного стану ґрунтів тільки у верхніх 20 сантиметрах ґрунтового профілю. Дослідження профільного розподілу важких металів [60, 29, 80, 85] демонструють необхідність враховувати запас поллютанта у всьому шарі, де міститься коріння рослин. Сумарні запаси поллютанта у цьому шарі будуть більш адекватним показником забруднення і пригнічення рослинності, ніж поверхневі концентрації.

Виходячи з вищенаведеного, для оцінки перенесення речовин з атмосферного повітря та при пилінні з тіла золівдвалу відбір проб проводився пошарово з глибини 0–20 см і 20–40 см. Проби ґрунтів були відібрані методом конверта. Об'єднану пробу складали не менше, ніж з п'яти точкових проб, взятих з одного майданчика. Маса кожної проби становила не менше 1 кг.

Підготовку проб проводили за методикою [129]. Відібрані проби просушували за стандартних умов (750,06 мм рт. ст., температура 298 К). Після ретельного перемішування пробу розподіляли рівномірним шаром та відбирали методом квартування необхідну для аналізу кількість зразка. Потім зразки розтирали в порошок у фарфоровій ступці та просіювали через сито d-1мм. Повітряно-сухі проби ґрунту зберігались у скляній тарі. Для приготування витяжки з повітряно-сухих зразків був використаний ацетатно-амонійний буферний розчин із рН = 4,8. Цей екстрагент прийнятий агрохімічною службою

для вилучення доступних рослинам мікроелементів та використовується для оцінювання забезпеченості ґрунтів цими елементами.

Контроль рН [130] проводили за допомогою іономіра рХ-150 МІ.

Дослідження рухомих форм ВМ проводилось методом атомно-абсорбційного аналізу на спектрофотометрі С115-М1 (ВАТ «СЕЛМІ», Україна) з електротермічним атомізатором.

#### *Дослідження рослинності*

З метою дослідження міграції ЗР на прилеглих до Сумської ТЕЦ територій у місцях відбору ґрунтових проб проводився збір трав'янистої рослинності. Найбільш репрезентативними серед відібраних видів рослин виявилась Кульбаба лікарська (*Taraxacum officinale*) та Пирій повзучий (*Elytrigia repens*). Вибір рослин визначався їх таксономічною належністю та кількістю на досліджуваних територіях. Зразки дикоростучих і культурних рослин відбиралися з 1 м<sup>2</sup> площі у тих же місцях, що і ґрунт, у трикратній повторюваності.

Проби рослин просушувались та подрібнювались до порошкоподібного стану. Повітряно-сухі проби зберігались у скляній тарі. Для приготування витяжки з повітряно-сухих зразків був використаний ацетатно-амонійний буферний розчин із рН = 4,8. Проби рослин попередньо піддавали мокрому озоленню сумішшю концентрованих кислот HNO<sub>3</sub>: HClO<sub>4</sub> в об'ємному відношенні 4:1.

#### *Дослідження підземних вод*

Польові дослідження якості підземних вод включали вимірювання фізико-хімічних параметрів води безпосередньо на місці випробування до відбору проб [131]. Для польових досліджень використовувалися портативні прилади Hanna Instruments HI-98130 Combo, HI- 98121, ULAB SX-751, за допомогою яких вимірювалися температура води, електропровідність, водневий показник (рН) та окислювально-відновний потенціал (Eh або ORP).

Окремо відмічалася наявність завислих речовин (мутність), запаху, присутність вуглеводневої плівки на поверхні води та інші візуальні ознаки якості води. Після проведення польових вимірювань у чисті скляні пляшки з кришкою відбиралися проби води на повний хімічний аналіз.

Лабораторний аналіз проб підземних вод зі спостережних свердловин виконувався хімічною лабораторією. Перелік компонентів, вміст яких визначався, включає основні іони, що формують хімічний склад води - гідрокарбонати, сульфати, хлориди, кальцій, магній, натрій; другорядні компоненти - нітрати, калій. Вибір компонентів, що підлягали аналізу, ґрунтувався на результатах попередніх досліджень на території діяльності ТЕЦ. Концентрації всіх компонентів у воді визначалися прямими методами вимірювання за стандартними методиками (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Методики визначення хімічного складу вод

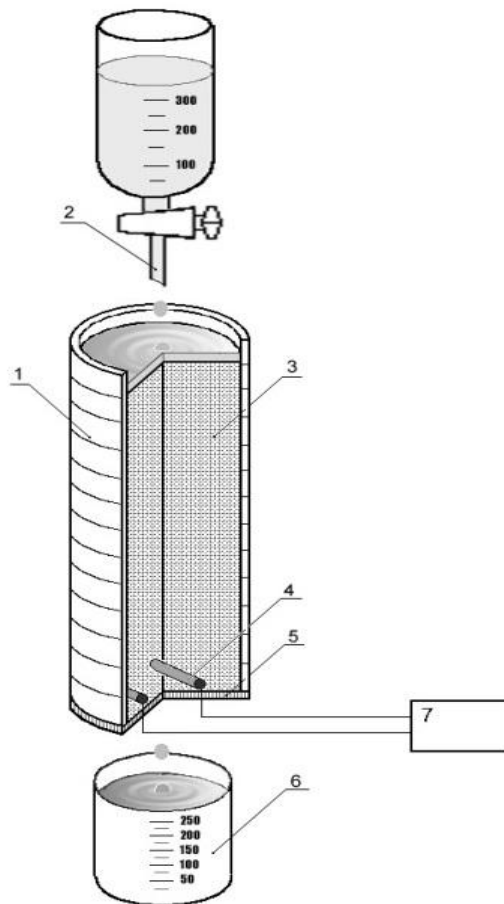
Компонент	Інтервал визначення	Метод визначення (стандарт)
Cl, мг/дм <sup>3</sup>	0,5-100	ГОСТ 4245-72
SO <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	2-25	ГОСТ 4389-72
NO <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	0,1-10	ГОСТ 18826-73
Na, мг/дм <sup>3</sup>	0,02-1000	ISO 11885:1996(E) (Атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою)
K, мг/дм <sup>3</sup>	2-1000	
Ca, мг/дм <sup>3</sup>	0,01-1000	
Mg, мг/дм <sup>3</sup>	0,001-1000	
pH, од.	0-12	Потенціометричний
Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	50-100000	ГОСТ 18164-72

Оцінка екологічного стану підземних вод проводилася згідно з вимогами нормативних документів [132, 133]. Значення гранично-допустимих концентрацій компонентів у підземних водах зі спостережних свердловин, що використовувалися в оцінці, відповідають вимогам до складу питних підземних вод з колодязів та каптажів джерел, наведених у санітарних правилах і нормах

[132]. ГДК компонентів у поверхневих водах узяті відповідно до вимог санітарних правил охорони поверхневих водойм, що діють в Україні [133].

## 2.4 Методика вивчення масоперенесення забруднюючих речовин в ґрунтах

Дослідження масо перенесення ЗР в ґрунтах проводилось на установці, представленій на рис. 2.6.



1 – колонка; 2 – посудина; 3 – досліджуваний матеріал; 4 – електроди;  
5 – фільтр; 6 – колба; 7 – електричний міст

Рисунок 2.6 – Схема експериментальної установки з вивчення фільтрації

ЗР

Експериментальна установка складається із циліндричної колонки довжиною 30 см (1) з досліджуваним матеріалом (3) і посудини (2) для подачі в колонку фільтрату. Всі частини установки кріпляться на штативі, що робить її компактною. Циліндрична колонка розбірна і складається із плексигласових кілець із внутрішнім діаметром 5 см і висотою 1 см. Циліндр із зразком ґрунту розташовується над приймальною колбою (6) для збору фільтрату. З метою запобігання розмиву зразка ґрунту на його поверхню поміщається фільтр. Дно колонки зроблене з тканинного фільтра (5), приклеєного до нижнього кільця. У нижньому кільці вмонтовані електроди (4), які дозволяють за допомогою моста змінного струму (7) вимірювати концентрацію водорозчинної сполуки у вихідному перерізі фільтраційної колони.

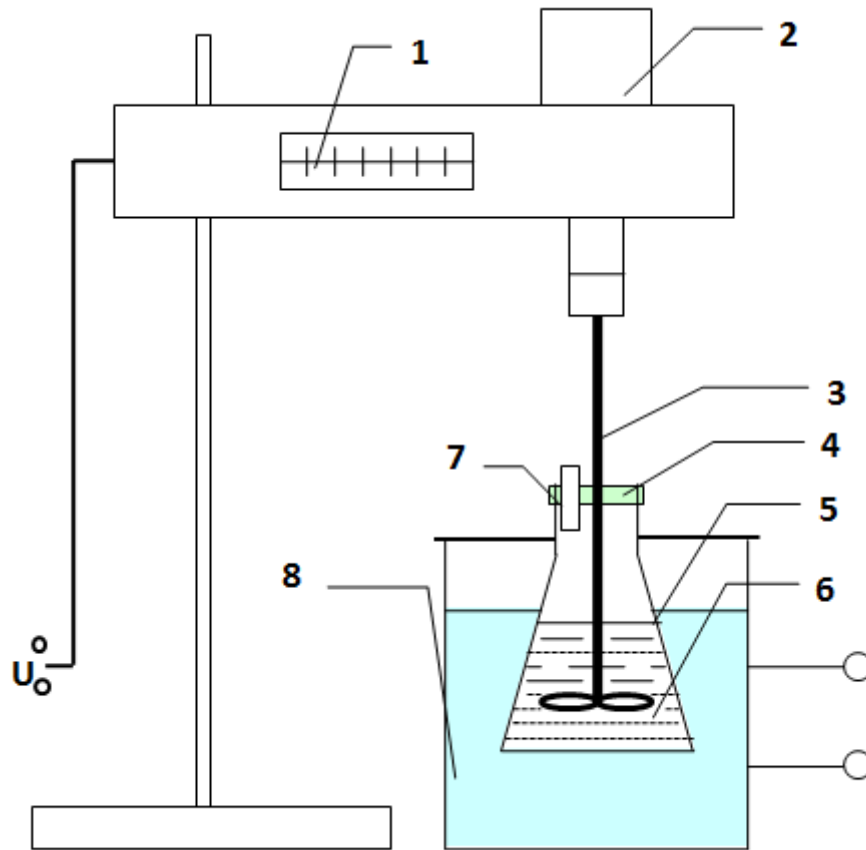
## **2.5 Методика дослідження сорбційних здатностей протифільтраційного екрана**

### *Дослідження структури зразків глини рентгенодифракційним методом*

Дослідження були виконані на автоматизованому дифрактометрі ДРОН-4-07 (НВП «Буревісник», Санкт-Петербург, Росія). Система автоматизації ДРОН-4-07 базується на мікропроцесорному контролері, що забезпечує керування гоніометром ГУР-9 і передачу даних у цифровому вигляді на ПК. Експериментальні результати передавалися безпосередньо до програмного пакету підтримання експерименту DifWin-1 (ТОВ «Еталон ПТЦ», Москва, Росія). Для ідентифікації кристалічних фаз робили подальшу передачу даних із вищезазначеного пакета у програмний пакет Cryo-tallographica Search-Match Oxford Cryosystems Ltd [134]. Ідентифікація ліній рентгенівського спектра виконувалася шляхом автоматичного порівняння отриманих результатів із базою даних картотеки JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

*Дослідження сорбції природним сорбентом*

Дослідження сорбції природним сорбентом проводились на установці, схема якої представлена на рис. 2.7.



1 – регулятор обертів мішалки, 2 – електродвигун, 3 – вал мішалки,  
4 – ущільнювач, 5 – колба, 6 – досліджуване середовище, 7 – пристрій для  
відбирання проб, 8 – термостат

Рисунок 2.7 – Схема експериментальної установки апарату з мішалкою

Для дослідження процесів адсорбції готували модельний розчин  $\text{NiSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ , який містив іонів  $\text{Ni}^{2+}$  від 0,025 моль-екв./л до 0,35 моль-екв. /л. Наважку адсорбенту брали масою 3,00 г, об'єм модельного розчину - 60 г із розрахунку  $T : P \sim 1 : 20$ . Готували 5% суспензію адсорбенту з модельним розчином та перемішували її протягом 30 хв. Температурний режим



підтримувався  $20 \pm 1$  оС. Усі досліди проводили за однакових гідродинамічних умов.

Після закінчення процесів сорбції розчин відділяли від твердої фази фільтруванням крізь паперовий фільтр. У фільтраті концентрацію  $\text{Ni}^{2+}$  визначали, використовуючи його комплексоутворення з ЕДТА. Індикатором служить мурексід, який утворює комплекс з іоном  $\text{Ni}^{2+}$ , але цей комплекс менш стійкий, ніж  $\text{Ni} - (\text{EDTA})$ .

Титрування проводять у лужному середовищі із використанням аміачного буфера при  $\text{pH} = 10$ . Додають трохи індикатора мурексиду та чекають повного розчинення. Далі проводять титрування розчином ЕДТА до зміни кольору досліджуваного розчину: від жовтого до пурпурного. Якщо зміна кольору при завершенні титрування буде відбуватися повільно, додають трохи концентрованого розчину аміаку.

Показник адсорбції розраховували як різницю концентрацій вихідного та рівноважного розчинів адсорбату:

$$\Gamma = \frac{(C_0 - C)V}{m},$$

де  $c_0$  – вихідна концентрація адсорбату, моль-екв/л;

$c$  – рівноважна концентрація адсорбату, моль-екв/л;

$V$  – об'єм розчину адсорбату, л;

$m$  – маса адсорбенту, г;

$\Gamma$  – показник адсорбції, моль-екв/г.

Математичну обробку результатів експериментів проводили за допомогою пакета програм Microsoft Office Excel.

## **Висновки до розділу 2**

У розділі охарактеризовано об'єкт дослідження, розглянуто основні технологічні та природні фактори, які впливають на міграцію ЗР та захищеність підземних вод у районі розташування Сумської ТЕЦ.

Розглянуті принципи організації системи моніторингу підземних вод на підприємстві.

Наведені методи досліджень снігового покриву, ґрунтів, рослинності, підземних вод, структури зразків глини, адсорбції, фільтрації.

Основні результати опубліковані в таких роботах: [121, 131].

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ МІГРАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У ПІДЗЕМНІ ВОДИ

#### 3.1 Фізична картина перенесення забруднюючих речовин у зоні впливу теплоелектростанцій

Аналіз впливу об'єктів теплоенергетики на гідросферу показав, що перенесення ЗР у підземні води відбувається із зони аерації підприємства, території промислового майданчика та ділянки золошлаконакопичувача. При цьому моделювання міграції ЗР матиме відмінності при описі процесу в зоні аерації та в зоні впливу золошлаконакопичувача.

У зоні аерації теплових електростанцій будемо розглядати інфільтрацію ЗР, які, осідаючи з відхідних газів на поверхні ґрунту, переносяться вниз по профілю з опадами та талою водою. Швидкість перенесення ЗР буде залежати від кількості опадів, що впливатиме на водонасичення ґрунту, та температури навколишнього середовища, що впливатиме на випаровування вологи з поверхневих шарів ґрунту.

З тіла золошлаконакопичувача перенесення ЗР буде здійснюватись у водонасиченому ґрунті за рахунок фільтрації [136].

Під час перенесення розчинених речовин у ґрунті, спостерігаються такі явища:

- немає чіткої межі між розчином, який потрапляє у ґрунт, та ґрунтовою вологою, відбувається «розмив» фронту розчину забруднювача;
- відбувається безперервне перемішування розчину та ґрунтової вологи, у результаті чого утворюється розширена зона дисперсії;
- явище перемішування, або «розмиву», фронту розчину забруднених стоків, тим сильніше, чим вища швидкість потоку та більші пори ґрунту.

Моделювання поширення забруднення може бути успішним лише в разі правильного розуміння механізмів, які визначають рух розчинених речовин у потоці ґрунтових вод. Виділяють такі процеси, що впливають на перенесення розчинених речовин: дифузія, конвекція, дисперсія, фізико-хімічні та біологічні процеси, такі, як іонний обмін, радіоактивний розпад, сорбція, розкладання бактеріями та ін.

Механізм дифузії визначає перенесення розчинених речовин при відсутності потоку ґрунтових вод. У ґрунтах з низькою провідністю внесок дифузії у транспортування розчинених речовин значно перевершує дію конвекції. У пористому середовищі дифузійні процеси сповільнюються, оскільки збільшується шлях молекул та іонів у рідкій фазі в результаті їх руху по звивистих порових каналах, навколо окремих частинок. Крім того, на зниження швидкості дифузії впливає наявність тупикових пор і заземленого повітря. Для того, щоб врахувати вплив цих факторів вводять ефективний коефіцієнт дифузії:

$$D^* = \gamma_i \cdot D_m, \quad (3.1)$$

де  $D_m$  – коефіцієнт молекулярної дифузії,  $m^2/c$ ;

$\gamma_i$  – емпіричний коефіцієнт, що об'єднує всі фактори, які зменшують коефіцієнт дифузії.

Іноді ефективний коефіцієнт дифузії визначають як добуток коефіцієнта дифузії і пористості розглянутого ґрунту:

$$D^* = \theta \cdot D_m,$$

де  $\theta$  – пористість, %.

При конвекції перенесення ЗР відбувається потоком рідини при швидкості, що дорівнює швидкості фільтрації. Швидкість фільтрації визначається за законом Дарсі.

Коли забруднені води просочуються через пористе середовище, вони змішуються з чистими ґрунтовими водами. Розведення забруднених вод в зоні фільтрації відбувається за рахунок дисперсії. При цьому розповсюдження ЗР проходить в середовищі нерівномірно. Розрізняють поздовжню і поперечну дисперсії. Поздовжня дисперсія відбувається в напрямку фільтраційного потоку, поперечна – в напрямку перпендикулярному до напрямку фільтраційного потоку. Розширення області забруднення у ґрунті викликано двома причинами. Перша визначається тим, що молекули або іони розчиненої речовини в пористому середовищі проходять шляхи різної довжини внаслідок будови структури порового простору. Цей процес називають механічною дисперсією. Іншою причиною є молекулярна дифузія в напрямку зменшення концентрації розчиненої речовини. Комбінацію цих двох процесів називають гідродинамічною дисперсією.

Причинами дисперсії служать такі фактори:

а) швидкість течії рідини в широких порових каналах вища, ніж у вузьких;

б) у поровому каналі швидкість течії рідини в середині вища, ніж біля стінок капіляра, що пояснюється силами тертя;

в) молекули і іони розчиненої речовини проходять у поровому просторі різні шляхи;

г) перетини і повороти порових каналів викликають локальні потоки, які можуть відхилитися від напрямку потоку ґрунтових вод на кут до  $180^\circ$ .

У результаті гідродинамічної дисперсії контур забруднення в міру віддалення від джерела збільшується, а максимальна концентрація зменшується. При цьому поздовжня дисперсія більша, ніж поперечна, що викликає більше розтягування контуру забруднення в напрямку потоку ґрунтових вод порівнянно з перпендикулярним.

Величина кроку гідродинамічної дисперсії залежить від гранулометричного складу ґрунтів і змінюється від 0,01 м до 10 м.

Відношення значень поперечної  $\alpha_T$  і поздовжньої  $\alpha_L$  дисперсії становить від 1:5 до 1:10.

Забруднені води можуть містити консервативні й неконсервативні речовини. Консервативні субстанції не вступають у реакції з водомісткими породами та іншими розчиненими речовинами, вони також не піддаються біологічному розкладанню та радіоактивному розпаду. Неконсервативні речовини можуть брати участь у фізико-хімічних реакціях, біологічних чи радіоактивних процесах, які змінюють концентрацію речовин у водах, що просочуються. При перенесенні у ґрунтах може відбуватись іонний обмін, розчинення-осадження, окислювально-відновні реакції, біологічне розкладання, радіоактивний розпад.

Для багатьох речовин, розчинених у ґрунтових водах, сорбційно-десорбційні процеси між рідкою і твердою фазами ґрунту мають важливе значення. Сорбція знижує і уповільнює розповсюдження забруднення у підземних водах. У більшості випадків виходять з того, що існує сорбційна рівновага в системі «рідина – тверда фаза». Це означає, що час, необхідний для конвекційного і дисперсійного масоперенесення набагато більший, ніж час, необхідний для сорбційних процесів. При цьому виникає локальна рівновага між сорбованою і розчиненою формами речовини у водоносному горизонті. Концентрацію речовини в сорбованому стані  $c_s$  можна виразити як функцію концентрації цієї речовини в розчиненому вигляді:

$$c_s = f(c).$$

Проведений аналіз показав, що на перенесення ЗР у ґрунтах впливає цілий ряд факторів, які складно врахувати при моделюванні. Тому при моделюванні допускається ряд припущень. Для математичного опису процесу фільтрації реальний потік рідини замінюється деяким фіктивним фільтраційним потоком, що безупинно заповнює всі перетини пористого середовища. При

цьому приймається, що витрата, зумовлена кількістю рідини, яка протікає через будь-яку одиничну площину розглянутого перетину за одиницю часу у фіктивному потоці, дорівнює витраті реального фільтраційного потоку. Крім того, для фіктивного потоку тиск на обраний майданчик дорівнює тиску реального потоку на ту ж площину, а сили опору, розглянуті як масові (об'ємні) сили, для фіктивного потоку у виділеному обсязі повинні дорівнювати реальним силам для того ж обсягу. Таким чином, замість реального фільтраційного потоку розглядається деяка фізична модель цього потоку, при цьому основні характеристики фіктивного (модельного) потоку або збігаються з відповідними характеристиками реального потоку, або ж за характеристиками фіктивного потоку можна визначити характеристики реального потоку. Тому для визначення середньої швидкості руху часток рідини в пористому середовищі вводиться статистичне поняття швидкості фільтрації.

Наведені припущення враховуємо при створенні математичної моделі перенесення ЗР в зоні впливу об'єктів теплоенергетики.

### **3.2 Математичне моделювання перенесення забруднюючих речовин в ґрунтах**

Для моделювання поширення ЗР розглянемо систему рівнянь, яка включає в себе рівняння руху фільтраційного потоку та конвективної дифузії [106]

$$\eta \frac{\partial H}{\partial t} = \operatorname{div}(k_f \operatorname{grad} H) - Q; \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} c) - \operatorname{div}(\vec{V}c) + \Phi(x, y, z, t, c), \quad (3.3)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт пружної ємності пласта, 1/м,

$Q$  – питома інтенсивність джерела або стоку, 1/добу;

$k_f$  – коефіцієнт фільтрації, м/добу;

$H$  – напір, м;

$c$  – концентрація ЗР, мг/м<sup>3</sup>;

$t$  – час, с;

$\Phi$  – питома інтенсивність джерела забруднення, мг/(м<sup>3</sup>·с);

$D$  – гідродинамічна дисперсія, м<sup>2</sup>/с.

Швидкість фільтрації визначається за законом Дарсі

$$\vec{V} = -k_f \text{grad}H. \quad (3.4)$$

Для рівняння (3.2) початкові умови:

$$H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z); \quad (3.5)$$

граничні умови першого роду:

$$H|_{\Gamma'_1} = H_\Gamma(x, y, z);$$

граничні умови другого роду:

$$-K \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma'_2} = q_\Gamma(x, y, z, t).$$

Для рівняння (3.3) початкові умови:

$$c(x, y, z, 0) = c_0(x, y, z); \quad (3.6)$$

граничні умови першого роду:



$$c(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = c_{\Gamma}(x, y, z, t);$$

граничні умови другого роду:

$$\left(-D \frac{\partial c}{\partial n} + V_n c\right)|_{\Gamma_2} = V_n c,$$

де  $V_n$  – нормальна складова швидкості фільтрування, віднесена до поверхні ґрунту, м/добу.

Компоненти тензора гідродинамічної дисперсії визначаємо через суму механічної дисперсії та молекулярної дифузії

$$D_{ii} = (\alpha_l - \alpha_t) \frac{V_i^2}{|\vec{V}|} + \alpha_t |\vec{V}| + D_m;$$

$$D_{ij} = (\alpha_l - \alpha_t) \frac{V_i V_j}{|\vec{V}|} \quad (i, j = x, y, z),$$

де  $V_x, V_y, V_z$  – складові швидкості, м/добу;

$$|\vec{V}| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2};$$

$\alpha_L, \alpha_T$  – коефіцієнти поздовжньої та поперечної дисперсії, м.

З огляду на велику складність аналізу просторових потоків, а також того, що умови, які потребують просторового уявлення потоку, зустрічаються у прогнозних задачах порівняно рідко, найчастіше вдаються до зведення просторової задачі до плоскої. Плоскі потоки підрозділяються на профільні та планові. У профільних потоках деформації ліній струму відбуваються переважно у вертикальній площині, а в плані потік має плоско-паралельний характер.

Оскільки в зоні впливу теплоелектростанцій спостерігається інфільтрація та фільтрація ЗР, то при моделюванні поширення ЗР обов'язково потрібно враховувати водонасичення ґрунту, яке у випадку інфільтрації буде розглядатись як змінна за глибиною шару ґрунту і буде залежати від властивостей ґрунту та від кліматичних умов, а у випадку фільтрації ЗР з тіла золошлаконакопичувача вологонасичення приймаємо постійним.

Як показав аналіз літературних джерел, для вирішення завдань прогнозування впливу об'єктів теплоенергетики та місць складування відходів використовується метод чисельного математичного моделювання, який є найбільш гнучким і обґрунтованим в умовах невизначеності та багатофакторності природних і техногенних процесів. Для чисельного розв'язку рівнянь (3.2, 3.3) було використано метод скінченних елементів.

### 3.2.1 Профільна задача фільтрації

Для нестационарного плосковертикального фільтраційного потоку рівняння (3.2) запишемо таким чином

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_f \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_f \frac{\partial H}{\partial z} \right) - Q = \eta \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3.7)$$

де  $H = \frac{p}{\gamma_w} + z$ ;

$p$  – тиск, Н/м<sup>2</sup>;

$\gamma_w$  – питома вага води, Н/м<sup>3</sup>;

$z$  – товщина шару ґрунту, м.

Граничні умови першого роду задають значення напорів на межі ґрунт - рідина:

$$H = H^*(t), \quad (3.8)$$

де  $H^*(t)$  – задана функція часу.

Граничні умови другого роду задають витрату через межу і мають вигляд:

$$k_f \left( \frac{\partial H}{\partial x} n_x + \frac{\partial H}{\partial z} n_z \right) = -V_n, \quad (3.9)$$

де  $n_x, n_z$  – складові одиничної зовнішньої нормалі до межі;

$V_n$  – задана витрата через межу, м<sup>3</sup>/с.

При нестационарній фільтрації враховуємо залежність напору від вологості та водонасичення  $H=f(W, S_w)$ .

$$H = f(W, S_w) = \begin{cases} W = W_n + S_w(W_0 - W_n), \text{ при } H < 0; \\ W = W_0, \text{ при } H \geq 0; \end{cases} \quad (3.10)$$

де  $W$  – вологість ґрунту, %;

$W_n$  – вологість ненасиченого ґрунту, %;

$W_0$  – вологість при повному водонасиченні, %

$S_w$  – водонасичення, %.

При цьому залежність водонасичення від часу після дощу  $t_d$  виразимо у вигляді:

$$S_w = f(t_d) = \begin{cases} S_w = 1, \text{ при } t_d = 0; \\ S_w = \frac{1 - \frac{0,1Q(1+W_n)}{V_{\text{гп}}}}{W_0}, \text{ при } t_d > 0; \end{cases} \quad (3.11)$$

де  $Q$  – маса води, яка видалена шляхом випаровування, кг/год;

$W_n$  – початкова вологість ґрунту, %;

$V_{\text{гр}}$  – об’єм ґрунту, м<sup>3</sup>;

$W_0$  – вологість при повному водонасиченні, %

$$W_0 = \alpha W_T;$$

$\alpha$  – коефіцієнт, який дорівнює для пісків та супісків 0,75 – 0,7; суглинків – 0,6-0,55; глин – 0,5 – 0,45 [139];

$W_T$  – вологість на межі текучості, %.

### 3.2.1.1 Алгоритм рішення задачі профільної фільтрації методом скінченних елементів

При розв’язанні нестационарної задачі профільної фільтрації використовується кроково-ітераційна процедура інтегрування за часом. Розрахунковий часовий інтервал розбивається на проміжки інтегрування  $\Delta t$ . На кожному кроці інтегрування просторова дискретизація невідомої функції  $H(x, z, t)$  здійснюється на сітці трикутних скінченних елементів.

Розглянемо довільний кінцевий елемент. Апроксимація напорів у будь-якій його точці здійснюється таким чином:

$$H(x, z, t) = \{N^e\}^T \cdot \{h^e\}, \quad (3.12)$$

де  $\{h^e\} = \begin{Bmatrix} H_1^e \\ H_2^e \\ H_3^e \end{Bmatrix}$  – вектор значень напорів у вузлах елемента, що залежить від

часу;

$$\{N^e\} = \begin{Bmatrix} N_1^e \\ N_2^e \\ N_3^e \end{Bmatrix}, \quad N_i - i\text{-та функція форми;}$$

T – знак транспонування.

Помноживши рівняння (3.7) послідовно на функції форми елемента і інтегруючи по його площі  $\Omega_e$ , використовуючи (3.12), отримуємо:

$$\int_{\Omega_e} N_i^e \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_f \frac{\partial N_j^e}{\partial x} H_j^e \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_f \frac{\partial N_j^e}{\partial z} H_j^e \right) \right] d\Omega_e + \int_{\Omega_e} Q N_i^e d\Omega_e = \int_{\Omega_e} \eta N_i^e N_j^e H_j^e d\Omega_e. \quad (3.13)$$

Перетворимо рівняння, інтегруючи перший член частинами ( $l_e$  – границя елемента):

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega_e} k_f \left( \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) H_j^e d\Omega_e + \int_{l_e} N_i k_f \left( \frac{\partial N_j^e}{\partial x} n_x + \frac{\partial N_j^e}{\partial z} n_z \right) dl_e + \\ & + \int_{\Omega_e} F N_i^e d\Omega_e = \int_{\Omega_e} \eta N_i^e N_j^e H_j^e d\Omega_e. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Вводячи матричні позначення, перепишемо рівняння (3.14) у вигляді:

$$[K_s^e] \{h^e\} - [K_{us}^e] \{h^e\} + [P^e] \{h^e\} = \{F^e\}, \quad (3.15)$$

де  $[K_s^e] = \int_{\Omega_e} k_s [B^e]^T [B^e] d\Omega_e$  – матриця проникності для водонасичених елементів;

$$[K_{us}^e] = \int_{\Omega_e} (k_e - f(\{h^e\})) [B^e]^T [B^e] d\Omega_e \quad - \quad \text{поправочна матриця}$$

проникності, що враховує неповне водонасичення;

$$[B^e] \text{ – матриця похідних функцій форми;}$$

$$[P^e] = \int_{\Omega_e} \eta \{N^e\} \{N^e\}^T d\Omega_e \text{ – матриця пружної ємності елемента;}$$

$$\{F^e\} = \int_{\Omega_e} Q \{N^e\} d\Omega_e + \int_{l_e} \{N^e\} V_n dl_e \text{ – вектор зовнішніх вузлових потоків}$$

елемента.

Припускаючи, що в межах кроку по часу напори змінюються лінійно, і, замінюючи похідну за часом кінцевою різницею, для довільного моменту часу  $t + \Delta t$  маємо:

$$[K_s^e]\{h^e\}_{t+\Delta t} - [K_{us}^e]\{h^e\}_{t+\Delta t} + [P^e] \frac{\{h^e\}_{t+\Delta t} - \{h^e\}_t}{\Delta t} = \{F^e\}_{t+\Delta t}. \quad (3.16)$$

Переходячи від довільного кінцевого елемента до сукупності елементів, що становлять розрахункову область, можна записати систему рівнянь для визначення вектора напорів усіх вузлів області  $\{h\}$ :

$$[K_s]\{h\}_{t+\Delta t} - [K_{us}]\{h\}_{t+\Delta t} + [P] \frac{\{h\}_{t+\Delta t} - \{h\}_t}{\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t}, \quad (3.17)$$

де  $[K_s]$ ,  $[K_{us}]$ ,  $[P]$  – отримані з матриць  $[K_s^e]$ ,  $[K_{us}^e]$ ,  $[P^e]$  для окремих елементів за правилом складання матриць ансамблю елементів;

$\{F\}$  – вектор заданих вузлових потоків в області.

Рівняння (3.15) перепишемо у вигляді:

$$\left( [K_s] + \frac{1}{\Delta t} [P] \right) \{h\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} + [K_{us}]\{h\}_{t+\Delta t} + [P]\{h\}_t. \quad (3.18)$$

У рівнянні (3.16)  $[K_{us}]\{h\}_{t+\Delta t} + [P]\{h\}_t$  розглядається як вектор додаткових потоків до заданого  $\{F\}$ .

Для розв'язку рівняння (3.16) використовується ітераційна схема виду:

$$\left( [K_s] + \frac{1}{\Delta t} [P] \right) \{h\}_{t+\Delta t}^k = \{F\}_{t+\Delta t} + \{R\}^{k-1}, \quad (3.19)$$

де  $\{R\}^{k-1} = [K_{us}]\{h\}_{t+\Delta t}^{k-1} + \frac{1}{\Delta t} [P]\{h\}_t$ ,

$k$  – номер ітерації.

На першій ітерації вектор додаткових потоків задається нульовим. Як критерій збіжності використовується співвідношення:

$$|\{h\}^k - \{h\}^{k-1}| \leq \varepsilon, \quad (3.20)$$

де  $\varepsilon$  – мала невід’ємна величина.

При здійсненні програмної реалізації наведений вище алгоритм був доповнений процедурою автоматичного вибору кроку за часом. В якості критерія зміни кроку обрана швидкість збіжності ітераційного процесу.

### 3.2.2 Профільна задача масоперенесення забруднюючих речовин

Для плосковертикального потоку рівняння (3.3) з урахуванням водонасичення запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta S_w \tilde{D}_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta S_w \tilde{D}_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta S_w \tilde{D}_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta S_w \tilde{D}_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x c) - \\ \frac{\partial}{\partial z} (V_z c) = \frac{\partial}{\partial t} [ \theta S_w c + (1 - \theta) c_s ] - q c^*, \end{aligned} \quad (3.21)$$

де  $V_x, V_z$  – компоненти вектора швидкості фільтрації;

$\tilde{D}_{xx}, \tilde{D}_{zz}, \tilde{D}_{xz}, \tilde{D}_{zx}$  – компоненти тензора гідродинамічної дисперсії;

$$\begin{aligned} \theta S_w \tilde{D}_{xx} &= \alpha_T |V| + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_x^2}{|V|} + \theta S_w \tau D^*; \\ \theta S_w \tilde{D}_{zz} &= \alpha_T |V| + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_z^2}{|V|} + \theta S_w \tau D^*; \\ \theta S_w \tilde{D}_{xz} &= \theta S_w \tilde{D}_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_x \cdot V_z}{|V|}; \end{aligned} \quad (3.22)$$

де  $\tau$  – коефіцієнт звивистості;

$S_w$  – водонасичення,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$|V|$  – модуль вектора швидкості фільтрації;

$c_s$  – концентрація адсорбованої на поверхні твердих частинок ЗР,  $\text{мг/л}$ ;

$c^*$  – концентрація ЗР у джерелі забруднення, мг/л;

$q$  – продуктивність джерела забруднення, л/добу.

Припускаємо, що концентрації  $c$  та  $c_s$  пов'язані лінійною рівноважною ізотермою, тоді рівняння (3.21) представимо у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{zz} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xz} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x c) - \frac{\partial}{\partial z} (V_z c) = \\ \frac{\partial}{\partial t} (\theta S_w k c) - q c^*, \end{aligned} \quad (3.23)$$

де  $D_{xx} = \theta S_w \tilde{D}_{xx}$ ,  $D_{zz} = \theta S_w \tilde{D}_{zz}$ ,  $D_{xz} = D_{zx} = \theta S_w \tilde{D}_{xz} = \theta S_w \tilde{D}_{zx}$ ;

$k = 1 + \frac{\rho_s - (1-\theta)k_d}{\theta S_w}$  – ефективний коефіцієнт розподілу;

$k_d$  – коефіцієнт розподілу.

Використовуючи рівняння безперервності потоку:

$$-\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} (\theta S_w) - q,$$

рівняння (3.23) перепишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zx} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - V_x \frac{\partial}{\partial x} - V_z \frac{\partial}{\partial z} + \\ c \frac{\partial}{\partial t} (\theta S_w) - q c = \theta S_w k \frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial}{\partial t} (\theta S_w) + c \frac{\partial}{\partial t} [(1-\theta)\rho_s k_d] - q c^*. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Якщо знехтувати складовою  $c \frac{\partial}{\partial t} [(1-\theta)\rho_s k_d]$  в силу її малості, рівняння масоперенесення ЗР набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - V_x \frac{\partial c}{\partial x} - V_z \frac{\partial c}{\partial z} = \\ = \theta S_w k \frac{\partial c}{\partial t} + q(c - c^*). \end{aligned} \quad (3.25)$$



Граничні умови першого роду:

$$c = c^*(t), \quad (3.26)$$

де  $c^*(t)$  – функція, що залежить від часу.

Граничні умови другого роду задають дисперсійні витрати речовини через межу фільтрації :

$$D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} n_x + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} n_z = -q_c^D, \quad (3.27)$$

де  $q_c^D$  - задана витрата речовини, мг/добу;

$n_x, n_z$  - складові одиничного вектора нормалі до межі.

Початкові умови задають значення концентрацій у всій розрахунковій області.

### 3.2.2.1 Алгоритм рішення профільної задачі масоперенесення ЗР методом скінченних елементів

Просторова дискретизація невідомої функції концентрації  $c(x, z, t)$  здійснюється на сітці трикутних елементів.

Введемо апроксимацію рішення таким чином:

$$c(x, z, t) = \{W^e\}^T \cdot \{c^e\} - \text{для конвективних членів};$$

$$c(x, z, t) = \{N^e\}^T \cdot \{c^e\} - \text{в інших випадках};$$

$$\text{де } \{c^e\} = \begin{Bmatrix} c_1^e \\ c_2^e \\ c_3^e \end{Bmatrix} - \text{значення концентрацій у вузлах елемента};$$

$$\{W^e\} = \begin{Bmatrix} W_1^e \\ W_2^e \\ W_3^e \end{Bmatrix} - \text{функції зважування};$$

$$\{N^e\} = \begin{Bmatrix} N_1^e \\ N_2^e \\ N_3^e \end{Bmatrix} - \text{стандартні функції форми.}$$

Оскільки при перенесенні розчиненої ЗР більшу роль відіграє конвекція, то застосовуємо метод зважування вгору по потоку [137].

Інтегруючи рівняння (3.25) по площі трикутного елемента за допомогою методу зважених нев'язок, отримуємо:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} N_1^e \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial N_J^e}{\partial x} c_J^e \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zz} \frac{\partial N_J^e}{\partial z} c_J^e \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xz} \frac{\partial N_J^e}{\partial z} c_J^e \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zx} \frac{\partial N_J^e}{\partial x} c_J^e \right) \right] d\Omega_e - \int_{\Omega_e} N_1^e \left( V_x \frac{\partial w_J^e}{\partial x} c_J^e + V_z \frac{\partial w_J^e}{\partial z} c_J^e \right) d\Omega_e = \\ & \int_{\Omega_e} N_I^e N_J^e [\theta S_w k c_J^e + q(c_J^e - c_J^{*e})] d\Omega_e. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Інтегруючи в рівнянні (3.25) перший член по частинах, отримуємо

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega_e} \left( D_{xx} \frac{\partial N_I^e}{\partial x} \frac{\partial N_J^e}{\partial x} + D_{zz} \frac{\partial N_I^e}{\partial z} \frac{\partial N_J^e}{\partial z} + D_{xz} \frac{\partial N_I^e}{\partial x} \frac{\partial N_J^e}{\partial z} + D_{zx} \frac{\partial N_I^e}{\partial z} \frac{\partial N_J^e}{\partial x} \right) c_J^e d\Omega_e + \\ & \int_{l_e} N_I^e \left( D_{xx} \frac{\partial N_J^e}{\partial x} n_x + D_{zz} \frac{\partial N_J^e}{\partial z} n_z \right) c_J^e dl_e - \int_{\Omega_e} N_I^e \left( V_x \frac{\partial w_J^e}{\partial x} c_J^e + V_z \frac{\partial w_J^e}{\partial z} c_J^e \right) d\Omega_e = \\ & \int_{\Omega_e} N_I^e N_J^e [\theta S_w k c_J^e + q(c_J^e - c^*)] d\Omega_e, \end{aligned} \quad (3.28)$$

де  $I, J = 1, 2, 3$ ,

$l_e$  – границя елемента.

Перепишемо (3.28) у матричному вигляді, ввівши необхідні позначення:

$$[E_D^e] \cdot \{c^e\} + [E_v^e] \{c^e\} + [P^e] \{c^e\} = \{F^e\} \quad (3.29)$$

де  $[E_D^e] = \int_{\Omega_e} [D^e] [B^e]^T [B^e] d\Omega_e$  – матриця дисперсії;

$[E_v^e] = \int_{\Omega_e} \{N_e\} \{V^e\} [G^e] d\Omega_e$  – матриця конвекції;

$\{V^e\}$  – вектор швидкості;

$[B^e]$  – матриця похідних функцій форми;

$[G^e]$  – матриця похідних зважуючих функцій;

$[D^e]$  – тензор гідродинамічної дисперсії;

$[P^e] = \int_{\Omega_e} (K_L \Phi S_w k) \{N^e\}^T \{N^e\} d\Omega_e$  ;

$[F^e] = \int_{\Omega_e} \{N^e\} q (c^* - \{N^e\}^T \{c^e\}) d\Omega_e + \int_{l_e} D_n \{N^e\} [B^e]$  – вектор зовнішніх

вузлових потоків елемента.

Виберемо зважуючі функції  $W$  так, щоб їх похідні мали вигляд:

$$\frac{\partial W_1}{\partial \xi} = 1 + 6\alpha\xi; \quad \frac{\partial W_1}{\partial \eta} = 0;$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial \xi} = 0; \quad \frac{\partial W_2}{\partial \eta} = 1 + 6\beta\eta; \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial W_3}{\partial \xi} = -1 - 6\alpha\xi; \quad \frac{\partial W_3}{\partial \eta} = -1 - 6\beta\eta.$$

В (3.29)  $\alpha$  і  $\beta$  - вагові коефіцієнти в напрямку локальних осей координат  $\xi$  і  $\eta$  відповідно. Знаки  $\alpha$  і  $\beta$  визначаються залежно від знака відповідної складової вектора швидкості.

Тоді матриця конвекції буде мати вигляд:

$$[E_v^e] = \frac{\Delta}{3} \left( V_x \begin{bmatrix} 1 + \alpha & 0 & -1 - \alpha \\ 1 - \frac{\alpha}{2} & 0 & -1 + \frac{\alpha}{2} \\ 1 - \frac{\alpha}{2} & 0 & -1 + \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} + V_z \begin{bmatrix} 0 & 1 - \frac{\beta}{2} & -1 + \frac{\beta}{2} \\ 0 & 1 + \beta & -1 - \beta \\ 0 & 1 - \frac{\beta}{2} & -1 + \frac{\beta}{2} \end{bmatrix} \right), \quad (3.31)$$

де  $\Delta$  – площа елемента.

При введенні даних зважуючих функцій, основна вага надається значенням концентрацій у вузлах, розташованих вгору по потоку. Таким чином, при переважанні конвекції у процесі масоперенесення враховується той факт, що протягом розрахункового часового інтервалу на величину концентрації в будь-якому елементі значно впливає конвективний приплив речовини із суміжного елемента, розташованого вище по потоку. При розв'язанні нестационарної задачі масоперенесення розрахунковий часовий інтервал розбивається на проміжки інтегрування  $\Delta t$ . Далі на кожному кроці за часом застосовується неявна різницева схема.

Для чисельного інтегрування рівняння (3.28) використовуємо різницеву схему Пікара:

$$\left(\omega([E_D^e] + [E_v^e]) + \frac{[P^e]}{\Delta t}\right)\{c^e\}_{t+\Delta t} = (\omega - 1)([E_D^e] + [E_v^e])\{c^e\}_t + \omega\{F^e\}_{t+\Delta t} + (1 - \omega)\{F^e\}_t, \quad (3.32)$$

де  $\Delta t$  – крок за часом, індексами  $t$  і  $t+\Delta t$  позначені значення функцій у попередній та поточний моменти часу;

$\omega$  – ваговий тимчасовий коефіцієнт, який дорівнює 0,5.

Додаючи (3.30) по всіх елементах за правилом ансамблю, отримуємо:

$$\left(0,5([E_D] + [E_v]) + \frac{[P]}{\Delta t}\right)c_{t+\Delta t} = 0,5([E_D] + [E_v])c_t + \frac{[P]}{\Delta t}c_t + 0,5F_{t+\Delta t} + 0,5F_t. \quad (3.33)$$

Алгоритм розв'язання задач реалізовано у програмному продукті COMSOL Multiphysics.

Наведені алгоритми використовувались для розв'язання одномірних та двомірних задач моделювання забруднення об'єктів гідросфери в зоні розташування ТЕС.

### 3.3 Моделювання фільтрації забруднюючих речовин з місць складування золошлакових відходів

#### 3.3.1 Одномірна задача фільтрації

При моделюванні фільтрації ЗР була розрахована одномірна задача перенесення речовини при течії забруднених вод з постійною швидкістю  $V$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - V \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (3.34)$$

Розглядаємо рідину, що не стискається ( $\rho = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ ) в однорідному ґрунті ( $k_f = \text{const}$ ). Вважаємо, що течія забруднених вод відбувається вздовж осі  $z$ , яка направлена від поверхні вертикально вниз. Бокові межі області розповсюдження ЗР - непроникні й не впливають на процес фільтрації.

Моделювання проводилось за умови постійного вологонасичення  $S_w = \text{const}$ . ЗР -  $KCl$ . Для розрахунку брались дані:  $\theta = 0,35$ ;  $\alpha_L = 0,005$  м;  $\tau = 0,7$ ;  $D = 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с;  $k_f = 0,1$  м/добу.

Початкові умови:

$$c(z; 0) = 0.$$

Граничні умови:

$$\text{при } z=0 \text{ м} \quad c(0; t) = c_0;$$

$$\text{при } z=L \quad c(L; t) = c.$$

Розв'язок рівняння (3.33) при наведених початкових та граничних умовах дозволив отримати профілі концентрацій ЗР при фільтрації в різні моменти часу (рис. 3.1).



1 – 1 рік; 2 – 2 роки; 3 – 4 роки; 4 – 6 років

Рисунок 3.1– Зміна концентрації ЗР по товщині шару ґрунту при фільтрації у різні моменти часу

Візуалізація розрахунків на момент часу 1 рік, представлена на рис. 3.2 та 3.3, показала, що зміна концентрації ЗР відповідає зміні гідростатичного тиску за профілем ґрунту.

### 3.3.2 Перевірка адекватності математичної моделі

Експеримент з дослідження фільтрації проводився на фільтраційній установці, представлений на рис. 2.6.

Колонка з досліджуваним матеріалом була насичена дистильованою водою. Фільтрацію проводили у стаціонарних умовах, і для визначення щільності потоку води в матеріалі вимірювався час, витрачений на проходження певного обсягу дистильованої води. На підставі цих результатів розраховувалася швидкість руху води і водонасичення:  $w = 1,15 \cdot 10^{-4}$  м/с і  $S_w = 0,32$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

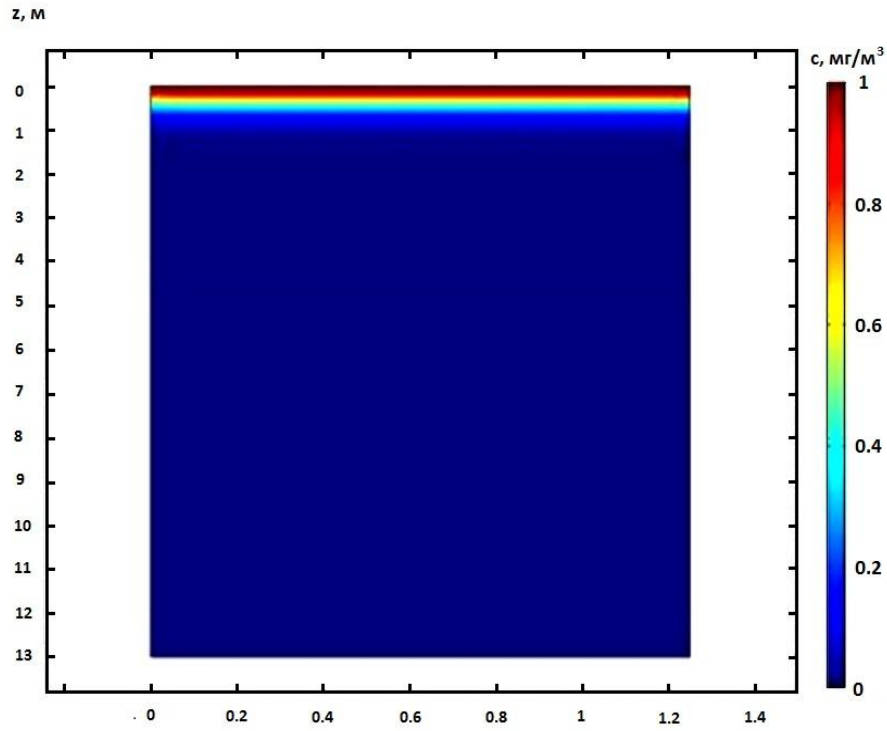


Рисунок 3.2 – Концентрація ЗР по глибині ґрунту на момент часу 1 рік

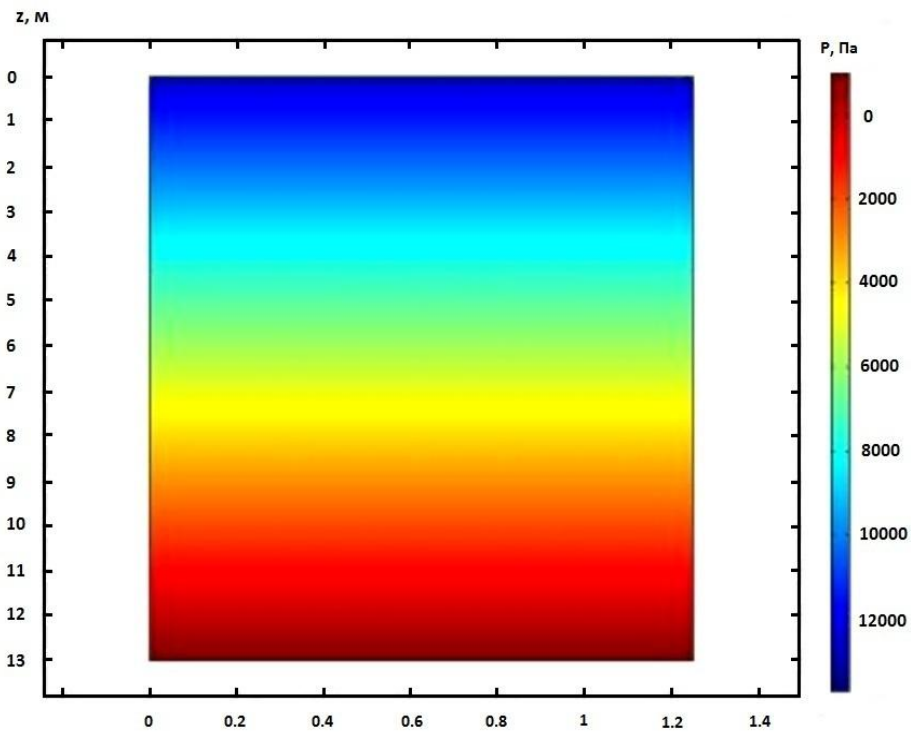


Рисунок 3.3 – Гідростатичний тиск у шарах ґрунту на момент часу 1 рік

Потім починалася подача в колонку досліджуваної ЗР певної концентрації. Оскільки в розрахунках не враховували сорбційні процеси, які протікають при перенесенні ЗР, при проведенні експерименту був використаний розчин  $KCl$  у концентрації 0,5 н. Під час фільтрації розчину періодично визначали концентрацію іонів  $Cl^-$  на виході з колонки і фіксувався час проходження ЗР. За результатами експерименту будувався графік вихідної кривої (рис.3.4).

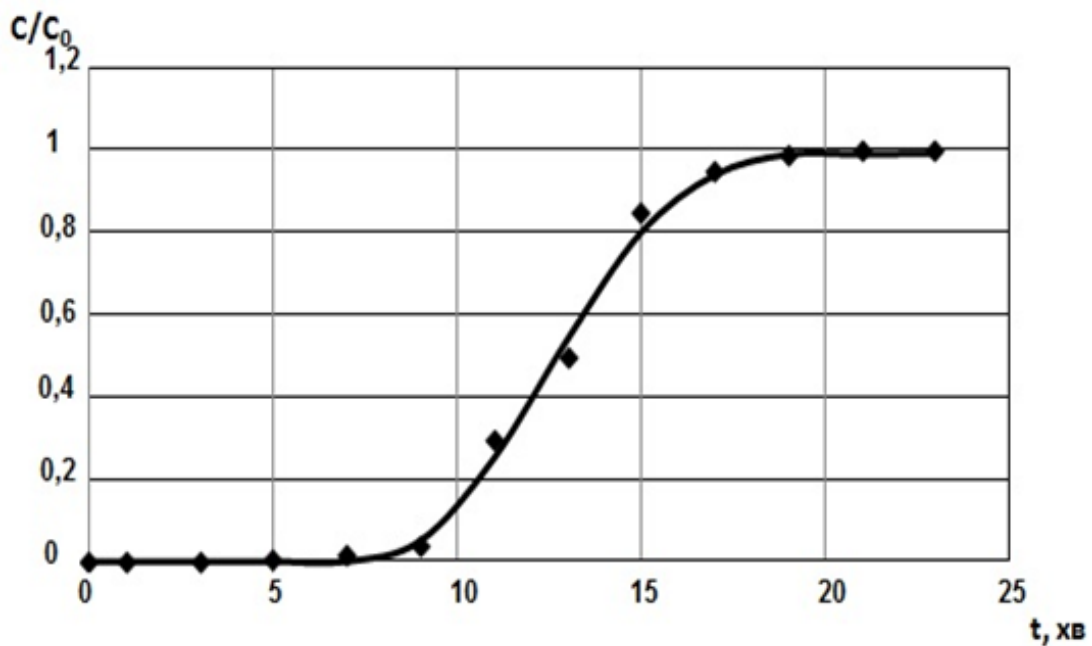


Рисунок 3.4 – Зміна концентрації ЗР від часу при фільтрації:  
лінія – розрахунок за математичною моделлю, точки – експериментальні дані

Розв'язок математичної моделі здійснювався при таких початкових та граничних умовах.

Початкові умови:

$$c(z; 0)=0.$$



Граничні умови:

при  $z=0$  м  $c(0; t)=c_0$ ;

при  $z=0,3$  м  $c(0,3; t)=c$ .

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними (рис. 3.4) вказує на те, що похибка розрахунку була менша за 5%. Виходячи з вищевикладеного, слід зробити висновок, що розроблена математична модель перенесення ЗР адекватно описує процеси, що протікають у реальних умовах.

### 3.3.3 Двовірна задача фільтрації

Розроблена математична модель використана для задачі моделювання фільтрації ЗР із золошлаконакопичувача.

При розрахунках приймали умови золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ. Джерело забруднення – золошлаконакопичувач розміром 180x300 м. Ґрунт - однорідний, з коефіцієнтом фільтрації  $k_f=0,1$  м/добу; товщина шару ґрунту –  $L = 7$  м; пористість  $\theta=0,35$ , коефіцієнт молекулярної дифузії  $D=0,04$  м<sup>2</sup>/рік; коефіцієнти поздовжньої та поперечної дисперсії  $\alpha_L=0,05$ м,  $\alpha_T=0,005$ м. Із золошлаконакопичувача надходять ЗР з концентрацією  $c^*=1$  мг/м<sup>3</sup>. Інтенсивність дощових опадів  $q=0,6$  м/рік. Нижню межу шару ґрунту вважаємо непроникною.

Розрахункова схема задачі наведена на рис. 3.5.

Область забруднення була розділена на 10 шарів по 240 елементів у кожному. В результаті утворилась сітка з із 1560 вузлів та 2400 елементів. Крок у часі брався від 0,1 до 0,2 року.

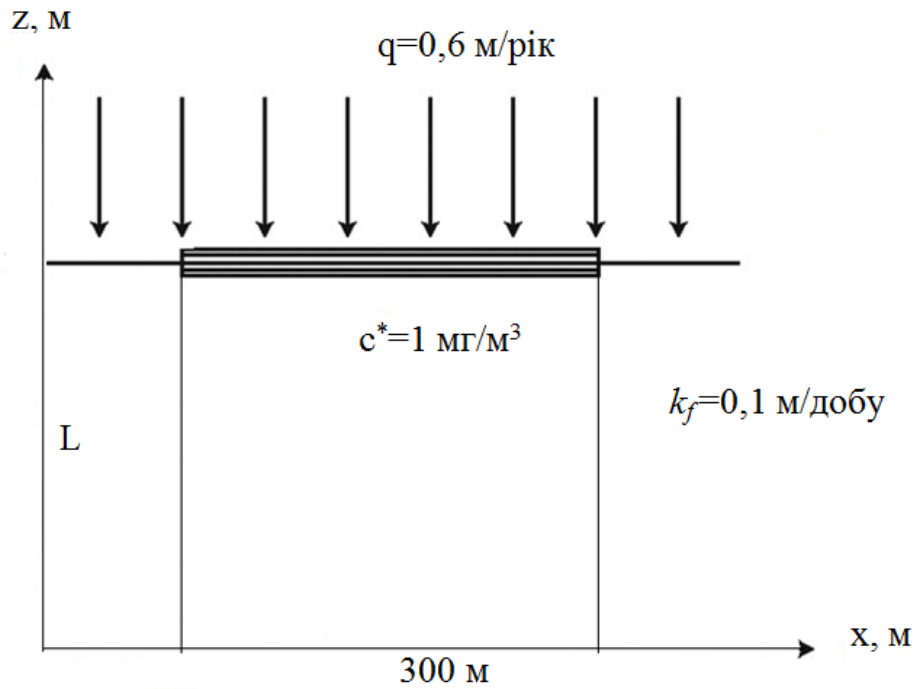


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема двовірної задачі перенесення ЗР

У результаті отримали ізолінії концентрації ЗР при надходженні забруднення 5 років (рис. 3.6) та 10 років (рис. 3.7) [138].

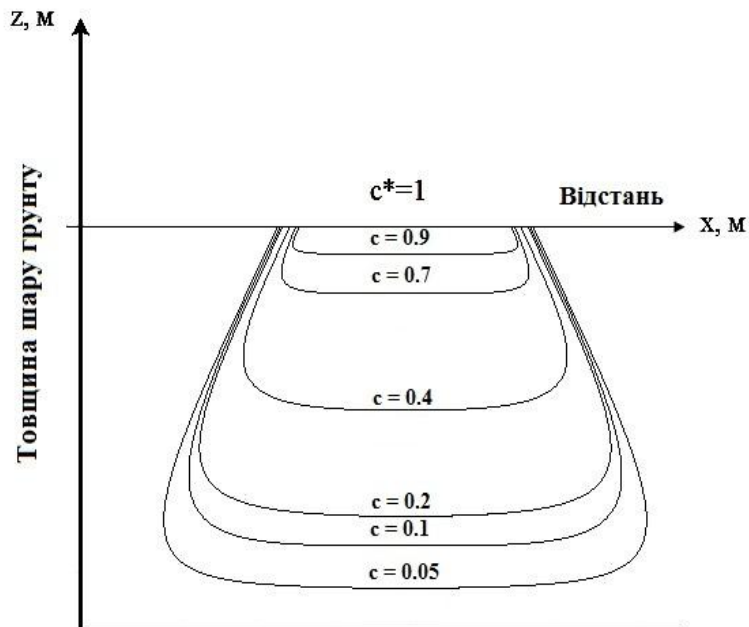


Рисунок 3.6– Ізолінії концентрації забруднюючої речовини при надходженні забруднення 5 років

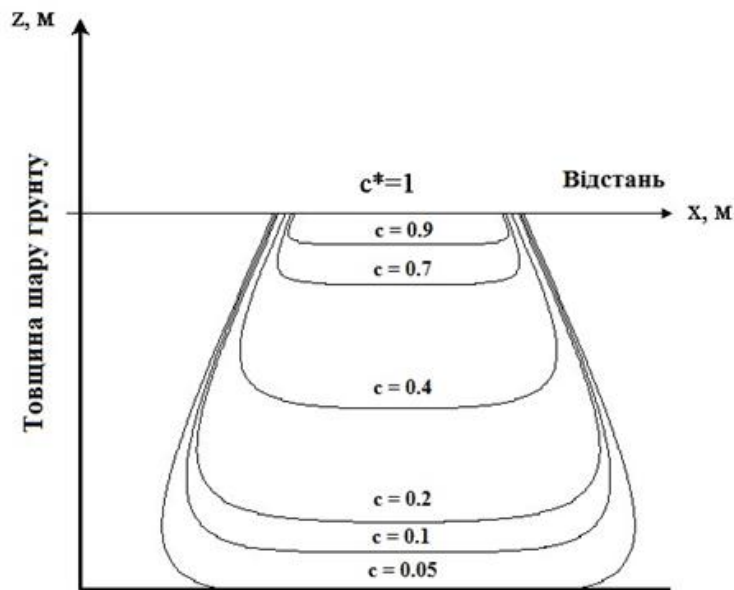


Рисунок 3.7 – Ізолінії концентрації забруднюючої речовини при надходженні забруднення 10 років

Отримані результати свідчать про більш швидке поширення забруднюючих речовин вниз по профілю, що пояснюється переважанням поздовжньої дисперсії над поперечною. Це вимагає розробки заходів по попередженню фільтрації забруднюючих речовин із місць складування золошлакових відходів.

### 3.4 Моделювання перенесення забруднюючих речовин у зоні аерації теплоелектростанцій

При моделюванні процесу міграції ЗР у зоні аерації теплових електростанцій враховували перенесення токсикантів з атмосферними опадами шляхом інфільтрації. Потік рідини при цьому спрямований перпендикулярно поверхні ґрунту.

В реальних умовах перерозподіл розчиненої речовини на поверхні ґрунту у вертикальному напрямі за рахунок порушення структури ґрунту, ерозійних та інших процесів йде набагато швидше, ніж у горизонтальному напрямку. Тому

при моделюванні перенесення ЗР у зоні аерації цілком виправдано використання одновимірних моделей.

Розглядали нестационарну задачу профільної фільтрації, потім, з урахуванням її результатів, розв'язували задачу перенесення ЗР. При цьому в рівнянні (3.25) враховували зміну водонасичення з часом.

Для моделювання перенесення ЗР при інфільтрації брались такі умови: інтенсивність дощових опадів - 77 мм/міс; середня температура 19,2 °С, відносна вологість повітря становить 70%, що характерно для метеоумов у липні в м. Суми. Приймаємо, що температура та відносна вологість поверхні ґрунту дорівнює температурі та відносній вологості приповерхневого шару повітря. Всі інші умови відповідали задачі фільтрації ЗР.

У першому наближенні розглядаємо насичення ґрунту тільки повітрям, тиск приповерхневого шару повітря дорівнює атмосферному.

Рішення задачі дозволило отримати залежність концентрації ЗР по глибині ґрунту в момент часу 5 діб після випадіння дощу (рис. 3.8).

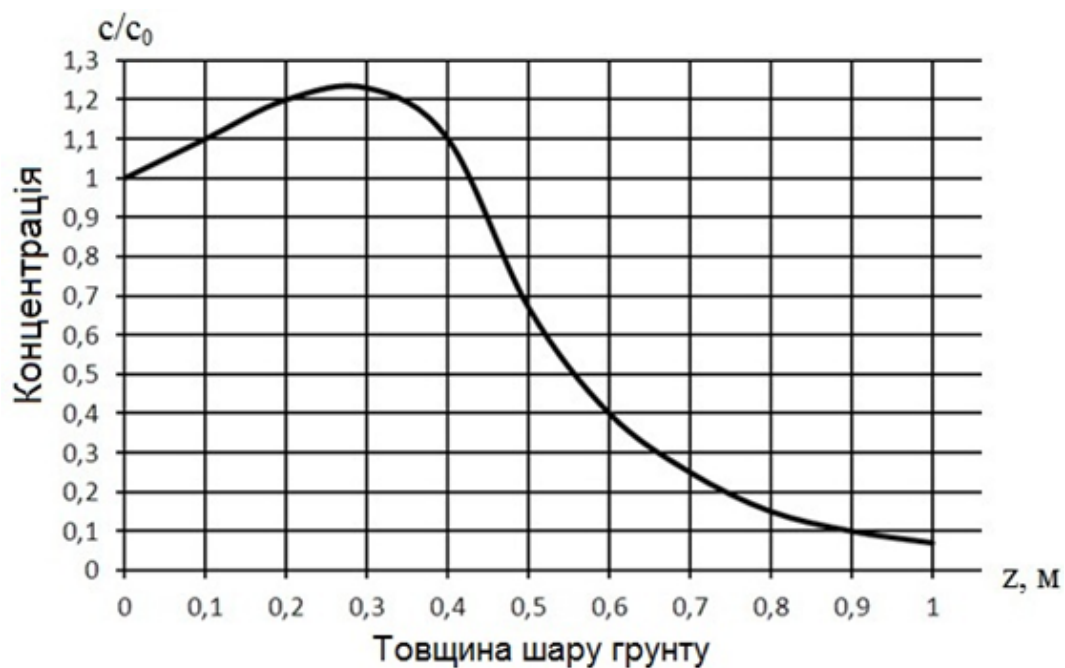


Рисунок 3.8 – Зміна концентрації ЗР при інфільтрації момент часу 5 діб

Аналіз отриманої залежності показує, що максимальна концентрація ЗР у зоні інфільтрації спостерігається на глибині 20-30 см від поверхні ґрунту, далі йде поступове зниження концентрації до досягнення значень  $\approx 0,5$  початкової концентрації на глибині 1м. Тобто аераційне перенесення ЗР призводить до забруднення орного шару ґрунту та потенційного забруднення рослин при транслокаційному перенесенні токсикантів, що вимагає розробки природоохоронних заходів.

Таким чином, розроблена математична модель, яка враховує інтенсивність атмосферних опадів та їх вплив на водонасичення та перенесення поллютантів вниз по профілю, дозволяє прогнозувати поширення ЗР при фільтрації та інфільтрації та на основі отриманих даних розробляти природоохоронні заходи для підвищення екологічної безпеки прилеглих до об'єктів теплоенергетики територій.

### **Висновки до розділу 3**

Розглянуто та систематизовано фактори, які впливають на інфільтрацію та фільтрацію ЗР у зоні розташування об'єктів теплоенергетики.

Розроблена математична модель враховує змінне водонасичення ґрунту, що дає можливість враховувати надходження атмосферних опадів та талої води при інфільтрації ЗР в зоні аерації теплових електростанцій.

На основі метода кінцевих елементів розроблені алгоритми чисельного рішення задач профільної фільтрації та масоперенесення ЗР. Для задачі фільтрації використовували метод додаткових потоків, для задачі масоперенесення – метод зважування вгору за течією.

Проведено експериментальні дослідження фільтрації ЗР при постійному водонасиченні, що моделює умови перенесення токсикантів із золошлаконакопичувача.

Аналіз адекватності математичної моделі відносно експериментальних даних свідчить про адекватність розробленої математичної моделі, значення відхилень математичної моделі та експерименту не перевищують похибки 5%.

Проведений розрахунок залежності концентрації ЗР від глибини ґрунту при змінному водонасиченні в зоні аерації ТЕС показав, що найбільша концентрація забруднювачів у зоні аерації спостерігається на глибині 20 см, що призводить до забруднення орного шару та рослинності.

Основні результати опубліковані в роботах [136, 138].

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ МІГРАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У ЗОНІ ВПЛИВУ СУМСЬКОЇ ТЕЦ

Техногенний вплив об'єктів теплоенергетики на прилеглі екосистеми залежить від шляху надходження ЗР, тобто забруднення відбувається у результаті розсіювання промислових викидів або розміщення відходів виробництва. ЗР, які містяться у відходах, на відміну від газопилових викидів, не переміщуються на значні відстані і можуть бути джерелами лише локального забруднення. Якщо місця складування відходів переповнені або обладнані неналежним чином, то збільшується небезпека водної та повітряної міграції ЗР, що збільшує площу і ступінь забруднення прилеглих територій. Тому при оцінці впливу підприємств теплоенергетики на гідросферу проводились дослідження міграції ЗР у зоні аерації теплоелектростанції та на майданчику ТЕЦ і ділянці золошлаконакопичувача.

#### **4.1 Оцінка захищеності підземних вод у районі Сумської ТЕЦ**

Можливість забруднення підземних вод з поверхні землі у значній мірі визначається захищеністю водоносних горизонтів.

Для розрахунку захищеності підземних вод у районі розташування Сумської ТЕЦ були розглянуті техногенні та природні фактори, які впливають на можливість забруднення підземних водоносних горизонтів.

Характеризуючи техногенні фактори впливу Сумської ТЕЦ на підземні води, виділяємо територію підприємства та територію золошлаконакопичувача [140]. На території підприємства міграція ЗР можлива з вугільного поля та реагентного господарства, а також у зоні аерації підприємства.

Золошлаконакопичувач буде створювати більшу загрозу для підземних вод, оскільки для проникнення ЗР, які знаходяться у розчиненому вигляді,

потрібно менше часу, ніж для інфільтрації твердих і газоподібних відходів. Аналіз проб води з поверхневої водойми золошлаконакопичувача показує, що вона характеризується змінним складом у залежності від сезону, тобто від кількості атмосферних опадів та інтенсивності випаровування. В аніонному складі домінують сульфати і хлориди із змінним переважанням, а в катіонному – головними виступають, відповідно кальцій і натрій. Мінералізація води коливається у межах 900–1200 мг/дм<sup>3</sup>. За водневим показником вода є нейтральною (рН 7,3–7,5), іноді відзначається підвищеною лужністю – рН до 9,0 [141].

Внаслідок слабого вивчення фільтраційних властивостей порід зони аерації реальна якісна оцінку захищеності проводили за трьома показниками: глибині рівня ґрунтових вод, потужності слабо проникних порід у розрізі зони аерації та коефіцієнту фільтрації цих порід (табл.1.3, 1.4).

Аналізуючи геоморфологічний профіль майданчику Сумської ТЕЦ та золошлаконакопичувача, відповідно до табл. 1.3 та 1.4 оцінюємо захищеність підземних вод. Розрахунки зведемо в табл.4.1.

На основі проведених розрахунків визначена категорія захищеності підземних вод. Для майданчика ТЕЦ категорія захищеності підземних вод V, тобто підземні води захищені, для майданчика золошлаконакопичувача категорія захищеності підземних вод II, тобто підземні води незахищені.

Недостатня захищеність підземних вод висуває завдання оцінки можливості потенційного забруднення підземних вод у зоні аерації та золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ.



Таблиця 4.1 – Оцінка захищеності підземних вод

Показник	Значення	Бали
<b>Майданчик ТЕЦ</b>		
Рівень ґрунтових вод, м	28	3
Сумарна потужність (м) та літологія слабо-проникного шару	23 м, піски, суглинки, лесоподібні суглинки	18
Сума балів		21
Категорія захищеності		V
<b>Територія золошлаконакопичувача</b>		
Рівень ґрунтових вод, м	7	1
Сумарна потужність (м) та літологія слабо-проникного шару	8 м, піски, супіски, прошарки замулених, заторфованих суглинків	5
Сума балів		6
Категорія захищеності		II

#### **4.2 Дослідження міграції забруднюючих речовин на території впливу Сумської ТЕЦ**

Для оцінки впливу підприємства на екологічний стан прилеглих територій, визначення шляхів міграції ЗР були проведені дослідження снігового покриву, ґрунтів і рослинності в районі розташування ТЕЦ та золошлаконакопичувача.

При виборі речовин для дослідження забруднення зони аерації Сумської ТЕЦ брали до уваги склад пилогазових викидів. Як свідчать дані інвентаризації, викиди Сумської ТЕЦ містять цілий ряд важких металів. Важкі метали належать до пріоритетних ЗР, спостереження за якими обов'язкові в усіх середовищах. При оцінці екологічної небезпеки забруднення навколишнього середовища в зоні впливу Сумської ТЕЦ враховували не тільки інтенсивність, а й присутність елементів, віднесених до першого і другого класів небезпеки. Серед поллютантів, контрольованих під час дослідження, до I класу небезпеки відносяться Zn, до II класу небезпеки – Ni, Cu, Cr.

#### **4.2.1 Дослідження снігового покриву в зоні аерації Сумської ТЕЦ**

Аераційний шлях міграції ЗР передбачає їх перенесення з атмосферними опадами. Для оцінки внеску цього шляху міграції ЗР в загальний рівень забруднення проводились дослідження снігового покриву в зоні аерації Сумської ТЕЦ. Для відбору проб снігового покриву організовано пункти спостереження з урахуванням середньорічного напрямку вітру. Проби снігового покриву відбирали із навітряної та підвітряної сторони підприємства на відстані 500, 1000 і 1500 м від підприємства (рис. 4.1) Контрольні зразки проб (фонові проби) були відібрані на відстані 10 км від джерела викидів. У пробах відібраного снігу визначали рН, вміст твердих частинок та важких металів.

Отримані дані (табл. 4.2, 4.3) свідчать, що розташування Сумської ТЕЦ на підвищенні та значна висота труб (62 м та 100 м) сприяють «перекиду» ЗР. Це пояснює максимальні концентрації забруднювачів на відстані 1000 м.



Рисунок 4.1 – Розташування точок відбору снігу навколо Сумської ТЕЦ

Дослідження снігового покриву показали, що забруднення атмосферного повітря призводить до зростання рН снігу на відстані 1000 м від теплоелектростанції (табл. 4.2). Цей фактор буде сприяти підвищенню лужності ґрунтів при таненні снігу та рухомості аніонних форм важких металів, і, відповідно, полегшить міграцію ЗР в підземні води.

Таблиця 4.2 – Значення рН талої води в залежності від відстані до Сумської ТЕЦ

Напрямок вітру	Фонове значення рН	Значення рН на відстанях, м		
		500	1000	1500
Пд-Сх	5,85	6,81	7,31	7,13
Пн-Зх		6,65	7,12	6,92

Результати досліджень вмісту важких металів у пробах талої води наведено на рис. 4.2.

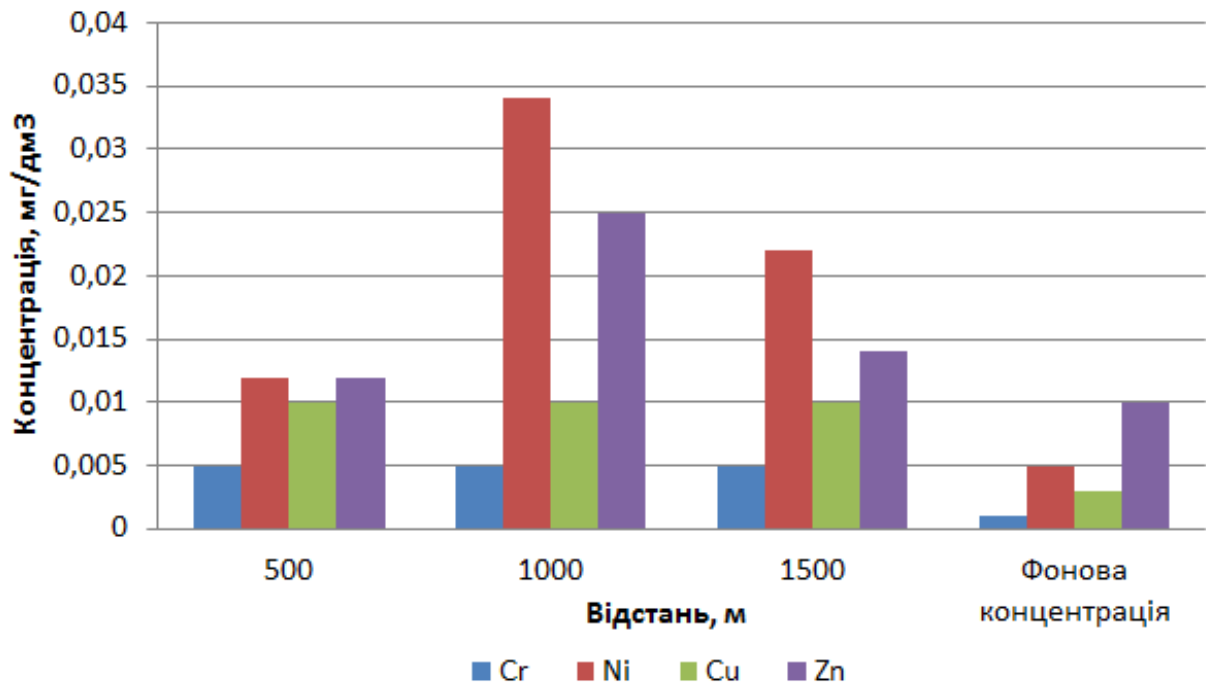


Рисунок 4.2 – Залежність концентрації ЗР в сніговому покриві від відстані від Сумської ТЕЦ (південно-східний напрямок)

Як свідчать дані рис. 4.2 та табл. 4.3, майже в усіх контрольних точках спостерігається перевищення вмісту важких металів у сніговому покриві порівняно з фоновою концентрацією. Найбільший рівень забруднення спостерігається для Ni (близько 6 фонових концентрацій) та Zn (близько 2 фонових концентрацій).

Таблиця 4.3 – Концентрація ЗР у пробах талої води

Назва речовини	Фонова концен-трація, мг/л	Концентрація ЗР на відстанях, мг/л					
		Пд-Сх			Пн-Зх		
		500	1000	1500	500	1000	1500
Тверді частинки	5,8	150	95,1	70	136	66,7	50,4
Cr	0,001	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Ni	0,005	0,012	0,034	0,022	0,012	0,018	0,01
Cu	0,003	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zn	0,01	0,012	0,025	0,014	0,012	0,016	0,007

Комплексну оцінку ступеня забруднення снігового покриву проводили за сумарним показником забруднення за формулою (4.1) [126]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_{ci} - (n-1), \quad (4.1)$$

де  $Z_c$  – сумарний показник забруднення;

$K_{ci}$  – коефіцієнт концентрації  $i$ -ї ЗР;

$n$  – кількість речовин.

Коефіцієнт концентрації враховує токсичність ЗР відносно фонових територій

$$K_{ci} = c_i / c_{\phi i}, \quad (4.2)$$

де  $c_i$  – концентрація  $i$ -ї ЗР, мг/л;

$c_{\phi i}$  – фонова концентрація  $i$ -ї ЗР, мг/л.

Рівень забруднення снігового покриву визначали відповідно до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Рівні забруднення снігового покриву[126]

Рівень забруднення	Сумарний показник забруднення снігового покриву $Z_c$
Низький	32–64
Середній	64–128
Високий	128–256
Дуже високий	>256

Отримані результати розрахунку забруднення снігового покриву наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Коефіцієнти концентрації та сумарний показник забруднення снігового покриву на різних відстанях від Сумської ТЕЦ

Назва речовини	$K_{ci}$					
	Пд-Сх			Пн-Зх		
	500	1000	1500	500	1000	1500
Тверді частинки	25,9	14,7	12,1	23,4	11,5	8,7
Cr	5	5	5	5	5	5
Ni	2,4	6,8	4,4	2,4	3,6	2
Cu	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Zn	1,2	2,5	1,4	1,2	1,6	0,7
$Z_c$	37,6	32,3	26,2	35,3	25	19,7

Відповідно до сумарного показника забруднення, в районі впливу Сумської ТЕЦ спостерігається припустимий та низький рівень забруднення снігового покриву залежно від відстані від підприємства та напрямку вітру

[142]. Максимальні значення сумарного показника забруднення снігового покриву спостерігаються у південно-східному напрямку.

#### 4.2.2 Дослідження забруднення ґрунтів у зоні впливу Сумської ТЕЦ

Відбір проб ґрунту в зоні аерації Сумської ТЕЦ здійснювався у тих же точках, що і відбір снігу, та на відстані 100 м за периметром золошлаконакопичувача (рис. 4.3).

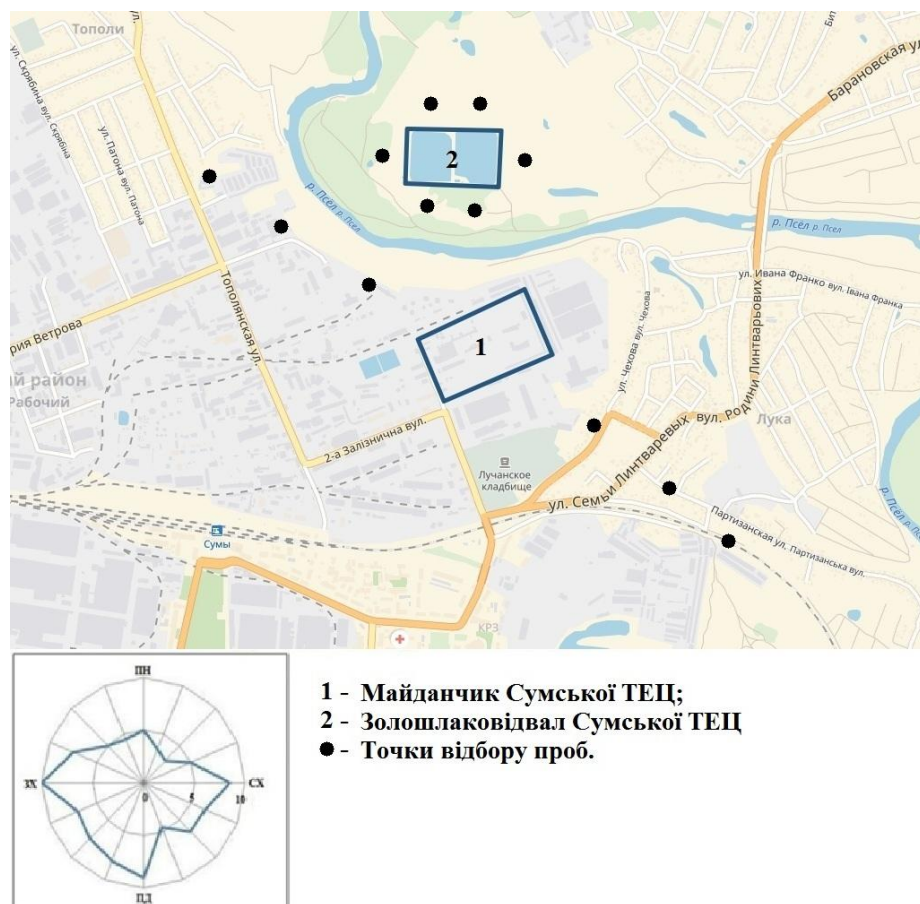


Рисунок 4.3 – Розташування точок відбору ґрунту навколо Сумської ТЕЦ та золошлаконакопичувача

Результати досліджень ґрунтів в зоні аерації Сумської ТЕЦ показали перевищення фонових концентрацій досліджуваних важких металів у верхньому шарі ґрунту в південно-східному напрямку, що відповідає найбільшим концентраціям ЗР у сніговому покриві та свідчить про аерозольне забруднення ґрунтів ЗР, які містяться у відхідних газах ТЕЦ.

Результати дослідження вмісту важких металів в ґрунтах зони аерації Сумської ТЕЦ наведені на рис. 4.4, в ґрунтах біля золошлакозаклада – на рис. 4.5. Як відчать дані, вміст іонів важких металів нижчий в зоні аерації, ніж в точках відбору проб біля золошлакозаклада, що свідчить про вплив накопичення золошлакових відходів на екологічний стан ґрунтів.

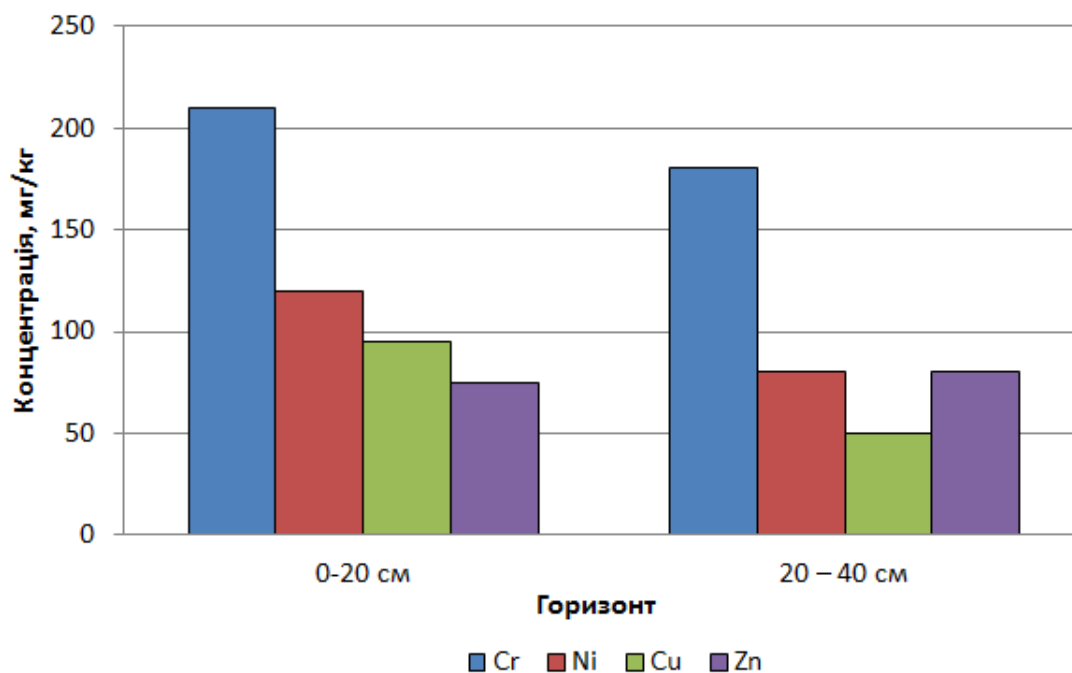


Рисунок 4.4 – Концентрація ЗР в пробах ґрунту в зоні аерації Сумської ТЕЦ на відстані 1000 м від станції (південно-східний напрямок)



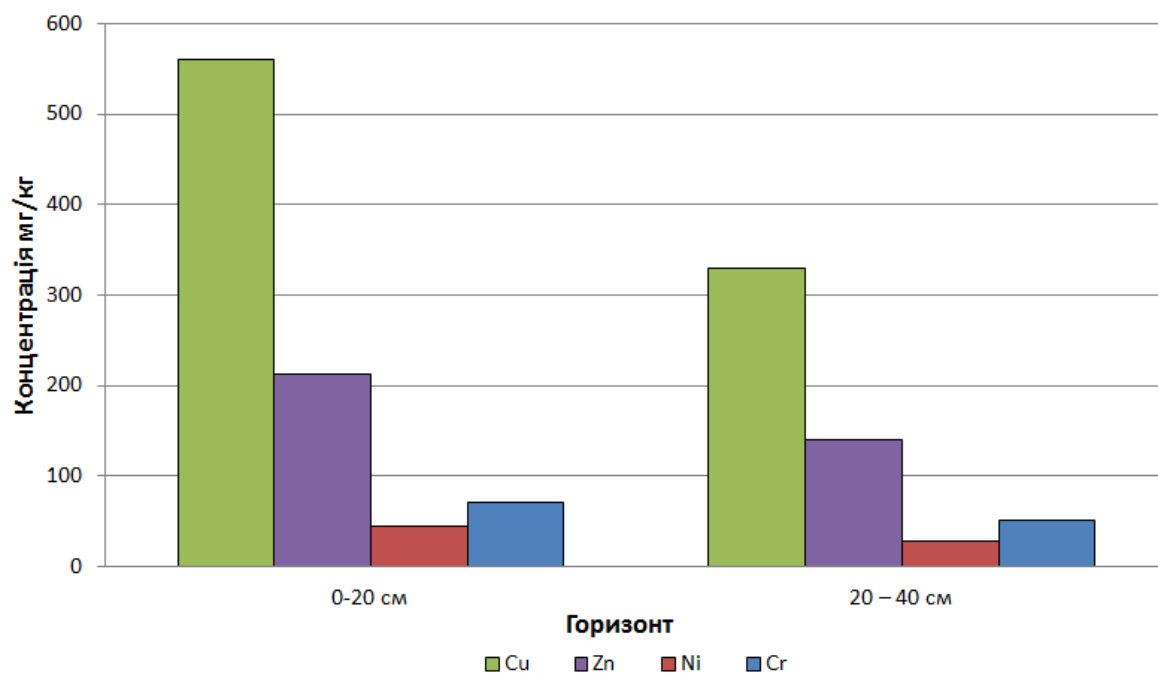


Рисунок 4.5 – Концентрація ЗР у пробах ґрунту в зоні золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ

Отримані результати показують, що максимальний внесок у забруднення ґрунтів у зоні аерації Сумської ТЕЦ чинить хром, а в зоні золошлаконакопичувача – мідь. Найбільша міграція вниз по профілю спостерігається для хрому, цинку та міді.

Збільшення вмісту важких металів та їх здатності до міграції залежить не тільки від значення рН ґрунту, а й від основних агрохімічних показників ґрунту – цим пояснюється відмінність отриманих результатів.

Цинк утримується ґрунтами більш міцно, що зумовлює ідентифікацію менших його кількостей у вигляді обмінної форми. Цинк в основному акумулюється у поверхневих горизонтах, де він сорбується глинистими частинками, залізистими мінералами та органічною речовиною, причому при  $\text{pH} < 7$  відбувається катіонний обмін, а при  $\text{pH} > 7$  більший вплив чинить хемосорбція. У лужних умовах цинк адсорбується найбільш міцно, в цих умовах можливе його включення в решітку глинистих мінералів. Іони цинку

швидше сорбуються та міцніше утримуються твердою фазою. Іони міді найбільше переходять у рідку фазу.

Комплексну оцінку ступеня забруднення ґрунтів проводили по сумарному показнику забруднення за формулою (4.1). Рівень забруднення ґрунтів визначався відповідно [125] (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Рівні забруднення ґрунтів

Рівень забруднення	Сумарний показник забруднення ґрунтів $Z_c$
Низький	8–16
Середній	16–32
Високий	32–128
Дуже високий	>128

Результати розрахунків коефіцієнтів концентрації ЗР та сумарного показника забруднення по ґрунтових горизонтах у зоні аерації Сумської ТЕЦ та на ділянці золошлаконакопичувача наведені в табл. 4.7, 4.8.

Отримані дані свідчать про допустимий та низький рівень забруднення ґрунтів у зоні аерації Сумської ТЕЦ в залежності від напрямку вітру та глибини горизонту, середній рівень забруднення ґрунтів на глибині 0–20 см і низький – на глибині 20–40 см у зоні розташування золошлаконакопичувача, про що свідчить сумарний показник забруднення.

Таблиця 4.7 – Коефіцієнти концентрації ЗР та сумарний показник забруднення по ґрунтових горизонтах у зоні аерації Сумської ТЕЦ

Забруднюючі речовини	Фонова концентрація, мг/кг	Концентрація ЗР, мг/кг на відстанях/ $K_{ci}$		
		500 м	1000 м	1500 м
1	2	3	4	5
Напрямок Пд-Сх				
Горизонт 0–20 см				
Cr	50	100/2	210/4,2	150/3
Ni	30	60/2	120/3	80/2,7
Cu	30	60/2	95/3,2	80/2,7
Zn	60	60/1	75/1,25	60/1
$Z_c$		7	11,65	9,4
Горизонт 20–40 см				
Cr	50	90/1,8	180/3,6	110/2,2
Ni	40	55/1,4	80/2	70/1,8
Cu	30	30/1	50/1,7	45/1,5
Zn	60	60/1	80/1,3	60/1
$Z_c$		5,2	8,6	6,5
Напрямок Пн-Зх				
Горизонт 20–40 см				
Cr	50	90/1,8	130/2,6	100/2
Ni	30	50/1,7	75/2,5	60/2
Cu	30	50/1,7	80/2,7	60/2
Zn	60	60/1	70/1,2	60/1
$Z_c$		6,2	9	7

Продовження табл. 4.7

1	2	3	4	5
Напрямок Пн-Зх				
Горизонт 0–20 см				
Cr	50	60/1,2	80/1,6	60/1,2
Ni	30	40/1,3	60/2	50/1,7
Cu	30	30/1	40/1,3	30/1
Zn	60	50/0,8	60/1	55/0,9
$Z_c$		4,3	5,9	4,8

Таблиця 4.8 – Коефіцієнти концентрації ЗР та сумарний показник забруднення по ґрунтових горизонтах на ділянці золонакочувача Сумської ТЕЦ

Забруднюючі речовини	Фонова концентрація, мг/кг	Концентрація ЗР, мг/кг	$K_{ci}$
Горизонт 0–20 см			
Cr	50	71	1,4
Ni	30	45	1,5
Cu	30	560	18,7
Zn	60	212	3,5
$Z_c$			25,1
Горизонт 20–40 см			
Cr	50	52	1
Ni	40	28	0,7
Cu	30	330	11
Zn	60	140	2,3
$Z_c$			15

### 4.2.3 Перевірка адекватності математичної моделі перенесення ЗР у зоні аерації Сумської ТЕЦ

Перевірка адекватності математичної моделі перенесення ЗР при інфільтрації проводилась при порівнянні результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень по вмісту іонів  $\text{Ni}^{2+}$  у ґрунтах зони аерації Сумської ТЕЦ (рис. 4.6).

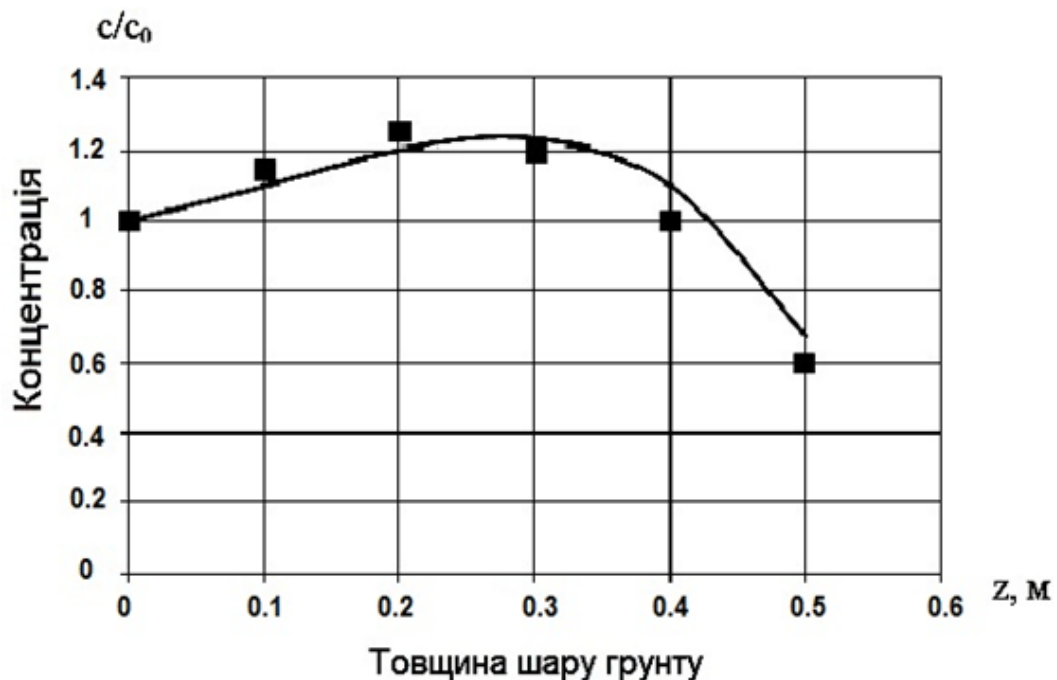


Рисунок 4.6 - Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних: лінія – розрахунок, точки – експериментальні дані

Аналіз наведених на рис. 4.6 даних свідчить, що похибка розрахунку становить 5-7%. Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок, що розроблена математична модель перенесення ЗР при інфільтрації адекватно описує процеси, що протікають у реальних умовах.

#### 4.2.4 Дослідження забруднення рослинності у зоні впливу Сумської ТЕЦ

Для розробки теоретичних основ управління якістю навколишнього середовища, екологічного нормування та екологічної безпеки територій необхідне проведення системних досліджень з метою визначення закономірностей міграції елементів у середовищі та особливостей транслокації у тканинах рослин.

Рослини у процесі життєдіяльності накопичують набір мікроелементів, багатьом із яких властива біогенність, та відіграють важливу роль у метаболізмі рослин, виступаючи в ролі кофакторів та активаторів ферментів (Zn, Cu, Mn, Ni, Co). Елементний склад рослин є лабільною величиною, на яку впливає велика кількість факторів одночасної дії. Основними факторами, які визначають вміст елементів у рослинах є:

- вміст елемента у ґрунті та воді;
- відносна кількість біодоступної форми у ґрунті;
- вид рослини, фаза розвитку та розподіл елемента по органах;
- еволюція рослини в даних геохімічних умовах та адаптація до них [143].

Рослини поглинають основну кількість елементів у вигляді вільних іонів із ґрунтового розчину, який потім поповнюється за рахунок іонів, котрі локалізовані у твердій фазі. З іншого боку, кількість поглинутого елемента частково регулюється самими рослинами. При цьому поглинання елементів, які важливі для росту рослин, наприклад, цинку, може контролюватись у більшій мірі, ніж поглинання неважливих, таких як кадмій. Опір рослин дії важких металів не представляє собою єдиний механізм, а включає в себе декілька метаболічних процесів: селективне поглинання іонів; понижену проникність мембран або інші відмінності в їх структурі та функціях; іммобілізацію іонів у корінні, листі, насінні; видалення іонів із метаболічних процесів шляхом

відкладення у фіксованих або нерозчинних формах у різних органах. Наступними стадіями буде адаптація до заміщення в ензимі фізіологічного елемента токсичним та видалення іонів із рослин при вимиванні через листя, коріння, соковиділення.

Для визначення інтенсивності транслокаційного механізму перенесення ЗР проводився аналіз рослинного матеріалу на вміст важких металів.

Відбір рослинності проводився в тих же точках, що і відбір ґрунту. Для аналізу використовували наземні частини рослин. З цією метою в точках відбору на майданчиках розміром 1x1 м рослинність скошувалась. Дослідження велись під час зупинки вегетації (під час дозрівання), коли спостерігається максимальне накопичення важких металів та перетворення мікроелемента на токсин. Кульбабу збирали в червні, пирій повзучий – у серпні [144].

Величина інтенсивності накопичення ВМ рослинністю визначалась коефіцієнтом біологічного поглинання (КБП):

$$КБП = c_{pci} / c_{zpi}, \quad (4.3)$$

де  $c_{pci}$  - концентрація ЗР в рослині, мг/кг;

$c_{zpi}$  - концентрація ЗР в ґрунті, мг/кг.

Коефіцієнт біогеохімічної активності (БХА) визначався як сума КБП.

$$БХА = \sum КБП. \quad (4.4)$$

Аналіз коефіцієнта біологічного поглинання дозволив виявити закономірності поглинання важких металів рослинами (табл.4.9).

Таблиця 4.9 – Вміст важких металів у рослинах та коефіцієнти біологічного поглинання в зоні розміщення Сумської ТЕЦ

Місце відбору проб	Елемент	Вміст ВМ, мг/кг	КБП
<i>Кульбаба лікарська Taraxacum officinale</i>			
Зона аерації	Cr	0,9	0,005
	Ni	3,9	0,04
	Cu	5,7	0,06
	Zn	7,4	0,1
	БХА		0,21
Зона золошлаковідвалу	Cr	0,36	0,005
	Ni	1,8	0,04
	Cu	50	0,07
	Zn	19	0,09
	БХА		0,21
<i>Пирій повзучий Elytrigia repens</i>			
Зона аерації	Cr	0,84	0,004
	Ni	0,9	0,01
	Cu	2,85	0,09
	Zn	3,4	0,04
	БХА		0,14
Зона золошлаковідвалу	Cr	0,36	0,005
	Ni	0,68	0,015
	Cu	62	0,09
	Zn	11	0,05
	БХА		0,16



Коефіцієнт біологічного поглинання є показником того, наскільки хімічний елемент за даних умов може бути поглинутий різними видами рослин. Відомо, що деяким видам рослин властиве накопичення досить великих кількостей елементів, інші не здатні до накопичення. По КБП можна судити про біологічну доступність хімічних елементів для рослин у ґрунті досліджуваних територій, а також про здатність окремих видів рослин до поглинання хімічних елементів.

Авессаломовою І.А. [145] розроблена градація важких металів за інтенсивністю біологічного поглинання.

Елементи біологічного накопичення (КБП>1):

I група - елементи енергійного накопичення КБП = 10n і більше;

II група – елементи сильного накопичення - КБП = 10-n.

Елементи біологічного захвату (КБП<1):

III група – елементи слабкого накопичення і середнього захвату КБП – 0,1n;

IV група – елементи слабкого захвату – КБП = 0,01n;

V група – елементи дуже слабкого захвату – КБП = 0,001n;

де n – концентрація речовини у ґрунті, мг/кг.

Використання цієї градації дозволило провести ранжування досліджуваних хімічних елементів за інтенсивністю біологічного поглинання рослинами (табл. 4.10).

Як видно з табл. 4.10, елементами більш сильного накопичення для рослин є фізіологічно значимі для рослин мікроелементи Zn та Cu. Так само сильно накопичується Ni. Елементом слабкого захвату є Cr.

Дослідження представницьких видів рослинності в районі Сумської ТЕЦ показало (табл. 4.9), що рослини пирію повзучого *Elytrigia repens* накопичують іони міді в кількостях, які значно перевищують концентрації у ґрунті. Це пояснюється біогенністю даного елемента, який входить до складу активного центру поліфенолоксидаз та бере участь у фотосинтезі.

Таблиця 4.10 - Ранжування досліджуваних хімічних елементів за інтенсивністю біологічного поглинання

Рослина	Елемент/група			
	Cr	Ni	Cu	Zn
Зона аерації				
Кульбаба лікарська <i>Taraxacum officinale</i>	V	IV	III	III
Пирій повзучий <i>Elytrigia repens</i>	V	IV	III	III
Зона золошлаковідвалу				
Кульбаба лікарська <i>Taraxacum officinale</i>	IV	III	II	II
Пирій повзучий <i>Elytrigia repens</i>	IV	III	II	II

Для інших досліджуваних елементів виявлено фізіологічний бар'єр, який перешкоджає їх надходженню в рослину. Розподіл вмісту важких металів в пирії повзучому має вигляд: Cu>Zn>Ni>Cr.

Для кульбаби лікарської найбільший коефіцієнт біологічного поглинання спостерігається для цинку, що вказує на підвищену міграцію іонів цинку в рослину з талої води при інтенсивному періоді росту у весняний період.

Цинк є есенціальним елементом для живих організмів і входить до складу активних центрів цілого ряду ферментів. Він відіграє важливу роль у білковому, вуглецевому та фосфорному обміні, в біосинтезі вітамінів. Дослідженнями [146] встановлено, що для Zn при концентрації його у ґрунті 250 мг/кг характерне метаболічне перенесення, він поглинається проти градієнта концентрації, оскільки в у рослин є захисні механізми для зниження

надходження надлишкових кількостей цього елемента в генеративні органи, що підтверджується незначним коефіцієнтом кореляції між вмістом цинку в ґрунті та рослині.

Розподіл вмісту важких металів у кульбабі лікарській *Taraxacum officinale* має вигляд: Zn>Cu>Ni>Cr. Дослідження показали, що пирій повзучий більш стійкий до накопичення забруднювачів у рослинній масі.

Аналіз залежностей поглинання трав'янистими рослинами іонообмінних форм важких металів дає можливість використання рослин як біоіндикаторів забруднення довкілля важкими металами. Зокрема, пирій повзучий *Elytrigia repens* доцільно використовувати для індикації забруднення ґрунту іонами міді, а кульбабу лікарську *Taraxacum officinale* – іонами цинку. Варіабельність накопичення важких металів різними рослинами може бути результатом різниці в будові та глибині розгалуження кореневої системи, швидкості росту коренів та кореневого обміну, неоднакових абсорбційних характеристик (поглинальної здатності) поверхні коренів та ін.

У результаті дослідження встановлено, що для досліджуваних елементів вміст їх в тканинах надземних органів рослин у значній мірі корелює з вмістом талій воді, в меншій мірі – із вмістом у ґрунті. Можливо, це пояснюється інтенсивним метаболізмом рослин у весняний період, а також біодоступністю та високим вмістом рухомих форм елементів у талій воді [147, 148].

Про загальний стан рослин судять за ступенем пошкодження листової поверхні. Дія ЗР проявляється у розвитку листових некрозів та хлорозів. Тому паралельно з хімічним аналізом рослинного матеріалу проведено оцінку ураження листових пластинок рослин хлорозом у зоні впливу золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ. У однодольних рослин – пирію повзучого, тонконогу лучного – спостерігається хлороз кінчиків листя. У дводольних рослин – кульбаби лікарської, конюшини повзучої – плямистий хлороз із переходом у некроз. Це свідчить про негативний техногенний вплив Сумської ТЕЦ на прилеглі території.

### **4.3 Моніторинг підземних вод у районі розташування об'єктів Сумської ТЕЦ**

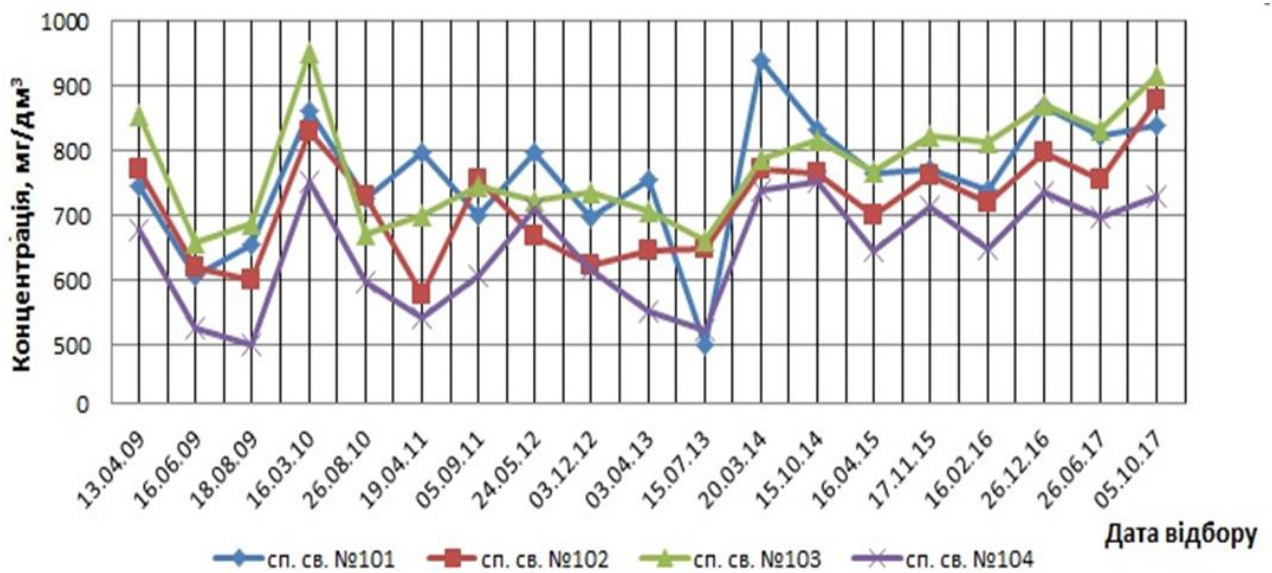
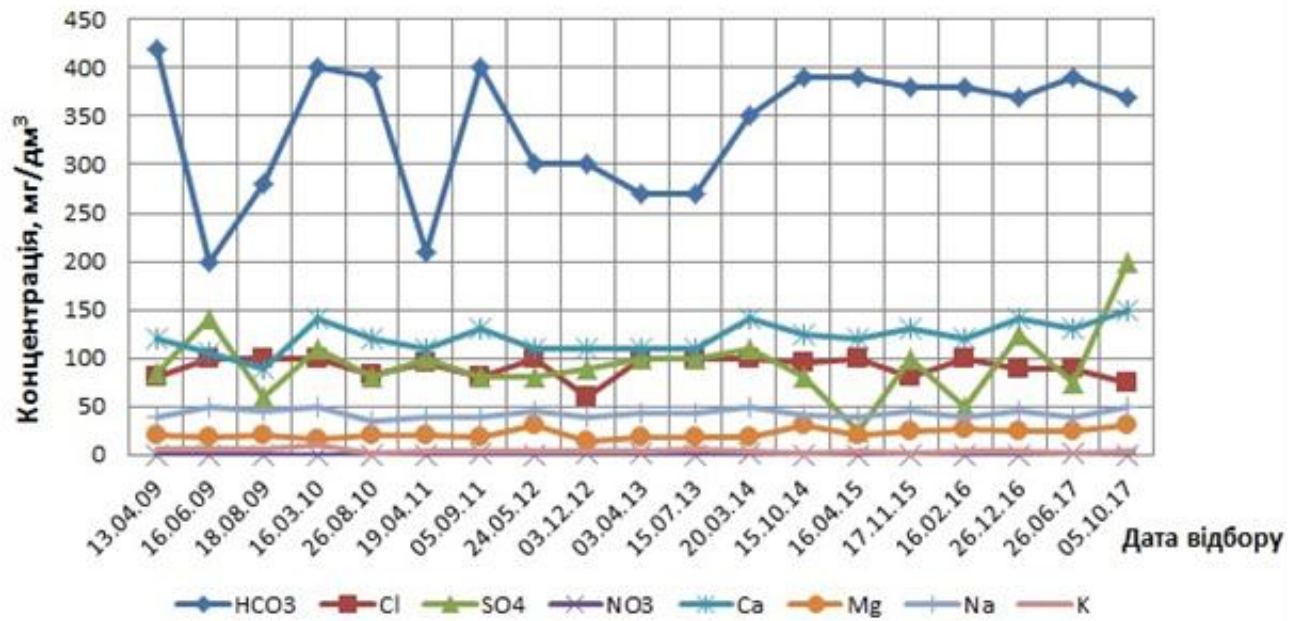
З метою виявлення впливу Сумської ТЕЦ на підземні води проводили дослідження складу підземних вод у спостережних свердловинах на майданчику ТЕЦ та в зоні золошлаконакопичувача, а також обробку моніторингових даних за період з 2009 по 2017 рік.

#### **4.3.1 Моніторинг підземних вод на майданчику ТЕЦ**

Проведені дослідження показали, що за хімічним складом підземні води на майданчику ТЕЦ – сульфатно-гідрокарбонатні кальцієві. Мінералізація води становить у середньому  $730 \text{ мг/дм}^3$ , загальна жорсткість –  $7,8\text{--}9,1 \text{ мг-екв/дм}^3$ . За даними моніторингових досліджень [123] у всіх чотирьох спостережних свердловинах на майданчику ТЕЦ за період спостереження значних коливань хімічного складу підземних вод не виявлено. Водневий показник рН також майже не відрізняється між свердловинами і становить близько 7,1.

Обробка моніторингових даних у період спостережень з початку 2009 року [123, 149–152] за концентрацією основних іонів в підземних водах у свердловині №2, яка розташована у центрі майданчика, біля котлотурбінного цеху та є показовою для всієї ділянки (рис. 4.7), показала, що підземні води характеризуються достатньо стабільним хімічним складом [121]. Коливання мінералізації води у часі невеликі, відбуваються переважно за рахунок вмісту гідрокарбонатів і пов'язані із сезонними коливаннями у живленні водоносного горизонту.

За спостережним свердловинах на майданчику ТЕЦ мінералізація води змінюється несуттєво, коливаючись майже однаково (рис.4.8) (додаток Б).



Перевищень ГДК ЗР для підземних вод у усіх свердловинах на майданчику ТЕЦ не виявлено. Відносна стабільність хімічних показників підземних вод на майданчику ТЕЦ пояснюється їх поглибленим заляганням (до 30 м від поверхні землі) і, відповідно, уповільненою реакцією на сезонні коливання в інфільтраційному живленні.

Обробка моніторингових даних залежності мінералізації підземних вод від часу спостережень дозволила отримати рівняння регресії (4.5 – 4.8), які представляють собою рівняння прямої лінії, що підтверджує достатньо стабільний хімічний склад підземних вод.

Спостережна свердловина № 101:

$$C = 6,864t + 690,56. \quad (4.5)$$

Спостережна свердловина № 102:

$$C = 6,4123t + 652,67. \quad (4.6)$$

Спостережна свердловина № 103:

$$C = 6,4789t + 710,79. \quad (4.7)$$

Спостережна свердловина № 104:

$$C = 7,4368t + 571,42. \quad (4.8)$$

#### **4.3.2 Моніторинг підземних вод у зоні золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ**

Дослідження підземних вод у районі золошлаконакопичувача [153] показали схожий хімічний склад у свердловинах №№ 202, 203, 204 і 205. Вода в них має мінералізацію в 530–1060 мг/дм<sup>3</sup> і характеризується переважно сульфатно-хлоридним натрієво-кальцієвим складом з перемінною часткою сульфатів і гідрокарбонатів та майже рівною часткою натрію і кальцію.

Обробка моніторингових даних за період спостережень з 2009 року по 2017 рік [123, 149–152] за концентрацією основних іонів у свердловині № 201, яка розташована на обвалуванні золівідвалу (рис. 4.9), показала, що підземні

води характеризуються відносно стабільним хімічним складом [121,131]. Концентрації ЗР не перевищують ГДК (додаток В).

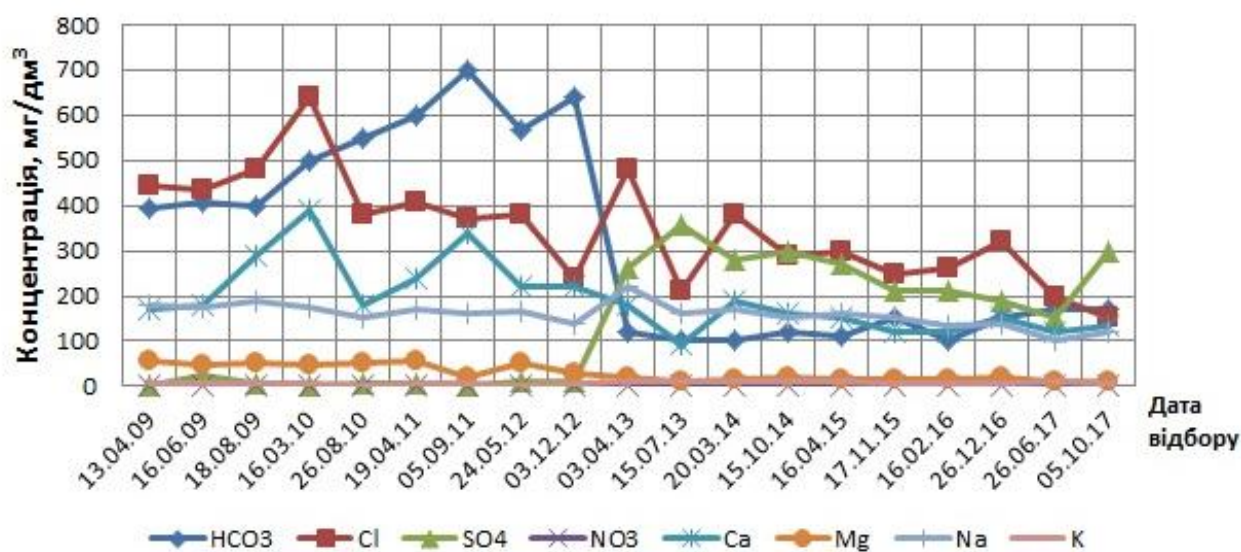


Рисунок 4.9 – Динаміка зміни хімічного складу підземних вод у спостережній свердловині № 201 золошлаконакопичувача за період з 2009 по 2017 рік

На рис. 4.10 наведено гідрохімічний профіль за лінією розташування спостережних свердловин у напрямку від золошлаковідвалу в бік річки, який побудовано за результатами відбору у жовтні 2017 р.

Гідрохімічний профіль показує достатньо рівні співвідношення основних іонів у складі підземних вод у свердловинах нижче золовідвалу (№ 201, 202, 204, 205) на фоні повільного зменшення мінералізації води з віддаленням від золовідвалу.

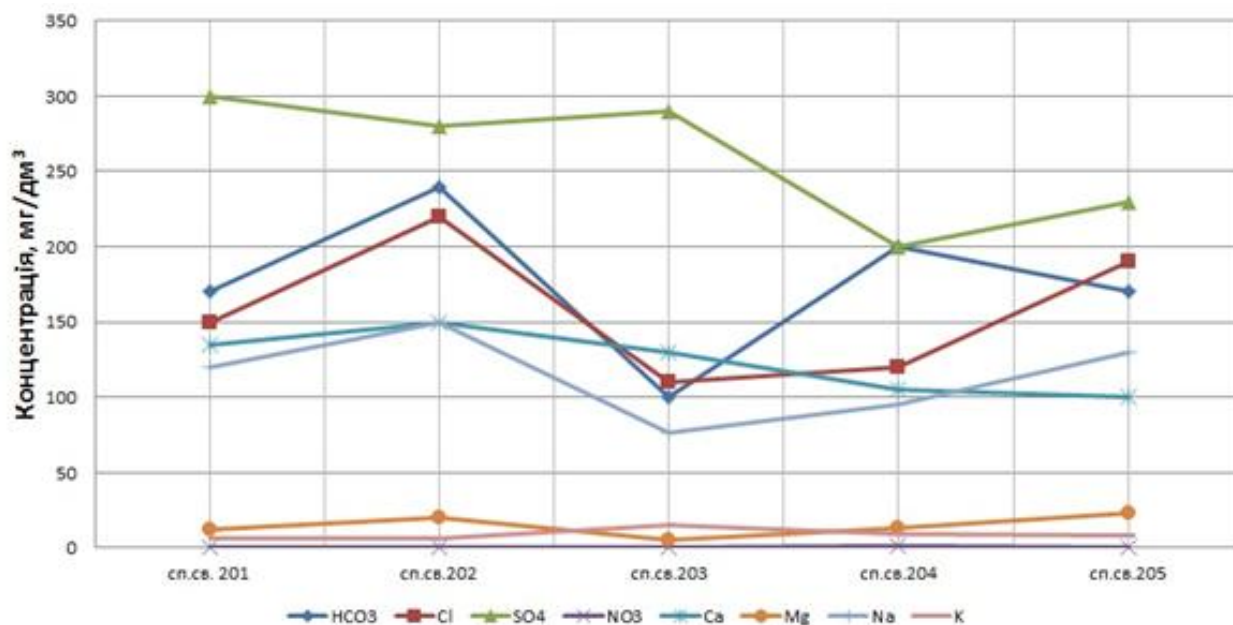


Рисунок 4.10 – Хімічний склад підземних вод по спостережних свердловинах золошлакозачистувача (дані 2017 року)

Для порівняння зі складом підземних вод була проаналізована поверхнева проба з р. Псел, відібрана нижче золовідвалу за течією (додаток В).

Відмінності підземних і поверхневих вод проявляються, головним чином, в аніонному складі. Якщо ґрунтові води характеризуються переважанням хлоридів і сульфатів, то річкова вода вирізняється їх відсутністю і домінуванням гідрокарбонат-іону. Це свідчить про відсутність підземного живлення річки і, відповідно, винесення солей із підземних вод до поверхневих на даній ділянці, у тому числі з боку золовідвалу. Вода р. Псел в створі (нижче золовідвалу) характеризується гідрокарбонатним кальцієвим складом і мінералізацією близько 500 мг/дм<sup>3</sup>.

Аналіз проб води з природної водойми, що знаходиться нижче золошлакозачистувача, яка час від часу пересихає та знов наповнюється атмосферними опадами, показав, що за складом вода відповідає пробам з першого від поверхні водоносного горизонту.



Динаміка зміни мінералізації підземних вод у спостережних свердловинах на ділянці золошлаконакопичувача наведена на рис. 4.11 та в додатку В.



Рисунок 4.11 – Мінералізація підземних вод по спостережних свердловинам на майданчику золошлаконакопичувача

Обробка моніторингових даних залежності мінералізації підземних вод від часу спостережень дозволила отримати рівняння регресії (4.9 – 4.13). За свердловинами 201, 202, 204, 205 отримані залежності з достатньою точністю представляють собою рівняння прямої лінії, що підтверджує достатньо стабільний хімічний склад підземних вод.

Спостережна свердловина № 201:

$$C = -37,747x + 1334,8. \quad (4.9)$$

Спостережна свердловина № 202:

$$C = 16,445 t + 740,5. \quad (4.10)$$

Спостережна свердловина № 203:

$$C = -7,2692 t + 1220. \quad (4.11)$$

Спостережна свердловина № 204:

$$C = -15,484 t + 944,38. \quad (4.12)$$

Спостережна свердловина № 205:

$$C = 16,445 t + 740,5. \quad (4.13)$$

Підвищена мінералізація свердловини 203 пояснюється високим вмістом нітратів на рівні 150–350 мг/дм<sup>3</sup> (3–7 ГДК) і калію 200–300 мг/дм<sup>3</sup>. Такі відмінності у складі води не пов'язані із роботою золовідвалу, оскільки обидва ці компоненти відсутні у складі золошлакової суміші у таких кількостях. Їхнє надходження у підземні води слід пов'язувати зі впливом присадибних ділянок, розташованих прямо під обвалуванням золовідвалу, на яких цілком ймовірно використання мінеральних та органічних добрив у надлишкових кількостях. У 2017 році зафіксовано помітне зниження вмісту нітратів і калію. Концентрації нітратів не перевищували 3,0 мг/дм<sup>3</sup> (при ГДК 50 мг/дм<sup>3</sup>), а вміст калію знизився до 15–42 мг/дм<sup>3</sup>, хоча залишився підвищеним відносно інших спостережних свердловин.

Загальний хімічний склад підземних вод добре ілюструють діаграми Пайпера, на яких показано проби зі свердловин на майданчику ТЕЦ та золошлакозаклада за весь період спостережень (рис. 4.12).

Підземні води на майданчику ТЕЦ (червоні кола на рис. 4.12) за весь період спостережень мають стабільний склад із переважанням гідрокарбонатів в аніонній частині та кальцію з магнієм у катіонній.

Проби зі свердловин золовідвалу демонструють помітну варіацію у хімічному складі, що зумовлено просторовими відмінностями у складі водовмісних порід на ділянках свердловин, включаючи матеріал золошлакової суміші, та мінливістю складу вод золовідвалу у часі за рахунок їхнього неглибокого залягання.

Результати досліджень підземних вод першого від поверхні четвертинно-верхньокрейдового водоносного комплексу на ділянці золошлаконакопичувача вказують на наявність трансформації їх хімічного складу навколо нього за рахунок фільтрації вод із золовідвалу[141, 153]. Ознаками цього є підвищений вміст у воді із спостережних свердловин хлоридів, сульфатів, натрію, заліза (додаток В).

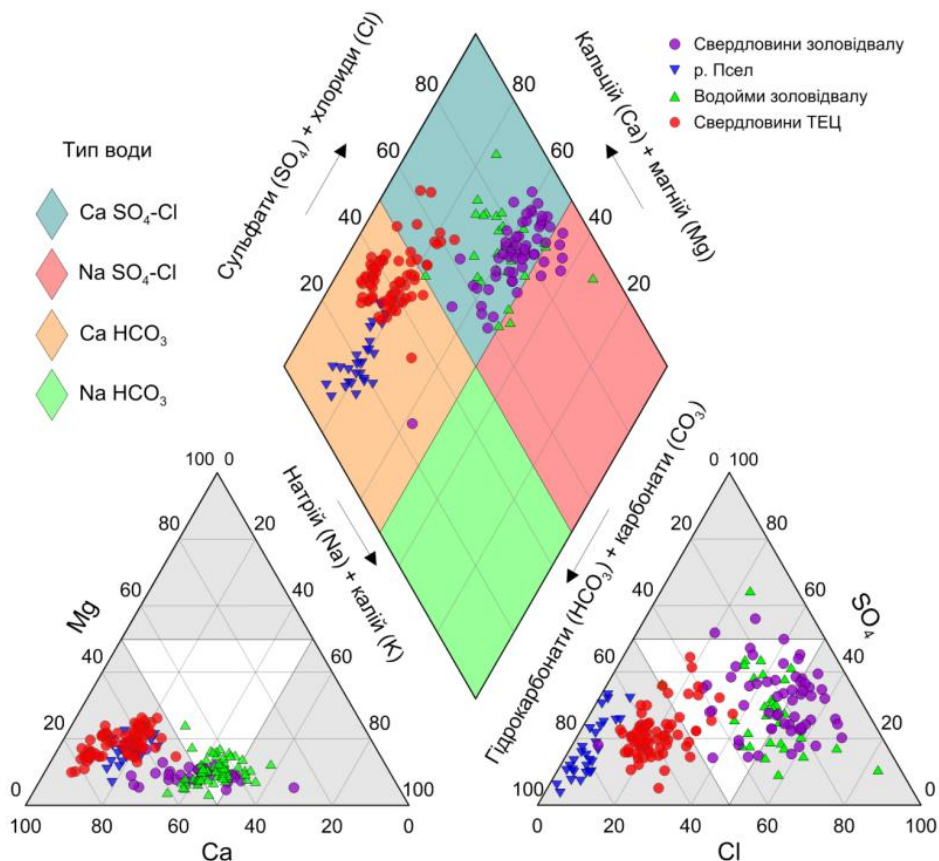


Рисунок 4.12 – Хімічний склад підземних і поверхневих вод на майданчику ТЕЦ і на ділянці золовідвалу

Діаграми хімічного складу підземних вод на майданчику Сумської ТЕЦ та ділянці золошлаконакопичувача наведені в додатку Г.

Таким чином, проведені дослідження стану снігового покриву, ґрунтів, рослинності та підземних вод показали, що найбільше на забруднення підземних вод впливає фільтрація ЗР з ділянки золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ.

## Висновки до розділу 4

Проведені дослідження з оцінки захищеності підземних вод у районі розташування Сумської ТЕЦ показали різну захищеність підземних вод на майданчику ТЕЦ та ділянці розміщення золошлакозакладу. Якісна оцінка захищеності ґрунтових вод проводилась за рівням їх залягання, потужності та фільтраційних властивостях слабо проникних порід зони аерації. Для майданчика ТЕЦ категорія захищеності підземних вод V, тобто підземні води захищені, для майданчика золошлакозакладу – категорія захищеності підземних вод II, тобто підземні води незахищені.

Відібрані проби снігового покриву, ґрунтів і рослинності досліджені на вміст важких металів.

Виявлені перевищення фонових значень концентрацій важких металів у сніговому покриві, що призвело до порушення природного співвідношення форм знаходження важких металів.

Вміст іонообмінних форм важких металів у ґрунтах зменшується у ряду: Cu>Zn>Pb>Ni>Cr. Проведена оцінка забруднення ґрунтів за сумарним показником забруднення показала, що рівень забруднення ґрунтів у зоні аерації – припустимий, у зоні золовідвалу: для верхнього горизонту – середній, для нижнього – низький, що свідчить про комплексний вплив забруднення атмосферного повітря та міграції речовин з тіла золошлакозакладу.

Оцінка інтенсивності поглинання представницькими видами рослинності за коефіцієнтом біогеохімічної активності іонів важких металів показала максимальну здатність до акумуляції іонів міді у пирія повзучого, іонів цинку – у кульбаби лікарської.

Результати досліджень підземних вод першого від поверхні четвертинно-верхньокрейдового водоносного комплексу на ділянці золошлакозакладу вказують на наявність трансформації їх хімічного складу навколо нього за рахунок фільтрації вод із золовідвалу. Ознаками цього є підвищений вміст у

воді із спостережних свердловин хлоридів, сульфатів, натрію, заліза.

Перевірка адекватності математичної моделі інфільтрації ЗР шляхом порівняння розрахункових даних і даних щодо дослідження міграції ЗР в ґрунтах зони аерації Сумської ТЕЦ показала розбіжність на рівні 5–7 %.

Основні результати опубліковані в таких роботах: [140–144, 147, 148, 153].

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗОЛОШЛАКОНАКОПИЧУВАЧА НА ГІДРОСФЕРУ

Проведені дослідження з оцінки впливу Сумської ТЕЦ на гідросферу показали, що золошлаконакопичувач є джерелом негативного впливу на підземні води. Це висуває задачу розробки природоохоронних заходів з метою попередження потрапляння ЗР в підземні горизонти та підвищення рівня екологічної безпеки прилеглих до підприємства територій.

Останнім часом набув розвитку комплексний підхід до управління екологічною безпекою, який базується на всебічному вивченні умов формування небезпеки та домінуванні технічних методів регулювання її станів. У 1996 р. ЄС опублікувано Директиву «Про інтегроване попередження забруднення й контролю над ним». Згідно із цією директивою, рішення про можливість одержання інтегрованого дозволу на викиди, скидання забруднювачів і розміщення відходів ухвалюється на основі екологічного аудиту підприємства, в ході якого для кожного виду виробництва складається баланс ЗР, ураховуються всі викиди, скиди й відходи, здійснюється зіставлення екологічних показників з базовими показниками «найкращих доступних методів», оцінюється енергоефективність виробництва, ймовірність виникнення аварійних ситуацій, усунення їх наслідків, план реабілітації території у випадку закриття виробництва. Згідно з визначенням «найкращі доступні методи» – це найбільш ефективні шляхи розвитку й методи керування виробництвом, що забезпечують можливість попереджати викиди й негативні впливи на навколишнє середовище, а коли це неможливо, – знизити негативний ефект.

Необхідним стимулом інноваційних процесів є прийняття державних стандартів екологічного управління та керування [154, 155]. Орієнтація промислового виробництва на виконання вимог цих стандартів дозволяє

оптимізувати та стабілізувати роботу основного технологічного обладнання, сприяє технічному переоснащенню промислових підприємств, удосконаленню природоохоронного обладнання, що призводить до дотримання нормативів впливу на довкілля. Враховуючи вищенаведене, технічні методи щодо запобігання впливу золошлакових відходів на гідросферу розділимо на дві групи: активні, які передбачають зменшення утворення відходів та пасивні, які полягають у зменшенні впливу уже існуючих місць складування відходів на гідросферу (рис. 5.1).

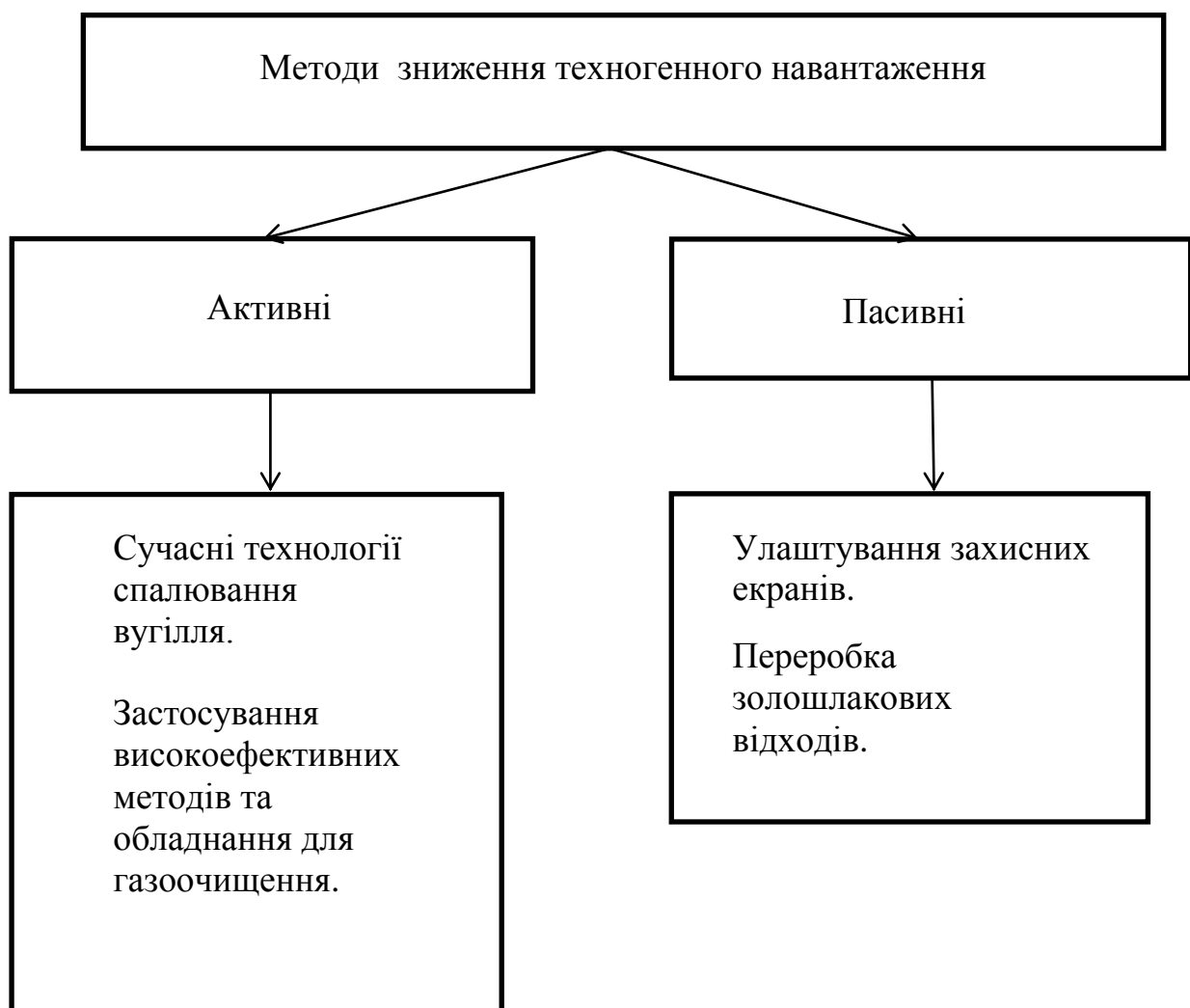


Рисунок 5.1 – Заходи по зниженню техногенного навантаження на гідросферу від місць складування ЗШВ

Активні методи пов'язані з оптимізацією технологічних і природоохоронних процесів. При цьому оптимізація технологічних процесів буде спрямована на вибір інтенсивних режимів згоряння палива, які сприяють зменшенню утворення ЗШВ.

Оптимізація природоохоронного процесу полягає у вилученні найбільшої маси ЗР за певний відрізок часу [156]. На підприємствах теплоенергетики реалізувати принцип оптимізації природоохоронних процесів доцільно шляхом застосування високоінтенсивного очисного обладнання. У цьому випадку процес оптимізації слід розглядати як вирішення оптимізаційного завдання, приймаючи в якості параметра оптимізації інтенсивність цього очисного апарата.

Пасивні методи будуть спрямовані на попередження забруднення при проектуванні або розширенні площі існуючих місць складування ЗШВ шляхом улаштування захисних екранів та зменшення обсягів відходів у вже існуючих золошлаконакопичувачах при переробці ЗШВ.

### **5.1 Розробка заходів щодо обладнання захисних екранів**

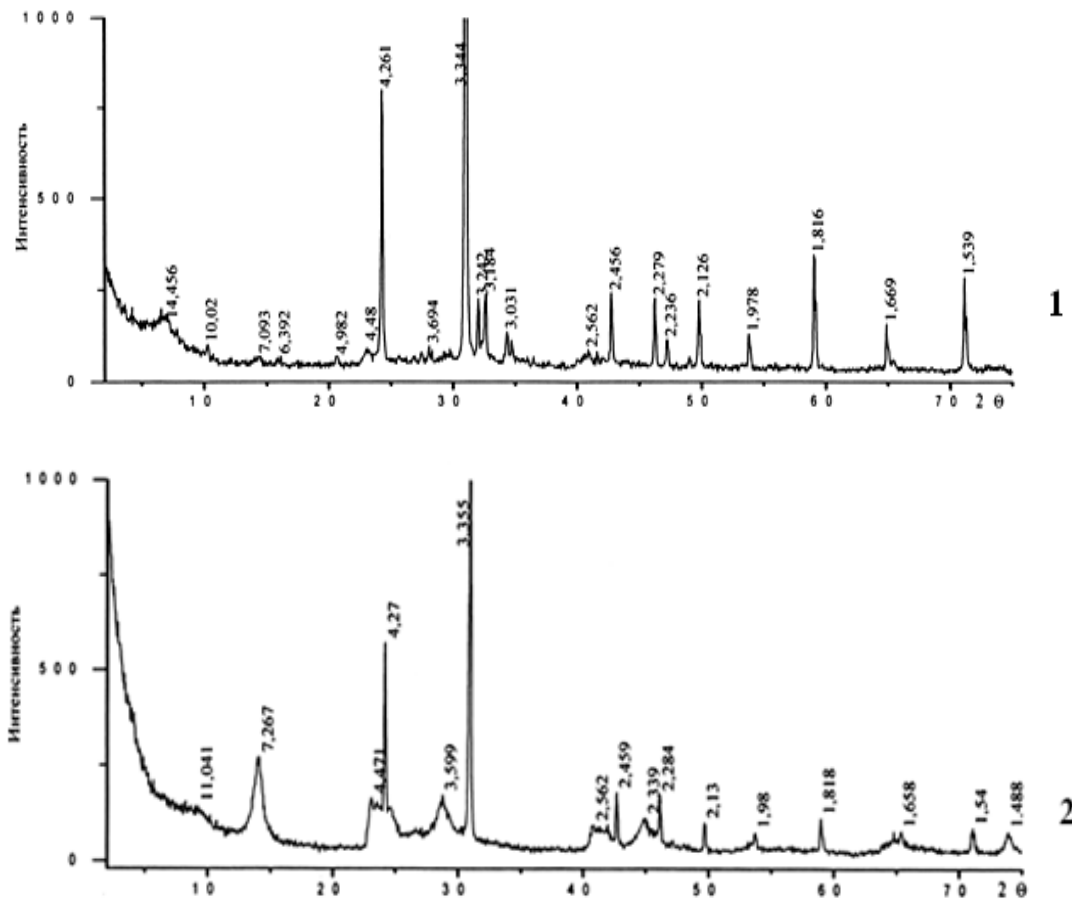
Для запобігання забруднення підземних і поверхневих вод у місцях складування відходів використовують методи, засновані на створенні техногенних геохімічних бар'єрів з матеріалів, які мають високі протифільтраційні показники та здатність до переведення забруднюючих компонентів у малорухомі форми. При цьому можливе використання природних матеріалів.

З метою вибору матеріалу для протифільтраційного екрану досліджувались природні глини Сумської області, які, крім низького коефіцієнта фільтрації, мають високі сорбційні властивості до важких металів [157]. Вивчались два сорти глинистих матеріалів, що найбільш відрізнялися як



за хімічним, так і за мінеральним складом. Перший - глина (Сумський район) з показниками хімічного складу (%):  $\text{SiO}_2$  –63,22;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 18,24;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 7,0;  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  –,67; з.п.п. –7,65. Другий – глина (Путивльський район Сумської області) з показниками хімічного складу (%):  $\text{SiO}_2$  –52,65;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 38,24;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 3,27;  $\text{CaO}$  – 2,02;  $\text{MgO}$  – 2,08; з.п.п. – 2,7.

З метою визначення фазового складу досліджуваних зразків проводили рентгенофазовий аналіз на рентгенівському дифрактометрі ДРОН - 1- УМ в кобальтово  $\text{K}\alpha$  – випромінюванні зі швидкістю 1 рад/хв. Дифрактограми вказаних зразків наведені на рис.5.2.



1 – глина Сумського району; 2 – глина Путивльського району Сумської області

Рисунок 5.2 – Дифрактограми природних глинистих мінералів

Дифрактограми свідчать, що зразок № 1 містить смектитові мінерали (серія рефлексів (d/n 14,983; 14,662; 14,456; 4,982; 4,48; 4,471), вміст яких  $\approx 12\%$ . Зразок № 2 характеризується вмістом мінералу каолініту (d/n 7,319; 7,267; 7,093; 4,471; 3,599; 2,562; 2,339; 1,981,658; 1,54; 1,488), вміст якого  $\approx 40\%$ . Крім зазначених мінералів, у глинах у великій кількості зустрічаються  $\alpha$ -кварц (до 50–70%) (серія рефлексів d/n 4.261; 3,349; 2,456; 2,281; 2,286; 2,128; 1,978; 1,816; 1,671; 1,657; 1,599; 1,54;), гідрослюди, польові шпати (до 10%), доломіт, кальцит, змішано-шарові силікати (до 5%).

Для оцінки сорбційної здатності глинистих матеріалів проводили дослідження з адсорбції іонів нікелю на установці, представленій на рис. 2.7.

Для встановлення діапазону режимних параметрів, за якими необхідно проводити дослідження процесів адсорбції, була виконана серія попередніх експериментів, що дало можливість зробити такі висновки:

1) коливання температури від  $+10$  до  $+30^\circ\text{C}$  не чинить помітного впливу на ступінь адсорбції іонів  $\text{Ni}^{2+}$  глинами;

2) оптимальним є масове співвідношення твердої та рідкої фази 1 : 20; при більшому розведенні знижується кількість адсорбованого  $\text{Ni}^{2+}$ , а менше співвідношення T : P, незважаючи на покращення результатів адсорбції, є нерациональним, оскільки вже при T : P = 1 : 7 спостерігається сильне загустіння пульпи, внаслідок чого ускладнюються процеси перемішування і подальшої фільтрації;

3) час контакту адсорбенту з розчином становить 20–30хв.

Для вивчення кінетики та механізму адсорбції поділили експеримент на два етапи. На першому етапі встановлювали залежність між адсорбційними здатностями глин і концентраціями модельних розчинів  $\text{NiSO}_4$  та вивчали ізотерми адсорбції. На другому – визначали ступінь інкорпорації іонів нікелю в структуру глинистих мінералів.

Результати експериментальних досліджень представлені на рисунку 5.3. Аналіз одержаних результатів дослідів доводить, що процес адсорбції

глинистими матеріалами іонів  $\text{Ni}^{2+}$  залежить як від складу глинистих мінералів, так і від особливостей адсорбату [158]. До складу адсорбенту 1 входять смектитові мінерали (монтморилоніт), який має будову шаруватих силікатів із розсувною структурною коміркою у кристалічній решітці. Присутність в адсорбенті саме таких складових забезпечує високі адсорбційні якості глини. Як видно з рисунка, показники адсорбції на даному адсорбенті перевищують аналогічні показники на адсорбенті 2 при всіх значеннях рівноважної концентрації іонів металу в розчині.

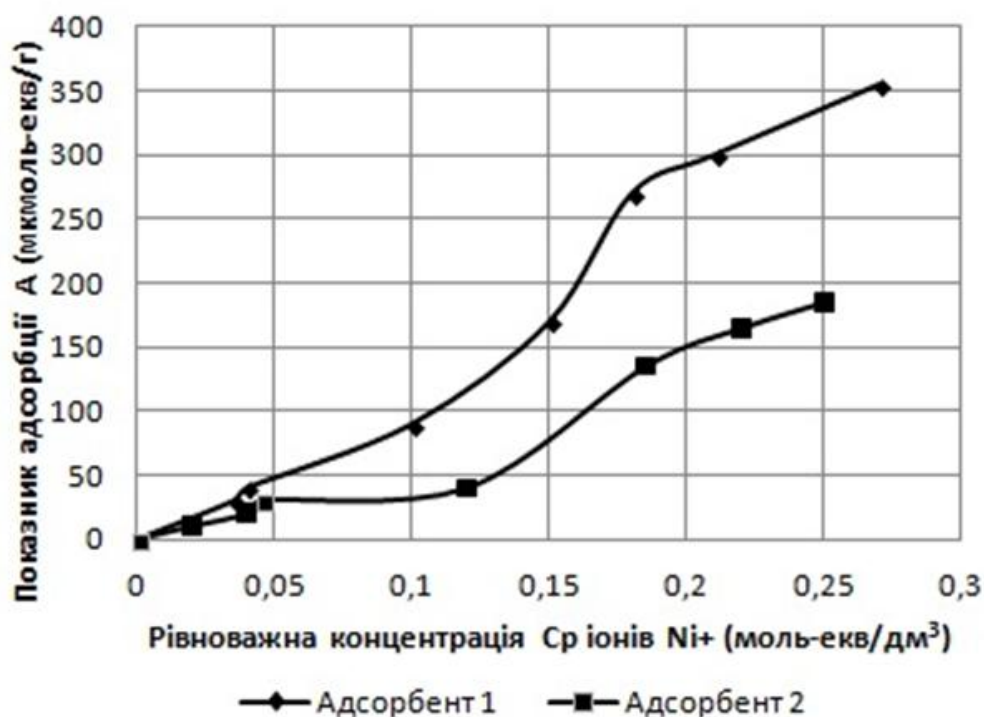


Рисунок 5.3 – Ізотерми адсорбції іонів  $\text{Ni}^{2+}$  різними адсорбентами

У той же час до складу адсорбенту 2 у значній мірі входять шаруваті силікати із жорсткою кристалічною структурою, до якої належить каолінит. Для таких структур характерна тільки зовнішня адсорбуюча поверхня. Крім зазначених мінералів, у глинах зустрічаються пісок, гідрослюди та карбонатні складові, що практично не беруть участі у процесах адсорбції. Згідно з прийнятою класифікацією [158], існує значна кількість основних типів ізотерм.

Крутизна ізоترم характеризує розмір мікропор сорбентів. Чим більшою кількістю розвиненої системи мікропор та ультрамікропор володіє сорбент, тим крутіша лінія ізотерми. На прикладі адсорбенту 1 (рис. 5.3) можна зробити висновок про наявність досить розвинутої системи мікропор, про що свідчить достатньо крута лінія ізотерми адсорбції. Пологість кривої адсорбції другого сорбента свідчить про те, що ізотерма належить перехідно-пористому чи макропористому сорбенту.

Для опису експериментальних даних застосовували рівняння ізотерми Фрейндліха:

$$a = \beta C^{1/n}, \quad (5.1)$$

де  $\beta$  і  $1/n$  – емпіричні коефіцієнти.

Для їх знаходження будували ізотерми адсорбції  $\text{Ni}^{2+}$  на різних зразках глини у логарифмічній залежності  $\lg a$  ( $\lg C$ ) (рис.5.4).

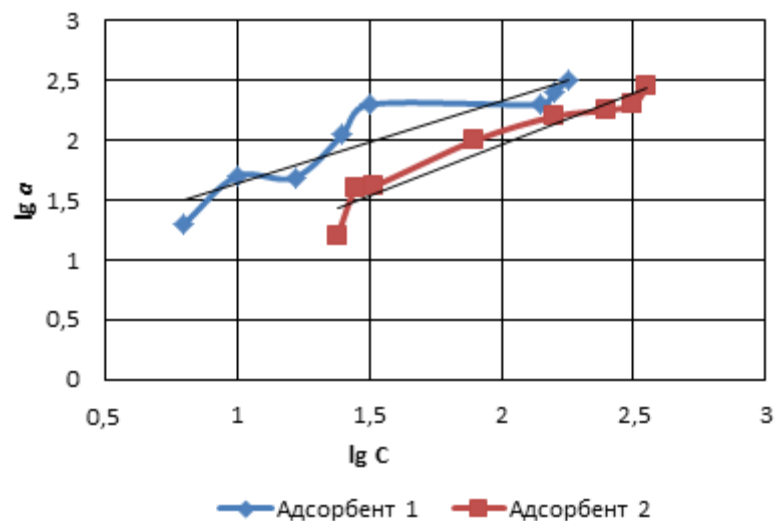


Рисунок 5.4 – Ізотерми адсорбції іонів  $\text{Ni}^{2+}$  на глинистих сорбентах у координатах рівняння Фрейндліха

У таблиці 5.1 представлені розраховані за допомогою методу найменших квадратів коефіцієнти рівняння Фрейндліха, а також коефіцієнт кореляції  $R^2$ .

Таблиця 5.1 – Коефіцієнти в рівнянні ізотерми Фрейндліха

Зразок адсорбенту	Коефіцієнти в рівнянні ізотерми Фрейндліха		
	$\beta$	$1/n$	$R^2$
Адсорбент 1	0,302	0,83	0,94
Адсорбент 2	0,922	0,7	0,88

Отримані дані свідчать, що процес адсорбції задовільно описується рівнянням Фрейндліха. Незважаючи на те, що рівняння Фрейндліха носить емпіричний характер і не містить чіткого фізичного змісту, саме рівняння Фрейндліха доцільно застосовувати для характеристики сорбційних процесів на глинистих мінералах. Це пов'язано із суттєвою енергетичною неоднорідністю поверхневих сорбційних центрів. Мірою енергетичної неоднорідності поверхні є коефіцієнт  $1/n$ : чим ближче значення даного коефіцієнта до одиниці, тим більш однорідною є поверхня. Як відомо, шарові силікати, які входять до складу різних видів глинистих мінералів та суглинків, мають два основні типи іонообмінних центрів [158]. Це – обмінні катіони, що зв'язані з нестехіометричними ізоморфними заміщеннями, що розташовуються на базальних поверхнях мінералів, а також розірвані кремне- або алюмоокисневі зв'язки, що локалізовані на бокових гранях. Аналіз коефіцієнтів  $1/n$  у рівняння Фрейндліха (табл. 5.1) дає можливість говорити про більшу неоднорідність поверхні зразка адсорбенту № 2. Це призводить в значній мірі до погіршення адсорбційних властивостей у адсорбенту № 2. Даний факт підтверджується і на простих ізотермах (рис.5.3), де крива ізотерми для адсорбенту 2 займає значно нижче положення порівняно із кривою ізотерми для адсорбенту 1.

З метою створення протифільтраційного екрана необхідно було встановити не тільки адсорбційну здатність глин, але і визначити ступінь входження іонів важких металів у структуру глинистих мінералів. Для цього були проведені дослідження десорбції іонів важких металів із забруднених глинистих матеріалів.

Для дослідження здатності глин до фіксації іонів важких металів використовували адсорбенти після контакту їх із модельними розчинами, які містили іони важких металів. Використаний адсорбент висушували в сушильній шафі при температурі  $+100^{\circ}\text{C}$  протягом 1 год. Наважку висушеного адсорбенту змішували з дистильованою водою із розрахунку Т:Р=1:20. Отриману суспензію перемішували протягом 30 хв. Після закінчення процесів десорбції розчин фільтрували крізь паперовий фільтр. Фільтрат аналізували на вміст важких металів. Результати показали повну відсутність іонів важких металів у фільтраті, що свідчить про входження їх іонів у структуру глинистих мінералів.

Таким чином, здатність місцевих глин поглинати і утримувати іони важких металів дозволяє рекомендувати глини Сумського району для створення протифільтраційного екрана золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ. Для ефективної захисної дії екрана товщина шару глини повинна бути не менше 0,5 м [159].

## **5.2 Розробка заходів щодо утилізації золошлакових відходів**

Найбільш доцільним рішенням екологічних та економічних проблем, пов'язаних із золошлаковими відходами, є їх подальше використання. Золошлаки, які утворюються при спалюванні вугілля, відносяться до 4 класу небезпеки з відсутністю небезпечних властивостей, тому можуть широко використовуватись у будівництві.

Досвід утилізації ЗШВ ТЕС в країнах Євросоюзу та США підтверджує високу ефективність їх використання в економічному та екологічному відношенні. Однак сьогодні частка використання ЗШВ в Україні дуже мала – близько 1%. Для порівняння, в США використовується близько 20% ЗШВ, Європейські країни, де дуже розвинений промисловий симбіоз, використовують близько 70% ЗШВ: у Великобританії – 60%, у ФРН – 72%, у Фінляндії – 84% [160].

В Україні розроблений ряд нормативних документів та проектів щодо використання золошлакових відходів. Зокрема, прийнято галузевий нормативний документ СОУ 42.1-37641918-104:2013 «Золи-виносу та суміші золошлакові теплових електростанцій для дорожніх робіт. Технічні умови».

З метою розробки пропозицій щодо використання золошлакових сумішей Сумської ТЕЦ у будівництві було проведено обстеження ЗШВ. Відбір проб золошлакових матеріалів проводився з глибини 0,1–0,4 м по периметру та з центру секцій накопичувача (рис. 5.6).



Рисунок 5.6 – Розташування точок відбору ЗШВ

Відібрані зразки золошлаків за зовнішнім виглядом представляють собою масу темно-сірого кольору.

Згідно наданої документації зразки золошлакових відходів, які утворились після спалювання вугілля на Сумській ТЕЦ, мають ефективну питому активність природних радіонуклідів  $A_{\text{еф}}=46$  Бк/кг, яка нижче допустимого нормативного рівня питомої активності природних радіонуклідів ( $A_{\text{еф}}$ ) у будівельних матеріалах та мінеральній будівельній сировині, яка відповідно до НРБУ-97 повинна становити не більше 370 Бк/кг. Тобто, вміст радіоактивних речовин у ЗШВ Сумської ТЕЦ дозволяє використовувати їх в будівництві.

Відібрані зразки ЗШВ були поділені на три групи:

- група №1 – золошлакова суміш з антицитового вугілля з розмірами частинок 0,16 – 40 мм;
- група №2 – золошлаковий пісок з розмірами частинок від 0,16 до 0,63 мм;
- група №3 – зола-винесення з розмірами частинок 0,08–0,16 мм.

Основні характеристики золошлакової суміші групи №1 наведені в табл. 5.2.

Об'ємна насипна маса золошлакової суміші групи №1 в сухому стані становить  $1238 \text{ кг/м}^3$ , в стані природної вологості становить  $1453 \text{ кг/м}^3$ . Природна вологість проби 15%.

Проведені дослідження показали, що матеріал групи №1 в кількості 23,5% по масі слід віднести до крупнорозмірного заповнювача (КРЗ), решта, 76,5% по масі, відноситься до шлакового піску. За класифікацією крупний заповнювач відноситься до середньо пористого з насипною густиною  $1050 \text{ кг/м}^3$ . При випробуванні на міцність КРЗ відноситься до групи середніх –  $8,6 \text{ кг/м}^2$ . За пористістю (порожнечі між зернами) КРЗ відноситься до групи малих. Втрати органічної складової при прожарюванні КРЗ становлять 7%.



Таблиця 5.2 – Характеристика золошлакової суміші групи №1

№№ сит, мм	Залишок на ситі, % по масі	Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>	Значення показників		
			Густина, кг/м <sup>3</sup>	Пористість, %	Водопогли- нання,%
40,0	0,7				
20,0	8,6	1049,5	1450	9	1,8
15,0	3,3	1047,5	1470	4	2,3
10,0	4,5	1069,5	1600	3,2	3,5
5,0	6,4	1121	1720	2,7	3,7
2,5	11	1096	Не нормується, модуль крупності піску $M_k = 1,71$		
1,25	4,9	1092			
0,63	10,2	1091,5			
0,315	7,6	1092,5			
0,16	11,8	965			
дно	31,1	1146			

Шлаковий пісок класифікується за густиною як пористий середньої групи. По групі зернового складу шлаковий пісок відноситься до дрібного. Насипна густина шлакового піску – 1100 кг/м<sup>3</sup>. За вмістом органічних домішок втрати при прожарюванні склали 13,6%.

Основні характеристики золошлакової суміші групи № 2 наведені в табл. 5.3. За характеристиками матеріал належить до шлакового піску.

Насипна густина золошлакової суміші в сухому стані становить 500 кг/м<sup>3</sup>, у стані природної вологості – 620 кг/м<sup>3</sup>. Природна вологість проби становить 18%. При прожарюванні матеріалу зразка № 2 частина вільного вуглецю склали 58,5%.

Таблиця 5.3 – Характеристика золошлакової суміші групи №2

№№ сита, мм	Залишок на ситі, % по масі	Насипна густина, кг/см <sup>3</sup>
0,63	0,4	781
0,315	1,8	746
0,16	69,8	757
дно	28	686

Основні характеристики золошлакової суміші групи № 3 наведені в табл. 5.4. За своїми характеристиками матеріал належать до золи винесення.

При прожарюванні матеріалу зразка з розміром частинок 80–100 мкм частина вільного вуглецю склала 62%.

Таблиця 5.4 – Характеристика золошлакової суміші групи №3

Показник	Розмір частинок, мкм	
	80-100	> 100
Вміст палива, що не згоріло, %	62	21
Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>	445	775
Середня насипна густина золи-винесення, кг/м <sup>3</sup>	615	

Проведені дослідження показали неоднорідний склад ЗШВ Сумської ТЕЦ. У відходах другої та третьої груп міститься велика кількість частинок палива, що не згоріло. Це вимагає проведення попередніх заходів з вилучення паливної складової.

Золошлакова суміш групи № 1, підлягає поділу на КРЗ та шлаковий пісок. Отриманий КРЗ можна використовувати у важких бетонах і в автодорожному будівництві. Шлаковий пісок можна використовувати при виробництві керамічної цегли.

Золошлакова суміш групи №2, в якій присутні 58,5% вугілля, що не згоріло, рекомендується використовувати для брикетування, із попереднім збагаченням будь-яким органічним паливним матеріалом. Можливе також використання суміші в якості шлакового піска в будівництві.

Матеріал групи № 3 підлягає поділу з метою вилучення частинок розміром 80–100 мкм з високим вмістом органічної складової, які будуть надходити на брикетування, з попереднім збагаченням будь-яким органічним паливним матеріалом.

Решту золи винесення після поділу можна використовувати у будівництві в якості часткової заміни (20–25%) цементів та пісків в бетонах і розчинах; пластифікатора в бетонних сумішах; добавок у вогнезахисних пастах; добавок при виробництві керамічної цегли; заповнювача при виробництві піно-газо-блоків; заповнювача у виробництві руберойду; заповнювача у виробництві теплоізоляційних матеріалів; добавок у виробництві жаростійких бетонів.

Таким чином, проведені дослідження ЗШВ Сумської ТЕЦ показали, що відходи є цінним ресурсом, який містить великий відсоток незгорівшого вугілля, що не згоріло. Після вилучення компонентів ЗШВ з високим вмістом органічної складової, можливе подальше використання відходів в будівництві [161, 162].

## **Висновки до розділу 5**

У результаті проведених досліджень теоретично обґрунтована та практично підтверджена можливість використання в якості матеріалів для улаштування захисних екранів місць складування ЗШВ місцевих глинистих матеріалів, які мають виокі сорбційні здатності стосовно важких металів.

Експериментально підібрані оптимальні параметри процесу сорбції іонів нікелю з модельних розчинів глинистими матеріалами (тривалість процесу перемішування – 30 хвилин, співвідношення в системі Р : Т = 20 : 1).

Аналіз ізотерм сорбції іонів  $\text{Ni}^{2+}$  на глинистих мінералах, із використанням модельних розчинів  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , який містив іонів  $\text{Ni}^{2+}$  від 0,025 моль-екв./л до 0,4 моль-екв./л, показав, що максимальні показники адсорбції не перевищують 10–11 мг іонів нікелю на 1 г адсорбенту.

Для опису отриманих експериментальних даних застосовували рівняння ізотерми Фрейндліха. Аналіз коефіцієнтів у рівнянні Фрейндліха дав можливість пояснити погіршення адсорбційних властивостей у адсорбенту № 2 неоднорідністю поверхні адсорбенту та відсутністю в його складі мінералів смектитової групи – монтморилоніту.

З метою вивчення ефективності процесів поглинання іонів  $\text{Ni}^{2+}$ , а також встановлення ступеня входження іонів у структуру глинистих мінералів були проведені дослідження з десорбції відпрацьованих сорбентів. Результати дозволяють стверджувати, що іони нікелю надійно затримуються у структурі мінералів. Здатність глин поглинати і утримувати іони важких металів дозволить використовувати їх в якості природних геохімічних бар'єрів.

З метою розробки пропозицій із використання золошлакових сумішей Сумської ТЕЦ у будівництві проведене обстеження ЗШВ, яке розкрило можливість використання відходів у будівництві.

Золошлакова суміш із високим вмістом вугілля, що не згоріло, рекомендується використовувати для брикетування, з попереднім збагаченням будь-яким органічним паливним матеріалом.

Основні результати опубліковані в таких роботах: [156, 157, 159, 161, 162].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-практичне питання моделювання техногенного впливу об'єктів теплоенергетики на гідросферу та розробки заходів щодо підвищення рівня екологічної безпеки в районах їх розташування.

1. З метою прогнозування техногенного впливу розглянуто та систематизовано фактори, які впливають на інфільтрацію та фільтрацію ЗР у зоні розташування об'єктів теплоенергетики.

2. Удосконалено математичні моделі профільної фільтрації та масоперенесення шляхом урахування зміни водонасичення ґрунту, що дає можливість враховувати надходження атмосферних опадів і талої води при інфільтрації ЗР у зоні аерації об'єктів теплоенергетики.

3. На основі методу скінченних елементів розроблені алгоритми чисельного рішення задач профільної фільтрації та масоперенесення ЗР, які дозволяють проводити розрахунки для широкого діапазону значень параметрів моделі, враховувати неоднорідність розрахункової області, довільну конфігурацію меж розповсюдження забруднювача та зміну в часі граничних умов.

4. Порівняння результатів рішення задачі фільтрації ЗР, отриманих у результаті моделювання, з результатами експериментальних досліджень, підтверджують адекватність математичної моделі. Відхилення становить 5 %.

5. Проведений розрахунок концентрації ЗР в умовах інфільтрації при змінному вологовмісті показав, що найбільша концентрація забруднювачів у зоні аерації об'єктів теплоенергетики спостерігається на глибині 20 см. Перевірка адекватності математичної моделі при перенесенні іонів  $Ni^{2+}$  в умовах інфільтрації показала відхилення в результатах розрахунку та експериментальних досліджень на рівні 5–7 %.

6. З метою визначення основних шляхів міграції ЗР в об'єкти

гідросфери проведені експериментальні дослідження снігового покриву та ґрунтів у зоні розташування теплоенергетичних об'єктів, які працюють на твердому паливі (на прикладі Сумської ТЕЦ). Виявлені перевищення фонових значень концентрацій важких металів у сніговому покриві в зоні аерації. Проведена оцінка забруднення ґрунтів за сумарним показником забруднення показала, що рівень забруднення ґрунтів у зоні аерації – припустимий, у зоні золовідвалу: для верхнього горизонту – середній, для нижнього – низький, що свідчить про комплексний вплив забруднення атмосферного повітря та міграції речовин із тіла золошлаконакопичувача.

7. Проведені дослідження підземних вод на ділянці золошлаконакопичувача виявили підвищений вміст у воді із спостережних свердловин хлоридів, сульфатів, натрію, заліза, що свідчить про вплив фільтрації вод із золовідвалу.

8. З метою попередження міграції ЗР із золошлаконакопичувача розглянуто можливість створення протифільтраційного екрана із місцевих глинистих матеріалів. Встановлено механізм адсорбції іонів  $Ni^{2+}$  на глинистих мінералах та розраховано коефіцієнти в рівнянні Фрейндліха. З метою вивчення ефективності процесів поглинання іонів  $Ni^{2+}$ , а також встановлення ступеня входження іонів у структуру глинистих мінералів були проведені дослідження з десорбції відпрацьованих сорбентів. Результати дозволяють стверджувати, що іони нікелю надійно затримуються у структурі мінералів. Здатність глин поглинати і утримувати іони важких металів дозволяє використовувати їх в якості протифільтраційних екранів.

9. З метою розробки пропозицій щодо використання золошлакових сумішей Сумської ТЕЦ у будівництві було проведене обстеження ЗШВ, яке показало можливість використання відходів в будівництві. Золошлакову суміш з високим вмістом вугілля, що не згоріло, рекомендується використовувати для брикетування із попереднім збагаченням будь-яким органічним паливим матеріалом, інші відходи використовувати в якості заповнювачів у будівництві.

### Список використаних джерел

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» від 15 березня 2006 р. № 145-р.
2. Кутовий В.О., Коновальчик М.В., Канюк Н.П. Золівідвали електростанцій як джерело забруднення довкілля. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту*. 2006. № 1(2). С. 90–94.
3. Крупская Л.Т., Старожилов В.Т. Геоэкология ландшафтов зоне влияния теплоэлектростанции: монография. Владивосток. 2009. С. 108.
4. Черенцова А.А. Оценка влияния золоотвала Хабаровской ТЭЦ-3 на компоненты окружающей среды. *Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ»*. 2012. Том 3. № 1. С. 29–42.
5. Бариева Э.Р., Королев Э.А., Галимуллина Н.Х. и др. Оценка экологической опасности золошлаковых отходов Казанской ТЭЦ-2. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2008. № 5–6. С. 108–111.
6. Миленка М.М. Аеротехногенне забруднення довкілля викидами Бурштинської теплоелектростанції. *Сучасні екологічні проблеми та молодь-IV: матер. міжсвзівської наукової конференції, 25-26 листопада 2008 р. Запоріжжя*. 2008. Ч. V. С. 5–6.
7. Зверева В.П., Крупская Л.Т. Оценка влияния золоотвалов теплоэлектростанций на объекты окружающей среды (на юге Дальнего Востока). *Материалы Международного Форума горняков-2012. Днепропетровск*. 2012. Том 1. С. 154–161.
8. Белявский Г.А., Варламов Г.Б., Гетьман В.В. и др. Оценка воздействия объектов энергетики на окружающую среду. Харків. 2002. С. 369.
9. Прибилова В.М., Жемерова В.О., Решетов І.К. Особливості накопичення забруднювачів в зоні впливу Змієвської ТЕС. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна: Геологія-географія-екологія*.

2010. № 882. С. 62–67.

10. Рихтер Л.А. Охрана водного и воздушного бассейна от выбросов ТЭС. М.: Энергоиздат. 1981. С. 296.

11. Нечаєва Т.П., Шульженко С.В., Сас Д.П., Прасюк М.В. Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. №18. С. 54–60.

12. Свояк Н.І. Проведення екологічної оцінки об'єктів теплоенергетики малих та середніх потужностей. *Вісник ЧДТУ*. 2009. №3. С. 107–111.

13. Gang Xu, Yong-ping Yang, Shi-yuan Lu, Le Li, Xiaona Son. Comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on grey relational analysis and analytic hierarchy process. *Energy Policy*. 2011. 39. P.2343–2351.

14. Xiaoyu Liu, Zongguo Wen. Best available techniques and pollution control: a case study on China's thermal power industry. *Journal of Cleaner Production*. 2012. 23. P.113–121.

15. Кошлак Г. В. Розвиток наукових основ утилізації відходів теплових електричних станцій для зменшення техногенного навантаження на довкілля: дис. на здобуття наукового ступ. доктора техн. наук за спеціальностями: 21.06.01 ; 05.14.06 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, 2016р. 291 с.

16. Бочкарев В.А., Бочкарева А.В. Анализ влияния качества топлива на экологические показатели котельных агрегатов малой мощности в Иркутской области. *Вестник ИрГТУ*. 2016. т. 20. №11. С. 119–126.

17. Ковальчук О.П., Снітинський В.В., Шкумбатюк Р.С. Моніторинг вмісту важких металів у ґрунтах територій, прилеглих до Добротвірської ТЕЦ. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. т. 27. № 4. С. 87–90.

18. Ермаков А.А., Карпова Е.А., Малышева А.Г., Михайлова Р.И., Рыжова И.Н. Мониторинг содержания тяжелых металлов и элементов в снеговом покрове почвы сельскохозяйственного назначения Московской области. *Гигиена и санитария*. 2015. №5. С. 31–36.



19. Демиденко Г.А. Влияние золоотвала Красноярской ТЭЦ-1 на снежный покров прилегающей территории. *Вестник КрасГАУ*. 2015. №9. С. 88–91.
20. Гарманова Т.В., Ларина Н.С. Мониторинг загрязнения снежного покрова пылеаэрозолями в городе Тюмень. *Вестник Тюменского государственного университета*. 2012. № 7. С. 55–62.
21. Шайхутдинова А.А., Чекмарева О.В., Маркова О.С. Оценка экологического состояния снежного покрова территории, прилегающей к Сакмарской ТЭЦ г. Оренбурга. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2017. № 2(163). С. 89–94.
22. Овсейчук В.А., Мамаш Е.А., Сидорова Г.П. Мониторинг состояния окружающей среды в районе Краснокаменской ТЭЦ. *Вестник ЗабГУ*. 2013. №11 (102). С. 28–36.
23. Singh R.K., Gupta N.C., Guha B.K. The leaching characteristics of trace elements in coal fly ash and an ash disposal system of thermal power plants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental*. 2012. 34. P.602–608.
24. Kanmani S., Gandhimathi R. Assessment of heavy metal contamination in soil due to leachate migration from an open dumping site. *Applied Water Science*. 2013. 3. P. 193–205.
25. Усманова Л.И., Усманов М.Т. Влияние золоотвалов Читинских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 на природные воды прилегающих территорий. *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле*. 2010. № 2. №16. С. 167–178.
26. Ніколаєва І.О. Екологічний аудит промислових хвостосховищ із застосуванням контрольних списків як передумова підвищення їх екологічної безпеки: дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук: 21.06.01 / Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління. Київ, 2017. 204 с.
27. Чобан А.Ф., Чобан С.Я. Оцінка впливу стічних вод ТЕС на природні водні об'єкти. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2008. №4. С. 52–58.

28. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. Москва. 1992. С. 240.
29. Янчев В.К., Сулейманов С.П. Оценка степени загрязнения природных вод вблизи крупных теплоэнергетических комплексов. *Водные ресурсы*. 1992. №1. С.162–165.
30. Гольберг В. М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Ленинград. 1987. С. 248.
31. Ayodhya D. Kshirsagar. Use of Algae as a Bioindicator to Determine Water Quality of River Mula from Pune City, Maharashtra (India). *Universal Journal of Environmental Research and Technology*. 2013. № 3. P.79–85.
32. Sophia Barinova, Tatjana Chekryzheva. Phytoplankton dynamic and bioindication in the Kondopoga Bay, Lake Onego (Northern Russia). *Journal of Limnology*. 2014. 73(2). P. 282–297.
33. Войтюк Ю.Ю., Курасва І.В., Манічев В.Й., Філатов В.Ф. Закономірності розподілу важких металів у ґрунтах зони впливу ДМК ім. Ф.Е. Дзержинського. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2013. №13 (частина II). С. 103 –117.
34. Якимчук, Р. А. Цитогенетична оцінка мутагенного впливу на кореневу меристему *Triticum Aestivum* забруднень територій, прилеглих до теплових електростанцій. *Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія біологія*. 2015. №1(34). С. 62–70.
35. Войтюк В.В. Поглинання важких металів із ґрунту рослинністю зони техногенезу. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія :геологія, географія*. 2016. №24(2). С. 11–17.
36. Бортнік Л. М. Екологічна оцінка урболандшафтів за вмістом важких металів у системі ґрунт – рослина (на прикладі міста Харкова): автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. біолог. наук: 03.00.16 / . Дніпропетровський державний університет. Дніпропетровськ, 1999, 20с.
37. Зайцева В.Н., Гусев В.Ф., Немеришина О.Н. К вопросу содержания

микроэлементов в наземных органах *Fragaria viridis* (Duch.) Weston Оренбургского Предуралья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2010. №1(33). С. 230-232.

38. Куриленко В.В., Осмоловская Н.Г., Максимова Д.А., Докучаева Л.Н. Геоэкологическая характеристика Кронштадта и оценка загрязненности его территории тяжелыми металлами . *Вестник СПбГУ. Сер. 7*. 2015. № 2. С. 107–124.

39. М'якаєва Г. М. Фактори впливу на інтенсивність забруднення підземних вод. *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 19–22 квітня 2016 р.: у 2-х ч.* 2016. Ч.2. С. 48.

40. Заносова В.И. К методологии эколого-гидрогеологических оценок состояния территорий. *Ползуновский вестник*. 2011. № 4–2. С. 11-14.

41. Бракоренко Н.Н., Леонова А.В., Никитенков А.Н., Крамаренко В.В., Пуртова Е.С., Мерзлякова М.В. К проблеме оценки защищенности подземных вод от загрязнения (на примере кустового нефтяного месторождения, ХМАО). *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. №5(59), часть 2. С. 162–166.

42. Пасмарнова С.П., Панарин П.А.. Оценка защищенности от загрязнения подземных вод центральной части Тамбовской области. *Вестник ВГУ*. 2011. №1. С. 227–230.

43. Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н.. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. Киев. 2007. С. 120.

44. Волошин П.К. Оцінка природної захищеності та уразливості підземних вод території Львова від антропогенного забруднення. *Вісник Львівського університету. Серія географія*. 2012. вип. 40, ч. 1. С. 149–155.

45. Кошляков О.Є., Диняк О.В., Кошлякова І.Є.. До питання вразливості питних підземних вод в межах Київської міської агломерації з

врахуванням природної захищеності. *Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*. 2014. Т.19, вип. 3. С. 269–275.

46. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. Москва. 1984. С. 266.

47. Методические рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод. сост. Гольдберг В.М. Москва. 1980. С. 46.

48. Варданян В.П., Агинян А.О. Особенности оценки естественной защищенности водоносных горизонтов. *Ученые записки Ереванского государственного университета*. 2008. № 3. С. 142–147.

49. Питьева К. Е. Гидрогеохимия. М.: МГУ. 1988. С. 431.

50. Aller, L., Lehr, J.H., Petty, R. and Bennett, T. DRASTIC—A Standardized System to Evaluate Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. *Journal of the Geological Society of India*. 1987. № 29. С. 23–37.

51. Ємчук Т.В. Оцінка захищеності підземних вод: методологічні аспекти і практичне застосування. *Гідрологія, гідрохімія і гідро екологія*. 2011. Т.1(22) С. 45–50.

52. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М. Програми для прогнозування забруднення підземних вод. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екологічної безпеки», 6-8 жовтня, Кременчук*. 2015. С. 38.

53. Зекцер И.С., Каримова О.А., Бужуоли Ж., Буччи М.. Региональная оценка уязвимости пресных подземных вод: методологические аспекты практического применения. *Водные ресурсы*. 2004. Т.31, №6. С. 645–650.

54. Мокієнко В.І., Мокієнко О.В. Оцінка зміни поля напорів ґрунтових вод лівобережної частини м. Києва під впливом антропогенних факторів з застосуванням гідрогеологічного моделювання та ГІС-технологій. *Вісник Харківського національного університету ім. Каразіна. Серія: Геологія-Географія-Екологія, Харків*. 2010. № 924. С. 56–61.

55. Аксьом О.С. Оцінка природної захищеності підземних вод Уманського дендропарку «Софіївка» засобами ARCGIS 8.1. *Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка*. 2006. №38–39. С. 29–32.
56. Яцишин А.В., Попов О.О., Артемчук В.О. Використання інформаційних технологій в задачах управління екологічною безпекою. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2013. вип. 2(41). С. 289–294.
57. Кисіль Н.М. Теоретичні засади організації екологічного моніторингу в Україні за умов сталого розвитку. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2005. Вип. 15(4). С. 208–212.
58. Каменева І.П., Яцишин А.В., Полішко Д.О., Попов О.О. Комплексний аналіз екологічної безпеки міста на основі сучасних ГІС-технологій. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2008. Вип. 5. С. 41–46.
59. Артемчук В.А., Грибан О.А. Информационно-аналитическая система эколого-энергетического мониторинга. *Моделювання та інформаційні технології*. 2010. Спецвипуск Т. 1. С. 120–128.
60. Шелковська І.М.. Структурно-функціональна модель геоінформаційного моніторингу земель адміністративних територій. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2014. Випуск 6(89), Ч. 1. С. 171–177.
61. Лобода Ю.Г., Орлова О.Ю. Використання інформаційних технологій для моніторингу та захисту довкілля. *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. Вип. 46(1). С. 244–247.
62. Карпінський Ю.О., Лященко А.А. Інфраструктура геопросторових даних: принципи та методика формування базового набору геопросторових даних. *Вісник Криворізького технічного університету*. 2004. Вип. 3. С. 72–77.
63. Зацерковний В.І. Аналіз моделей інтеграції технологій ГІС, ДЗЗ, GPS в задачах моніторингу стану навколишнього середовища. *Математичні машини і системи*. 2014. № 4. С. 44–52.
64. Добровольский Г. В. Почва, город, экология. Москва, 1997. С. 320.

65. Кундас С. П., Гишкелюк И. А. Перспективы применения методов компьютерного моделирования для анализа и прогнозирования миграции радионуклидов в окружающей среде. *Чернобыль 20 лет спустя: Стратегия восстановления и устойчивого развития пострадавших регионов: материалы Международной конференции*, Минск, 19–21 апр. 2006. С. 82–87.
66. Пачепский Я. А. Математические модели физико-химических процессов в почвах. Москва, 1990. 180 с.
67. Бровка Г. П. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании. Минск, 1991. С. 191.
68. Abbasi F. [et al.] Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis. *Journal of Irrigation and Drainage*. 2003. No. 129. Vol. 2. P. 71–81.
69. Кундас С. П., Гишкелюк И. А., Коваленко В. И., Хилько О. С. под общ. ред. Кундаса С. П. Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах. Минск, 2011. С. 212.
70. Мироненко В.А. Решение задач охраны подземных вод на численных моделях. Москва, 1992. С. 240.
71. Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадковская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. Москва, 1979. С. 254.
72. Лаврик В. І. Методи математичного моделювання в екології. Київ. 2002. С. 204.
73. Лаврик В. И., Никифорович Н. А. Математическое моделирование в гидроэкологических исследованиях. Киев. 1998. С. 287
74. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. Москва, 1976. С. 68–71.
75. Фрид Ж. Загрязнение подземных вод. Москва, 1981. С. 304.
76. Бровка Г. П. Расчет конвективного переноса водорастворимых соединений с учетом кинетики сорбции. *Инженерно-физический журнал*. 2001. Т. 74, № 3. С. 25–29.

77. Ляшко И.И., Демченко Л.И., Мистецкий Г.Е. Численное решение задач тепло- и массопереноса в пористых средах. Киев, 1991. С. 29–33.
78. Harbaugh A. W., McDonald M. G. Programmer's Documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model . *U.S. Geological Survey*. 1996. P. 228.
79. Павловский Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения. Собрание сочинений. 1956. Том 2 (Движение грунтовых вод). С. 420.
80. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. Москва, 2006. С. 488
81. Данилов В. Л, Кац Р. М. Гидродинамические расчеты взаимного вытеснения жидкостей в пористой среде. Москва, 1980. С. 264
82. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. Москва, 1984. С. 232.
83. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. Москва, 1996. С. 447.
84. Розенберг М. Д., Кундин С. А. Многофазная многокомпонентная фильтрация при добыче нефти и газа. Москва, 1976. С. 335.
85. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. Ленинград, 1985. С. 240.
86. Эфрос Д. А. Исследование фильтрации неоднородных систем. Москва, 1963. С. 351.
87. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Москва, 1937. Пер. с англ.; Москва, 1949. С. 628.
88. Шейдеггер А. М. Физика течения жидкостей через пористые среды. Москва, 1960. Пер. с англ. С. 249
89. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. Москва, 1964. С. 350.

90. Азиз Х., Сеттари Э. Математическая моделирование пластовых систем. Москва, 1982. С. 407.
91. Лаврик В. И. Решение задачи массопереноса водорастворимых веществ в случае зависимости коэффициентов конвективной диффузии от скорости фильтрации. Препринт 81.18. Киев. 1981. С. 3–24.
92. Лаврик В. И., Никифорович Н. А. Вопросы математического моделирования процессов самоочищения подземных и поверхностных вод. *Гидромеханика*. 1994. Вып. 68. С. 36–40
93. Олійник А. П., Штаєр Л.О., Клапоушак О.І. Математичне моделювання фільтраційних процесів в задачах оцінки рівня та якості ґрунтових вод. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2013. №1/4 (61). С. 15–18.
94. Олійник А.П., Панчук М.В. Математическое моделирование нестационарной фильтрации с целью оценки физико-механических свойств грунтов в зоне трубопровода. *Сборник материалов XI Межвузовской школы-семинара «Методы и средства технической диагностики»*, Ивано-Франковск. 1992. С.137–140.
95. Олійник А.П., Мороз А.А. Обернена задача дифузії при моделюванні поширення шкідливих речовин на об'єктах нафтогазового комплексу. *Вестник ХНТУ*. 2015. № 3(54). С. 422–427
96. Олійник А.П., Мороз А.А. Математичне моделювання процесів забруднення ґрунтів як результату технологічних процесів. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015. №1/4 (73). С. 4–9.
97. Шестаков В. М. Гидрогеодинамика. Москва, 1995. С. 368.
98. Олейник А. Я, Киселев С. К. Гидродинамическая модель фильтрования при очистке подземных вод от соединений железа. *Прикладна гідромеханіка*. 1999. №1(73). С.20–25.



99. Климюк Ю.Є. Математичне моделювання процесу масоперенесення багатокомпонентних забруднюючих речовин у двошарових пористих середовищах. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. 2015. вип. 3(71), Ч.2. С. 401–407.
100. Власюк А., Цветкова Т. Математичне моделювання процесу солепереносу при фільтрації та волого переносі в насичено-ненасиченому ґрунтовому масиві за наявності рухомої вільної поверхні. *Вісник ТНТУ*. 2014. №2(74). С.209–222.
101. Абрамов И. Б. Оценка воздействия на подземные воды промышленно-городских агломераций. Харьков, 2007. С. 285.
102. Rubin Y., Cuchey M.A., Bellin A. Modeling of transport in groundwater for environmental risk assessment. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*. 1994. Vol.8, №1. P. 57–77
103. Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. Москва, 1971. С. 451.
104. Веригин Н. Н., Васильев С. В., Куранов Н. П. и др. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод. Москва, 1979. С. 336.
105. Веригин Н. Н., Шержуков Б. С. К методике расчета растворения и выноса солей в основаниях гидротехнических сооружений. *ВНИИГ*. 1970. Вып.48. С.263–277.
106. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. Москва, 1977. С. 664.
107. Сергиенко И.В., Скопецкий В.В., Дейнека В.С. Математическое моделирование и исследование процессов в неоднородных средах. Киев, 1991. С. 27–31.
108. Бойко Т.В., Абрамова А.О., Запорожець Ю.А. Математичне моделювання міграції забруднюючих речовин у ґрунтах. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. №6/4(66). С. 14–16.

109. Бойко Т.В., Запорожець Ю.А. Моделирование массопереноса загрязняющих веществ в почвенном слое. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 1/3(21). С. 8–11.
110. Толпаев В.А. Уравнение нелинейной фильтрации в анизотропных средах. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион*. 2003. № 7. С. 7–18.
111. Destouni G., Sassner M., Jensen K.H. Chloride migration in heterogeneous soil: 2. *Stochastic modeling*. *Water Research*. 1994. Vol30, N 3. P.747-758.
112. Добровольский Г. В. Почва, город, экология. Москва, 1997. С. 320.
113. Беляев А. Ю., Юшманов И. О. Влияние гистерезиса сорбции на пространственное распределение загрязняющих веществ в грунте. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2008. Т.6. С. 61–72.
114. Конюхов В. М., Храмченков М. Г., Чекалин А. Н. Фильтрационно-диффузионная модель миграции рассолов в неоднородных водоносных пластах. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2004. Т.2. С. 140–151.
115. Battiato I. and Tartakovsky D. M. Applicability regimes for macroscopic models of reactive transport in porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2011. Vol. 120–121. P. 18–26.
116. Сербина Л.И., Вендина А.А. Асимптотический метод решения дробного уравнения миграции загрязнения подземных вод. *Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия*. 2011. Т.5. С. 104–108.
117. Соболева Е.Б. Метод численного исследования динамики соленой воды в почве. *Математическое моделирование*. 2014. Т. 26(№2). С. 50–64.
118. Шандиба О.Б., Варламов М.К., Мартиненко О.П. Борозенець Н.С. Екологічний моніторинг міграції хімічних речовин на забруднених територіях. *Вісник СДАУ, серія «Механізація та автоматизація технологічних процесів»*. 2000. №5 .С. 69–71
119. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в

Сумській області у 2016 році. URL:  
<http://www.menr.gov.ua/dopovidi/regionalni/5560-rehionalni-dopovidi-pro-stan-navkolysnogo-pryrodnoho-seredovyscha-u-2016-rotsi>

120. Екологічний паспорт Сумської області станом на 01.01.2017. Департамент екології, паливно-енергетичного комплексу та природних ресурсів Сумської обласної державної адміністрації. Суми, 2017. 177 с.

121. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М., М'якаєв О.В. Моніторинг підземних вод в районі розміщення Сумської ТЕЦ. *Екологічна безпека.: Розробка та експлуатація систем екологічного моніторингу*. 2016. № 2(22). С. 29–34.

122. Войтюк Ю.Ю. Закономірності розподілу важких металів в об'єктах навколишнього середовища м. Суми. *Вісник Дніпропетровського університету. Геологія, географія*. 2016. №24, Ч. 2. С.18–23.

123. Моніторинг стану підземних вод на території діяльності ТОВ «Сумитеплоенерго»: заключний звіт з НДР. ТОВ «СВНЦ Інтеллект-сервіс». Харків, 2017. 32 с.

124. Ягодин Б.А., Виноградова С.Б., Говорина В.В. Кадмий в системі ґрунт-растіння-животні організми і людина. *Агрохімія*. 1989. №5. С. 118–129.

125. Аринушкіна Е. В. Руководство по химическому анализу почв. Москва, 1970. С. 488.

126. МР 5174-90. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. Москва, 1990. С. 15.

127. Охорона навколишнього природного середовища та раціональне використання природних ресурсів. Якість довкілля. Відбір проб ґрунтів та відходів при здійсненні хіміко-аналітичного контролю просторового (загального і локального) забруднення об'єктів навколишнього природного середовища в районах впливу промислових, сільськогосподарських, господарсько-побутових і транспортних джерел забруднення: інструкція. Київ :

Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, 2005. 24 с. Чинна від 2005-03-01.

128. ДСТУ ISO 10381 – 1: 2002. – ISO 10381-1:2002. Якість ґрунту. Відбір проб. Частина 1. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 38 с.

129. ГОСТ 17.4.4.02–84. – Утв. МЗ ССРСР от 19 декабря 1984 г. – № 4731. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Москва: Издательство стандартов, 1984. 8 с.

130. ДСТУ ISO 10390. Якість ґрунту. Визначення рН. Чинний від 2009-10-01. Київ: Держспоживстандарт України, 2012. 4 с.

131. Гурець Г.М., Пляцук Л.Д. Моніторинг підземних вод в районі золовідвалу Сумської ТЕЦ. *Сучасні технології в промисловому виробництві. Матеріали та програма III Всеукраїнської міжвузівської конференції (Суми, 22-24 квітня 2014 р.)*. 2014. Ч. 2. С. 34–35.

132. ДержСанПіН 2.2.4-171-10 “Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної до споживання людиною”, затвердж. наказом № 400 МОЗ України від 12.05.2010.

133. СанПіН № 4630-88 “Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения”, утвржд. МОЗ ССРСР, 04.07.1988. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=v4630400-88>.

134. Программный пакет Crystallographica Search–Match. Oxford Cryosystems. Software for research, teaching and powder pattern analysis. URL: <http://www.oxcryo.com/-software/crystallographica/>

135. Новицкий П. В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. 1985. С. 248.

136. Пляцук Л.Д., М’якаєва Г.М., М’якаєв О.В. Прогнозування забруднення підземних вод в районі Сумської ТЕЦ. *Міжнародна науково-практична конференція «ЕКОГЕОФОРУМ-2017. Актуальні проблеми та інновації»*, Івано-Франківськ, 22-25 березня. 2017 р. С.304–305

137. Kinzelbach W. Groudwater modelling. An introduction with sample programs in basic. Developments in water science. Amsterdam, 1986. p.333.

138. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М., М'якаєв О.В. Математичне моделювання фільтрації забруднюючих речовин в місцях розташування золошлаконакопичувачів теплоелектростанцій. *Sciences Of Europe*. 2018. № 26. С. 28–33

139. Бирюков Н.С., Казарновский В.Д., Мотылев Ю.Л. Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов. М., "Недра", 1975. 176 с.

140. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М., М'якаєв О.В. Оцінка захищеності підземних вод в районі розташування Сумської ТЕЦ. *Екологічна безпека: Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля*. 2017. №2(24). С.59–63

141. Пляцук Л.Д., Гурець Г.М. Оцінка впливу золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ на підземні води. *Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Ресурсозбереження і хіміко-екологічні проблеми технологічних процесів»*, м. Харків, 10-12 листопада 2014 р. С. 174–175

142. Pliatsuk L., Hurets L., Miakaieva H., Miakaiev O. Assessing the impact of Sumy CHP on soil. *Environmental Problems*. 2017. Vol. 2, No. 2. P. 58–64.

143. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях. Москва, 1989. С. 440.

144. М'якаєва Г.М. Біомоніторинг ґрунтів в зоні розміщення Сумської ТЕЦ. *Матеріали V Міжнародної наукової конференції молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування»*, м. Харків, 29-30 листопада 2017 р. С. 17.

145. Авессаломова И.А. Экологическая оценка ландшафтов. Москва, 1992. С. 89.

146. Минкина Т.М., Бурачевская М.В., Чаплыгин В.А. Накопление

тяжелых металлов в системе почва-растение в условиях загрязнения. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. Т.4. С. 9–12.

147. М'якаєва Г.М. Вплив Сумської ТЕЦ на екологічний стан прилеглих територій. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* 2017. № 53(1274). С.124–131.

148. М'якаєва Г.М. Вплив Сумської ТЕЦ на довкілля. *Семінар «Сталий розвиток - погляд у майбутнє» кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка», м. Львів, 15 вересня 2017 р.* С. 14.

149. Моніторинг стану підземних вод на території діяльності ТОВ «Сумитеплоенерго»: заключний звіт з НДР, ТОВ «СВНЦ Інтелект-сервіс». – Харків, 2009. 21 с.

150. Моніторинг стану підземних вод на території діяльності ТОВ «Сумитеплоенерго»: заключний звіт з НДР, ТОВ «СВНЦ Інтелект-сервіс». – Харків, 2011. 31 с.

151. Моніторинг стану підземних вод на території діяльності ТОВ «Сумитеплоенерго»: заключний звіт з НДР, ТОВ «СВНЦ Інтелект-сервіс». – Харків, 2012. 20 с.

152. Моніторинг стану підземних вод на території діяльності ТОВ «Сумитеплоенерго»: заключний звіт з НДР, ТОВ «СВНЦ Інтелект-сервіс». – Харків, 2013. 32 с.

153. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Вплив золовідвала Сумської ТЕЦ на гідросферу. *Матеріали IV Міжнародного конгресу «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 21–23 вересня, Національний університет «Львівська політехніка», 2016 р.* С. 46.

154. ДСТУ ISO 14001:2006. Системи екологічного керування. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 23 с.

155. ДСТУ ISO 14004:2006 Системи екологічного управління. Загальні настанови щодо принципів, систем та засобів забезпечення. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 44 с.

156. Гурець Л.Л., Козій І.С., М'якаєва Г.М. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of Engineering Sciences*. Vol. 4, Iss. 2. 2017. pp. G12–G16.

157. Большаніна С.Б., Гурець Г.М., Балабуха Д.С., Міляєва Д.В. Очищення стічних вод гальванічних виробництв сорбційними методами. *Екологічна безпека*. №17. 2014. С. 114–118.

158. Мальований М.С., Петрушка І.М. Очищення стічних вод природними дисперсними сорбентами: монографія. Львів, 2012. 180 с.

159. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М., М'якаєв О.В. Зниження впливу золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ на гідросферу. *Вісник НТУ «ХПІ»: Нові рішення в сучасних технологіях*. № 9 (1285). 2018. С. 230–235

160. Энтин З. Б., Нефедова Л. С., Стржалковская Н. В. Золоы ТЭС — сырье для цемента и бетона. *Цемент и его применение*. № 2. 2012. С. 40–46.

161. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Переробка відходів газоочищення ТЕЦ. *Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту «Технічних систем та енергоефективних технологій» «Сучасні технології у промисловому виробництві»*, Сумський державний університет, м. Суми, 18-21 квітня 2017 р. С.136.

162. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Методи утилізації золошлакових відходів Сумської ТЕЦ. *Матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві»*, м. Суми, 17-20 квітня 2018 р., С. 181.

**ДОДАТКИ**



## Додаток А

### Список публікацій здобувача

#### Наукові праці, в яких опубліковані наукові результати дисертації

1. Pliatsuk L.D., Hurets L.L., Miakaieva H.M., Miakaiev O.V.. Assessing the impact of Sumy CHP on soil. *Environmental Problems*. 2017. Vol. 2, No. 2. P. 58-64.
2. Hurets L. L., Kozii I. S., Miakaieva H. M. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises. *Journal of Engineering Sciences*. 2017. Vol. 4. Issue 2., P. G12–G16.
3. Пляцук Л. Д., М'якаєва Г. М., М'якаєв О. В. Моніторинг підземних вод в районі розміщення Сумської ТЕЦ. *Екологічна безпека.: Розробка та експлуатація систем екологічного моніторингу*. 2016. №2(22). С. 29–34.
4. М'якаєва Г.М. Вплив Сумської ТЕЦ на екологічний стан прилеглих територій. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2017. № 53(1274). С.124–131.
5. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М., М'якаєв О.В. Оцінка захищеності підземних вод в районі розташування Сумської ТЕЦ. *Екологічна безпека: Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля*. 2017. №2(24). С.59–63.
6. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М., М'якаєв О.В. Зниження впливу золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ на гідросферу. *Вісник НТУ «ХПІ»: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2018. № 9(1285). С. 230–235.
7. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М., М'якаєв О.В. Математичне моделювання фільтрації забруднюючих речовин в місцях розташування золошлаконакопичувачів теплоелектростанцій. *Sciences Of Europe*. 2018. № 26. С. 28–33.
8. Большаніна С.Б., Гурець Г.М., Балабуха Д.С, Міляєва Д.В. Очищення стічних вод гальванічних виробництв сорбційними методами. *Екологічна*

*безпека*. 2014. 1(17). С. 114–118.

### **Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації**

9. Пляцук Л.Д., Гурець Г.М. Моніторинг підземних вод в районі золовідвалу Сумської ТЕЦ. *III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві» (Суми, 22-25 квітня 2014)*. Суми, 2014. С. 34–35.

10. Пляцук Л.Д., Гурець Г.М. Оцінка впливу золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ на підземні води. *I Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Ресурсозбереження і хіміко-екологічні проблеми технологічних процесів» (Харків, 10-12 листопада 2014)*. Харків, 2014. С. 174–175

11. М'якаєва, Г.М. Фактори впливу на інтенсивність забруднення підземних вод. *Сучасні технології у промисловому виробництві: IV Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 19-22 квітня 2016)*. Суми, 2016. С. 48.

12. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М. Програми для прогнозування забруднення підземних вод. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екологічної безпеки»(Кременчук, 6-8 жовтня 2015)*. Кременчук, 2015 р. С. 73.

13. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М. Вплив золовідвала Сумської ТЕЦ на гідросферу. *IV Міжнародний конгрес «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів 21–23 вересня 2016)*. Львів, 2016. С. 46.

14. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М., М'якаєв О.В. Прогнозування забруднення підземних вод в районі Сумської ТЕЦ. *Міжнародна науково-практична конференція «ЕКОГЕОФОРУМ-2017. Актуальні проблеми та інновації» (Івано-Франківськ, 22-25 березня 2017)*. Івано-Франківськ, 2017. С.304–305.

15. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М. Переробка відходів газоочищення ТЕЦ. *Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту «Технічних систем та енергоефективних технологій» «Сучасні технології у промисловому виробництві»* (Суми, 18-21 квітня 2017). Суми, 2017. С.136.

16. Пляцук Л.Д., М'якаєва Г.М. Вплив Сумської ТЕЦ на довкілля. *Семінар «Сталий розвиток - погляд у майбутнє» кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка»* (Львів, 15 вересня 2017). Львів, 2017. С.46

17. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М. Біомоніторинг ґрунтів в зоні розміщення Сумської ТЕЦ. *V Міжнародна наукова конференція молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування»* (м. Харків, 29–30 листопада 2017). Харків, 2017. С. 17.

18. Пляцук Л.Д., М'якаєва, Г.М. Методи утилізації золошлакових відходів Сумської ТЕЦ. *V Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві»* (Суми, 17-20 квітня 2018). Суми, 2018. С.181.

## Додаток Б

## Результати польових вимірювань параметрів підземних вод на майданчику Сумської ТЕЦ

Таблиця Б.1 – Результати польових вимірювань параметрів підземних вод на майданчику Сумської ТЕЦ, 2009-2017 р.

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	pH	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
101	Спост. свердловина №101 (майданчик ТЕЦ)	13.04.09	16,93	33,83	12,9	1000	6,95	-86
		16.06.09	16,79	33,58	14,0	960	7,03	39
		18.08.09	16,88	33,63	14,0	980	7,10	-33
		16.03.10	16,88	33,61	10,4	1020	7,03	-9
		26.08.10	16,77	33,61	13,0	990	7,10	-31
		19.04.11	16,91	33,60	12,4	1020	6,73	15
		05.09.11	17,01	32,80	15,5	1000	7,18	-1
		24.05.12	16,81	33,60	13,5	1020	6,90	-45
		03.12.12	17,20	32,90	13,1	1000	7,15	22
		03.04.13	16,88	32,62	15,8	916	7,32	-
		15.07.13	16,66	-	13,6	380	8,21	-169
		20.03.14	16,80	32,82	11,8	1030	7,02	-15
		15.10.14	16,66	32,84	14,4	952	7,395	-39
		16.04.15	16,47	31,46	13,9	1185	7,28	-98
		17.11.15	16,70	31,46	12,7	904	7,13	-20
16.02.16	16,64	31,38	13,1	913	7,20	-21		

## Продовження таблиці Б.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		26.12.16	16,68	32,07	12,3	1060	6,79	-50
		26.06.17	16,73	32,09	14,3	1030	7,90	-104
		05.10.17	16,89	32,08	12,7	1020	7,11	30
102	Спост. свердловина №102 (майданчик ТЕЦ)	13.04.09	23,44	49,62	15,0	1010	7,35	-94
		16.06.09	23,19	50,05	14,5	1040	6,90	-72
		18.08.09	23,20	49,57	14,4	1030	7,10	-104
		16.03.10	23,17	49,31	12,8	1040	7,00	-65
		26.08.10	23,00	49,25	14,2	1010	7,15	-110
		19.04.11	23,15	48,99	13,9	1050	6,74	-71
		05.09.11	23,18	48,90	14,2	1040	7,25	-75
		24.05.12	23,05	50,01	14,2	1030	6,75	-110
		03.12.12	23,30	48,95	13,4	1040	7,25	-80
		03.04.13	23,23	49,87	17,5	923	7,13	-4
		15.07.13	23,17	48,82	15,6	840	7,93	-117
		20.03.14	23,00	48,70	12,8	1050	7,06	-51
		15.10.14	23,02	48,71	14,6	941	7,205	-75
		16.04.15	23,01	48,70	14,6	1314	7,62	-81
		17.11.15	23,11	48,58	13,2	981	7,16	-46
		16.02.16	23,10	48,31	13,3	959	6,86	-30
		26.12.16	23,26	48,51	11,9	1050	6,73	-117
26.06.17	23,19	32,15	15,8	1000	8,00	-134		

## Продовження таблиці Б.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		05.10.17	23,30	32,18	13,4	1040	7,16	63
103	Спост. свердловина №103 (майданчик ТЕЦ)	13.04.09	31,02	45,52	13,5	1130	7,05	-133
		16.06.09	31,10	45,15	13,5	1100	6,90	-76
		18.08.09	31,32	45,90	14,1	1090	7,22	-88
		16.03.10	31,17	44,26	12,0	1120	7,02	-78
		26.08.10	31,15	44,15	13,5	1090	7,10	-82
		19.04.11	31,13	44,10	13,3	1120	6,81	-55
		05.09.11	31,15	45,10	15,3	1090	7,25	-40
		03.04.13	30,96	43,70	16,5	997	7,36	68
		15.07.13	31,11	44,02	14,1	1113	7,47	-151
		20.03.14	30,98	43,97	12	1100	7,12	-48
		15.10.14	31,07	42,02	14,5	1006	7,55	-65
		16.04.15	31,04	43,95	13,9	1252	7,40	-50
		17.11.15	30,98	43,91	12,7	1018	7,40	-48
		16.02.16	31,12	43,87	13,2	978	7,30	-57
		26.12.16	31,29	44,12	11,3	1120	6,78	-87
26.06.17	31,28	44,1	13,7	1080	7,70	-136		
05.10.17	31,35	44,01	12,9	1070	7,26	-60		
104	Спост. свердловина №104 (майданчик ТЕЦ)	13.04.09	31,4	47,87	11,5	930	7,10	-78
		16.06.09	31,20	41,55	13,5	880	7,14	-41
		18.08.09	31,22	44,65	13,0	870	7,40	-84
		16.03.10	31,03	44,58	10,0	920	7,40	25

## Продовження таблиці Б.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		26.08.10	31,22	39,98	11,4	920	7,20	-62
		19.04.11	31,04	39,96	11,2	940	6,88	-23
		05.09.11	31,20	40,00	14,0	900	7,43	-23
		24.05.12	30,93	39,98	12,8	980	6,72	-11
		03.12.12	31,25	40,03	11,3	900	7,30	-115
		03.04.13	30,75	39,86	14,6	827	7,86	2
		15.07.13	31,00	40,07	13,5	870	7,46	-24
		20.03.14	30,92	39,97	10,7	940	7,15	-45
		15.10.14	30,93	40,06	13,9	854	7,505	-50
		16.04.15	30,99	39,94	13,2	1133	7,59	-35
		17.11.15	31,24	39,95	11,6	837	7,41	-19
		16.02.16	31,19	40,00	11,8	825	7,34	-10
		26.12.16	31,36	40,57	10,8	930	7,03	-42
		26.06.17	31,42	40,47	12,6	910	7,60	-132
		05.10.17	31,47	40,47	11,9	910	7,31	240

Таблиця Б.2 – Хімічний склад підземних вод на майданчику Сумської ТЕЦ, 2009-2017 р.

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостережені свердловини</i>													
101	Спост. свердловина №101 (майданчик ТЕЦ)	13.04.09	400	50	100	<0,5	160	17	15	4,0	770	747	9,36
		16.06.09	200	54	185	0,5	130	17	15	5	510	607	7,86
		18.08.09	360	60	60	<0,5	130	16	23	5,3	670	655	7,78
		16.03.10	460	80	110	<0,5	175	13	16	6,0	800	861	9,79
		26.08.10	350	52	130	<0,5	160	15	15	2,4	610	725	9,20
		19.04.11	480	64	88	1	125	15	20	5,5	570	799	7,45
		05.09.11	350	50	100	0,5	155	25	15	3,4	700	700	9,75
		24.05.12	480	64	88	1	125	15	20	5,5	705	799	7,45
		03.12.12	350	50	110	0,5	150	20	12	3,0	690	697	9,10
		03.04.13	390	60	120	1	145	15	18	3,8	710	754	8,45
		15.07.13	60	45	65	<0,5	18	15	23	4,6	230	231	2,10
		20.03.14	510	50	130	1	210	15	19	2,8	930	938	<b>11,70</b>
		15.10.14	350	60	200	1	180	20	20	3	830	834	<b>10,60</b>
		16.04.15	360	50	150	3	160	18	20	4,6	760	766	9,44
		17.11.15	380	50	140	<0,5	160	20	20	2,8	770	773	9,60
		16.02.16	400	50	100	<0,5	150	20	17	2,4	740	739	9,10
		26.12.16	420	50	170	1	180	20	24	4,1	860	869	<b>10,60</b>
26.06.17	450	40	120	2	170	20	18	3,1	820	823	<b>10,10</b>		
05.10.17	430	60	130	1	175	20	20	3,3	840	839	<b>10,35</b>		
102	Спост. свердловина №102 (майданчик ТЕЦ)	13.04.09	420	80	85	<0,5	120	20	40	5,0	710	771	7,60
		16.06.09	200	100	140	<0,5	105	19	50	5,3	630	620	6,77
		18.08.09	280	100	60	<0,5	90	20	45	5,5	600	601	6,10
		16.03.10	400	100	110	<0,5	140	17	50	11,0	850	829	8,36



## Продовження таблиці Б.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостережені свердловини</i>													
		26.08.10	390	82	80	<0,5	120	20	35	2,0	710	730	7,60
		19.04.11	210	95	100	<0,5	110	20	40	3,2	590	579	7,10
		05.09.11	400	80	80	1	130	19	40	3,4	760	755	8,02
		24.05.12	300	100	80	<0,5	110	30	45	3,2	550	669	7,90
		03.12.12	300	60	90	2	110	15	40	4,0	650	623	6,70
		03.04.13	270	100	100	1	110	18	43	3,3	570	647	6,94
		15.07.13	270	100	100	<0,5	110	19	43	5,0	650	648	7,02
		20.03.14	350	<b>100</b>	110	1	140	19	50	3,3	770	773	<b>8,52</b>
		15.10.14	390	<b>95</b>	80	0,25	125	30	42	2,2	760	764	<b>8,65</b>
		16.04.15	390	100	24	<0,5	120	21	40	4,4	700	699	7,68
		17.11.15	380	80	100	<0,5	130	24	45	2,4	760	761	8,42
		16.02.16	380	100	50	<0,5	120	26	40	3,5	720	720	8,08
		26.12.16	370	90	125	<0,5	140	25	45	3,0	790	798	9,00
		26.06.17	390	90	75	1	130	25	40	2,5	750	754	8,50
05.10.17	370	75	200	<0,5	150	30	50	3,3	870	878	9,90		
103	Спост. свердловина №103 (майданчик ТЕЦ)	13.04.09	480	80	100	<0,5	120	30	40	5,0	820	856	8,40
		16.06.09	230	80	160	<0,5	110	25	45	6,9	680	658	7,50
		18.08.09	350	80	80	<0,5	100	30	44	4,1	700	689	7,40
		16.03.10	500	65	120	<0,5	140	23	88	14,0	950	951	8,84
		26.08.10	300	65	120	<0,5	125	25	35	2,4	700	673	8,25
		19.04.11	340	80	100	1	110	26	40	3,5	700	701	7,58
		05.09.11	400	70	90	1	125	20	35	2,9	780	745	<b>7,85</b>

## Продовження таблиці Б.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостережені свердловини</i>													
		24.05.12	350	80	100	<0,5	120	30	40	3,5	700	724	8,40
		03.12.12	370	60	120	1	125	22	35	2,9	800	737	8,01
		03.04.13	240	70	200	0,5	120	26	46	3,9	730	708	8,08
		15.07.13	240	85	150	<0,5	110	26	45	4,6	680	662	7,58
		20.03.14	410	70	100	1	130	25	50	3	780	789	8,50
		15.10.14	460	60	90	1	125	35	42	2,5	810	816	9,05
		16.04.15	410	70	90	<0,5	120	30	45	4,4	770	769	8,40
		17.11.15	420	70	120	<0,5	130	30	50	3,0	820	823	8,90
		16.02.16	460	80	65	<0,5	125	34	45	2,8	810	812	<b>8,97</b>
		26.12.16	450	70	130	<0,5	140	35	45	3,3	870	873	9,80
		26.06.17	450	70	100	1	135	34	40	3,1	830	833	9,47
05.10.17	410	140	120	<0,5	160	34	50	3,2	910	917	<b>10,72</b>		
104	Спост. свердловина №104 (майданчик ТЕЦ)	13.04.09	380	60	70	<0,5	120	20	20	8,0	670	679	7,60
		16.06.09	200	60	120	<0,5	100	20	20	5,3	530	526	6,60
		18.08.09	240	60	60	<0,5	90	20	26	5,5	550	502	6,10
		16.03.10	400	55	110	<0,5	145	18	18	4,1	710	751	8,69
		26.08.10	270	43	130	<0,5	120	18	15	1,8	600	598	7,44
		19.04.11	230	64	96	1	100	20	25	5,8	500	542	6,60
		05.09.11	300	50	100	3	120	14	15	2,9	600	606	7,12
		24.05.12	320	80	115	1	130	18	40	6,0	640	711	7,94
		03.12.12	310	50	100	3	120	14	15	2,9	600	616	7,12
03.04.13	180	110	110	1	110	17	20	2,9	550	553	6,86		

## Продовження таблиці Б.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостережені свердловини</i>													
		15.07.13	240	55	85	<0,5	100	17	21	4,6	520	523	6,36
		20.03.14	390	<b>60</b>	95	1	150	19	23	2,1	740	740	9,02
		15.10.14	390	70	100	1	140	30	20	2	750	753	9,40
		16.04.15	350	50	80	0,5	120	22	20	3,9	640	646	7,76
		17.11.15	380	60	90	0,6	135	25	20	2,0	710	713	8,75
		16.02.16	380	<b>60</b>	45	<0,5	120	23	20	2,1	650	650	7,84
		26.12.16	380	70	90	7	140	25	21	2,6	730	736	9,00
		26.06.17	380	70	65	2	130	25	20	3,8	690	696	8,50
		05.10.17	390	80	70	0,5	140	25	20	3,2	720	729	9,00

Жирним шрифтом виділені значення, які перевищують ГДК, встановлені згідно вимог ДержСанПіН 2.2.4-171-10, СанПіН № 4630-88

## Додаток В

## Результати польових вимірювань параметрів підземних вод на ділянці золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ

Таблиця В.1 – Результати польових вимірювань параметрів підземних вод на ділянці золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ, 2009-2017 р.

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електро-провідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
201	Спост. свердловина №201 (ділянка золовідвалу)	13.04.09	5,84	10,40	10,6	2740	7,15	-150
		16.06.09	6,10	10,39	10,3	2620	7,15	-153
		18.08.09	6,63	10,51	15,9	3940	7,10	-207
		16.03.10	6,17	10,49	8,4	3080	7,20	-153
		26.08.10	6,12	10,16	14,1	3780	7,50	-226
		19.04.11	5,74	10,17	10,4	3170	7,00	-145
		05.09.11	6,50	10,15	14,9	3580	7,30	-211
		24.05.12	5,59	10,15	12,2	3160	7,12	-130
		03.12.12	6,55	10,16	10,1	3580	7,28	35
		03.04.13	5,97	14,01	16,4	1957	7,74	-5
		15.07.13	7,13	10,80	14,7	1510	<b>8,70</b>	-90
		20.03.14	6,57	14,33	12,2	1950	7,65	-120
		15.10.14	6,82	14,05	13,1	1646	7,78	-157
		16.04.15	6,76	14,00	13,0	1744	8,21	-301
		17.11.15	7,00	14,04	12,1	1394	8,26	-176
		16.02.16	6,59	15,99	13,3	1265	8,16	-155
26.12.16	6,54	11,82	12,9	1590	7,46	-170		

## Продовження таблиці В.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		26.06.17	6,87	11,8	17,1	1260	7,4	-279
		05.10.17	6,95	11,82	14,2	1280	7,73	-184
202	Спост. свердловина №202 (ділянка золівдвалу)	26.08.10	2,47	10,23	11,5	1670	7,60	-115
		19.04.11	1,26	10,17	4,3	1620	6,70	265
		05.09.11	2,35	10,12	9,7	1710	7,44	-79
		24.05.12	1,12	10,16	8,5	1600	6,85	200
		03.12.12	2,37	10,15	8,0	1710	7,41	-50
		03.04.13	1,19	9,81	7,4	1279	7,96	59
		15.07.13	2,52	10,02	12,5	1680	<b>8,53</b>	-65
		20.03.14	2,17	10,10	8,4	1940	7,25	-30
		15.10.14	2,32	9,66	12,2	1871	7,67	-43
		16.04.15	2,22	9,56	11,0	2040	8,09	-50
		17.11.15	2,42	9,49	11,3	1559	7,52	-53
		16.02.16	2,13	9,44	10,7	1492	7,88	-34
		26.12.16	2,10	9,47	11,1	1640	7,45	-60
		26.06.17	2,22	9,32	11,7	1570	7,60	-76
		05.10.17	2,26	9,22	11,2	1510	7,91	130
203	Спост. свердловина №203 (ділянка золівдвалу)	26.08.10	2,69	6,19	14,5	1540	7,80	-75
		19.04.11	1,95	6,18	9,3	1670	7,35	140
		05.09.11	2,66	6,25	14,5	1590	7,48	-5
		24.05.12	1,82	6,18	9,3	1710	7,00	155
		03.12.12	2,80	6,24	7,0	1590	7,50	-20

## Продовження таблиці В.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		03.04.13	1,43	6,20	12,2	1848	8,11	150
		15.07.13	3,14	6,36	15,2	2010	8,26	164
		20.03.14	2,30	6,59	10,3	1850	7,50	148
		15.10.14	2,39	6,26	14,4	1490	7,76	151
		16.04.15	2,72	6,26	11,7	2180	7,65	175
		17.11.15	2,95	6,24	13,1	1626	7,28	119
		16.02.16	2,09	6,24	13,5	2180	7,69	149
		26.12.16	2,30	6,23	11,7	1520	7,02	215
		26.06.17	2,64	6,25	16,4	1020	8,20	-49
		05.10.17	2,91	6,27	14,7	1070	7,56	291
204	Спост. свердловина №204 (ділянка золовідвалу)	05.09.11	2,41	15,30	12,5	1670	7,86	-226
		24.05.12	2,11	15,20	7,9	1630	7,90	120
		03.12.12	2,45	15,32	7,6	1670	7,90	-104
		03.04.13	1,43	15,25	13,7	1103	8,22	160
		15.07.13	2,71	15,52	13,0	1750	<b>8,84</b>	-40
		20.03.14	2,32	15,58	10,6	1880	7,95	-118
		15.10.14	2,43	15,29	14,1	1460	7,77	-121
		16.04.15	2,35	15,27	12,2	1508	8,33	-129
		17.11.15	2,58	15,24	13,2	1167	8,34	-30
		16.02.16	2,41	15,23	13,3	1569	8,13	-85
		26.12.16	2,16	15,25	13,4	1130	7,81	-68
		26.06.17	2,38	15,26	12,3	1010	7,70	-195

## Продовження таблиці В.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		05.10.17	2,44	15,22	12,4	1050	7,99	127
205	Спост. свердловина №205 (ділянка золовідвалу)	05.09.11	3,63	15,71	8,7	1510	7,56	-120
		24.05.12	1,78	13,45	9,0	1240	7,88	133
		03.12.12	3,70	15,70	7,7	1510	7,62	-120
		03.04.13	2,92	15,67	12,4	1149	7,90	157
		15.07.13	3,73	15,78	11,5	1310	<b>8,80</b>	-65
		20.03.14	3,68	15,93	9,3	1460	7,45	-63
		15.10.14	3,62	15,66	10,1	1513	7,78	-75
		16.04.15	3,48	15,57	11,0	1748	8,07	-102
		17.11.15	3,74	15,55	10,1	1359	7,77	-63
		16.02.16	3,58	15,54	10,2	1411	7,95	-91
		26.12.16	3,45	15,54	10,9	1430	7,43	-110
		26.06.17	3,57	15,55	10,5	1360	8,10	-168
		05.10.17	3,76	15,55	10,3	1360	7,96	118
<b>Поверхневі водні об'єкти</b>								
401	Секція золовідвалу	18.08.09	–	–	21,1	1360	<b>8,90</b>	46
		16.03.10	–	–	6,1	1390	7,30	134
		26.08.10	–	–	20,3	2440	<b>8,65</b>	-60
		19.04.11	–	–	15,2	1600	7,51	45
		24.05.12	–	–	18,8	1750	8,20	60
		03.12.12	–	–	8,8	1520	8,00	100

## Продовження таблиці В.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		15.07.13	–	–	23,5	2830	<b>9,21</b>	87
		20.03.14	–	–	6,7	1760	8,22	179
		15.10.14	–	–	17,7	1330	8,03	105
		16.04.15	–	–	14,5	2000	8,50	-135
		17.11.15	–	–	10,9	1426	8,30	107
		26.12.16	–	–	11,3	1470	7,49	38
		26.06.17	–	–	25,5	1590	<b>9,00</b>	-82
402	Станція відстоювання	18.08.09	–	–	19,4	1660	<b>8,95</b>	76
		03.04.13	–	–	10,9	1132	8,46	146
		20.03.14	–	–	9,3	1740	8,13	177
		26.12.16	–	–	8,5	1380	7,31	144
		26.06.17	–	–	23,6	790	<b>8,70</b>	-166
403	Водойма нижче обвалування золовідвалу	18.08.09	–	–	16,8	1650	7,55	-179
		26.08.10	–	–	15,7	1600	7,80	-295
		19.04.11	–	–	9,0	1610	7,23	176
		05.09.11	–	–	14,3	2050	7,30	-292
		24.05.12	–	–	19,5	1800	7,90	199
		03.12.12	–	–	7,4	2050	7,30	-240
		03.04.13	–	–	3,7	578	8,24	114
		15.07.13	–	–	21,4	1700	<b>8,68</b>	189
		20.03.14	–	–	8,8	2030	7,40	34
		15.10.14	–	–	14,7	1850	7,75	118



## Продовження таблиці В.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		16.04.15	–	–	12,0	1587	8,07	25
		17.11.15	–	–	5,7	1356	7,87	50
		26.06.17	–	–	22,7	1230	7,90	-175
		05.10.17	–	–	11,0	1350	7,60	-20
411	р. Псел біля водозабірних споруд ТЕЦ	26.08.10	–	–	20,8	620	8,10	40
		19.04.11	–	–	8,5	630	8,08	257
		05.09.11	–	–	16,1	650	8,13	293
		24.05.12	–	–	19,4	620	8,34	202
		03.12.12	–	–	6,5	630	8,10	156
		03.04.13	–	–	6,0	543	8,14	100
		15.07.13	–	–	21,5	620	<b>8,97</b>	138
		20.03.14	–	–	5,5	710	8,27	88
		15.10.14	–	–	10,1	432	8,24	118
		16.04.15	–	–	10,5	713	<b>8,79</b>	37
		17.11.15	–	–	4,9	642	8,42	0
		16.02.16	–	–	2,6	630	7,99	116
		26.12.16	–	–	2,0	900	7,54	49
		26.06.17	–	–	21,8	640	7,50	32
05.10.17	–	–	10,9	580	7,91	183		
412	р. Псел нижче золовідвалу	18.08.09	–	–	20,2	580	8,25	-30
		16.03.10	–	–	0,8	830	7,60	95
		26.08.10	–	–	20,9	610	8,20	115

Продовження таблиці В.1

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Статичн. рівень, м	Глибина до дна, м	Температура, °С	Електропровідн., мкС/см	рН	Окислюв.-відновний потенціал, мВ
		19.04.11	–	–	8,5	640	7,89	172
		05.09.11	–	–	16,0	640	8,15	46
		24.05.12	–	–	19,3	630	8,14	187
		03.12.12	–	–	6,9	630	7,80	203
		03.04.13	–	–	5,8	543	8,14	137
		15.07.13	–	–	22,6	630	<b>8,73</b>	171
		20.03.14	–	–	4,6	680	8,20	59
		15.10.14	–	–	10,6	455	8,14	15
		16.04.15	–	–	10,2	793	8,37	-4
		17.11.15	–	–	5,1	625	8,42	48
		16.02.16	–	–	2,3	635	8,03	56
		26.12.16	–	–	1,3	830	7,41	-5
		26.06.17	–	–	22,3	650	<b>8,60</b>	86
		05.10.17	–	–	11,0	580	8,02	140

Таблиця В.2 – Хімічний склад підземних і поверхневих вод на ділянці золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ, 2009-2017 р.

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостережені свердловини</i>													
201	Спост. свердловина №201 (ділянка золівідвалу)	13.04.09	394	<b>445</b>	1	<0,5	170	54	180	5,0	<b>1800</b>	1251	<b>12,82</b>
		16.06.09	410	<b>435</b>	25	<0,5	180	45	175	5	1250	1278	<b>12,60</b>
		18.08.09	400	<b>480</b>	8	<0,5	290	50	190	4,1	<b>1600</b>	1426	<b>18,50</b>
		16.03.10	500	<b>640</b>	<1	0,8	390	46	175	6,0	<b>1900</b>	1762	<b>23,18</b>
		26.08.10	550	<b>380</b>	7	<0,5	180	50	150	3,1	1400	1323	<b>13,00</b>
		19.04.11	600	<b>410</b>	4	<0,5	240	55	170	4,4	1400	1485	<b>16,40</b>
		05.09.11	700	<b>370</b>	1	1	340	19	160	5,0	<b>1700</b>	1598	<b>18,52</b>
		24.05.12	570	<b>380</b>	12	3	220	50	165	3,2	1250	1405	<b>15,00</b>
		03.12.12	640	240	12	<0,5	220	30	140	4,0	1400	1288	<b>13,40</b>
		03.04.13	120	<b>480</b>	260	1	180	18	220	11,0	1250	1294	<b>10,44</b>
		15.07.13	100	210	360	<0,5	93	11	160	8,8	840	945	5,53
		20.03.14	100	<b>380</b>	280	1	190	14	170	9	1140	1144	<b>10,62</b>
		15.10.14	120	290	300	1	160	20	150	10	1050	1051	9,60
		16.04.15	110	300	270	<0,5	150	13	160	9,6	1010	1013	8,54
		17.11.15	150	250	210	<0,5	120	14	150	6,9	900	901	7,12
		16.02.16	100	260	210	<0,5	120	14	134	6,5	840	845	7,12
		26.12.16	150	320	190	1	150	20	140	5,0	970	976	9,10
26.06.17	170	200	150	2	120	11	100	8,4	760	761	6,88		
05.10.17	170	150	300	<0,5	135	12	120	6,5	890	894	7,71		
202	Спост. свердловина №202 (ділянка золівідвалу)	26.08.10	280	160	160	<0,5	92	12	180	2,6	990	888	5,56
		19.04.11	350	230	130	18	160	12	120	3,8	990	1026	8,96
		05.09.11	160	300	170	4	125	16	160	4,4	950	941	7,53
		24.05.12	320	210	130	7	170	12	135	3,8	1000	989	9,46

## Продовження таблиці В.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостереженні свердловини</i>													
		03.12.12	230	240	150	1	130	16	155	4,2	950	927	7,78
		03.04.13	290	210	220	9	140	13	130	4,4	980	1018	8,04
		15.07.13	220	310	170	<0,5	120	18	150	7,0	900	997	7,44
		20.03.14	180	<b>370</b>	320	2	200	19	180	12	1280	1283	<b>11,52</b>
		15.10.14	200	<b>400</b>	151	1	163	26	190	5,6	1130	1137	<b>10,23</b>
		16.04.15	170	290	390	0,7	160	25	200	6,9	1240	1243	10,00
		17.11.15	220	310	190	0,7	145	23	160	2,8	1050	1052	9,09
		16.02.16	190	320	170	<0,5	130	24	160	4,4	1000	998	8,42
		26.12.16	230	280	210	<0,5	150	21	150	5,0	1040	1046	9,18
		26.06.17	230	240	150	1	130	20	120	5,3	890	896	8,10
		05.10.17	240	220	280	<0,5	150	20	150	6,5	1060	1067	9,10
203	Спост. свердловина №203 (ділянка золівідвалу)	26.08.10	180	170	290	<0,5	140	11	110	18,0	890	921	7,88
		19.04.11	170	276	150	23	150	6	140	30,0	970	947	7,98
		05.09.11	300	220	90	14	160	50	95	38,0	950	970	<b>12,00</b>
		24.05.12	200	260	165	<0,5	180	10	130	25,0	950	972	9,80
		03.12.12	400	190	95	12	150	33	110	26,0	1000	1019	<b>10,14</b>
		03.04.13	400	180	220	<b>180</b>	190	18	78	200,0	1500	1467	<b>10,94</b>
		15.07.13	410	180	220	38	160	18	90	180,0	1300	1298	9,44
		20.03.14	370	140	260	<b>180</b>	180	19	70	185	1400	1404	<b>10,52</b>
		15.10.14	80	240	320	25	170	10	110	40	990	995	9,30
		16.04.15	260	110	380	<b>180</b>	140	25	65	240,0	1400	1400	9,00
		17.11.15	260	170	310	110	150	20	90	160,0	1270	1270	9,10

## Продовження таблиці В.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостережені свердловини</i>													
		16.02.16	400	160	300	<b>370</b>	175	42	80	290,0	1810	1817	<b>12,11</b>
		26.12.16	580	30	110	<b>130</b>	120	30	30	190,0	1220	1220	8,40
		26.06.17	120	110	200	3	100	9	55	42,0	640	639	5,72
		05.10.17	100	110	290	0,7	130	5	77	15,0	720	728	6,90
204	Спост. свердловина №204 (ділянка золівідвалу)	05.09.11	200	280	100	2	110	18	140	19,0	900	876	6,94
		24.05.12	180	300	90	1	110	9	140	18,0	850	853	6,22
		03.12.12	200	300	120	5	110	19	120	15,0	800	895	7,02
		03.04.13	50	220	220	2	80	12	120	13,0	700	721	4,96
		15.07.13	75	290	240	<0,5	120	19	140	16,0	900	908	7,52
		20.03.14	100	<b>400</b>	200	1	130	16	200	15	1060	1062	7,78
		15.10.14	90	240	310	0,5	120	25	140	16	940	942	8,00
		16.04.15	110	230	250	<0,5	80	20	170	14,0	870	874	5,60
		17.11.15	120	210	200	<0,5	90	15	135	14,0	780	784	5,70
		16.02.16	100	<b>380</b>	150	<0,5	130	22	150	14,0	950	946	8,26
		26.12.16	130	170	200	<0,5	80	14	130	10,0	730	734	5,12
		26.06.17	130	170	60	0,9	70	11	80	8,4	530	530	4,38
05.10.17	200	120	200	1	105	13	95	9,0	740	743	6,29		
205	Спост. свердловина №205 (ділянка золівідвалу)	05.09.11	200	260	70	2	110	7	125	8,8	800	785	6,06
		24.05.12	100	210	10	<0,5	50	12	100	9,0	520	492	3,46
		03.12.12	300	250	100	2	130	12	120	6,0	1100	923	7,46
		03.04.13	210	170	220	<0,5	110	15	120	7,1	450	854	6,70
		15.07.13	90	200	180	<0,5	100	18	95	9,8	720	696	6,44

## Продовження тблиці В.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостереженні свердловини</i>													
		20.03.14	100	250	240	1	130	18	120	11	870	870	7,94
		15.10.14	190	300	200	0,25	135	30	140	13	1010	1008	9,15
		16.04.15	120	270	270	0,6	110	25	160	20,0	970	976	7,50
		17.11.15	180	260	250	<0,5	130	30	140	13,0	1000	1003	8,90
		16.02.16	170	290	160	<0,5	110	27	140	11,8	910	909	7,66
		26.12.16	180	230	220	1	120	25	130	10,5	910	917	8,00
		26.06.17	200	210	170	0,7	110	25	110	12,0	840	838	7,50
		05.10.17	170	190	230	<0,5	100	23	130	8,6	850	852	6,84
<b>ГДК (для питних вод колодязів і каптажів джерел)</b>			–	<b>350</b>	<b>500</b>	<b>50</b>	–	–	–	–	<b>1500</b>	–	<b>10</b>
<i>Поверхневі водні об'єкти</i>													
401	Секція золовідвалу	18.08.09	320	240	160	<0,5	90	10	130	9,6	<b>1200</b>	961	5,30
		16.03.10	110	120	450	3	190	15	70	7,5	930	967	10,70
		26.08.10	190	<b>510</b>	110	<0,5	160	13	<b>260</b>	11,0	<b>1300</b>	1256	9,04
		19.04.11	210	240	220	1	160	13	110	7,8	960	963	9,04
		24.05.12	200	270	200	1	140	15	90	2,3	890	919	8,20
		03.12.12	250	300	200	1	130	21	140	8,0	<b>1100</b>	1051	8,18
		15.07.13	85	<b>700</b>	120	<0,5	130	15	360	13,0	<b>1400</b>	1425	7,70
		20.03.14	300	300	240	3	250	12	110	6,9	<b>1220</b>	1222	13,46
		15.10.14	210	160	280	1	170	16	86	11	930	934	9,78
		16.04.15	150	300	370	<0,5	160	15	200	11,0	1200	1206	9,20
17.11.15	220	250	240	4	155	20	135	13,0	<b>1030</b>	1037	9,35		

## Продовження таблиці В.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостережені свердловини</i>													
		26.12.16	230	180	330	2	180	24	100	9,1	<b>1050</b>	1055	10,92
		26.06.17	270	280	60	1	110	15	150	8,1	890	894	6,70
402	Станція відстоювання	18.08.09	120	360	120	1	90	11	119	11	950	834	5,38
		03.04.13	150	160	260	5	140	11	88	5,9	800	821	7,88
		20.03.14	280	250	350	4	260	14	105	7,3	<b>1270</b>	1270	14,12
		26.12.16	180	190	260	4	150	15	110	4,6	910	914	8,70
		26.06.17	240	40	140	1	95	16	40	3,1	570	575	6,03
		18.08.09	200	310	100	<0,5	120	16	160	4,6	900	912	7,28
403	Водойма нижче обвалування золовідвалу	26.08.10	250	240	140	<0,5	125	16	130	5,3	820	908	7,53
		19.04.11	330	250	130	<0,5	160	15	130	5,0	1000	1021	9,20
		05.09.11	300	<b>360</b>	150	1	190	15	150	8,1	<b>1100</b>	1176	10,70
		24.05.12	350	240	130	<0,5	160	10	200	4,0	1000	1096	8,80
		03.12.12	420	<b>380</b>	140	1	210	20	130	10,0	<b>1200</b>	1314	12,10
		03.04.13	50	80	90	1	50	5,1	46	3,5	340	327	2,91
		15.07.13	260	300	140	<0,5	135	16	140	8,4	1000	1002	8,03
		20.03.14	260	<b>420</b>	200	1	210	17	190	5,5	<b>1300</b>	1304	11,86
		15.10.14	280	320	270	1	190	25	170	8,7	<b>1260</b>	1265	11,5
		16.04.15	190	230	200	<0,5	130	16	130	6,3	900	902	7,78
		17.11.15	230	230	210	<0,5	140	20	130	7,8	960	968	8,60
		26.06.17	200	200	100	1	105	15	100	5,6	720	727	6,45
		05.10.17	320	200	180	<0,5	150	20	120	5,7	990	996	9,10
411	р. Псел біля водозабірних	02.11.09	210	15	60	1,8	63	10	25	3,6	370	389	3,95

## Продовження таблиці В.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостереженні свердловини</i>													
		26.08.10	330	13	45	<0,5	95	11	20	3,6	520	518	5,63
		19.04.11	280	11	78	1	80	11	20	3,6	490	485	4,88
		05.09.11	280	5	30	0,5	85	18	20	5,0	450	444	5,69
		24.05.12	300	4	105	<0,5	90	5	25	3,1	540	533	4,90
		03.12.12	310	8	30	<0,5	60	15	21	4,0	500	449	4,20
		03.04.13	290	5	70	4	70	10	25	4,0	430	479	4,30
		15.07.13	270	10	40	<0,5	73	11	23	3,9	430	432	4,53
		20.03.14	350	20	60	2	100	13	30	5	580	580	6,04
		15.10.14	330	10	30	0,25	70	16	30	5,4	490	491	4,78
		16.04.15	270	10	70	1	80	12	20	4,6	460	468	4,96
		17.11.15	400	20	45	0,5	100	16	35	5,8	620	622	6,28
		16.02.16	300	20	90	0,8	90	17	30	3,8	550	552	5,86
		26.12.16	440	20	85	1	120	20	40	4,9	730	731	7,60
		26.06.17	390	5	20	3	95	15	20	3,1	550	551	5,95
05.10.17	360	7	45	1	90	16	25	4,7	540	549	5,78		
412	р. Псел нижче водозабірних споруд ТЕЦ	18.08.09	300	15	40	<0,5	65	12	30	6,6	450	469	4,21
		02.11.09	200	20	50	1,6	61	10	25	2,3	390	370	3,85
		16.03.10	350	12	80	3	105	12	30	5,0	530	598	6,21
		26.08.10	210	43	30	<0,5	90	10	15	3,1	450	402	5,30
		19.04.11	240	5	92	1	90	10	20	4,8	480	463	5,30
		05.09.11	300	10	20	1	85	15	15	5,8	500	453	5,45
		24.05.12	250	4	100	1	90	8	20	4,0	500	478	5,14



## Продовження таблиці В.2

Номер об'єкту	Місце відбору проби	Дата відбору	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>				Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K			
<i>Спостережні свердловини</i>													
		03.12.12	320	5	30	<0,5	75	12	23	4,5	520	470	4,71
		03.04.13	190	15	80	0,5	75	10	26	3,8	430	401	4,55
		15.07.13	310	20	30	1	80	11	30	5,5	520	488	4,88
		20.03.14	390	10	60	2	110	11	30	6,3	610	619	6,38
		15.10.14	320	20	30	1	74	15	30	7	490	497	4,90
		16.04.15	260	20	80	<0,5	80	15	25	4,8	480	485	5,20
		17.11.15	350	20	45	0,8	90	16	30	4,9	550	557	5,78
		16.02.16	380	20	25	3	90	16	30	6,1	570	570	5,78
		26.12.16	440	10	75	1	120	18	33	4,8	700	702	7,44
		26.06.17	390	10	12	1	90	15	25	3,1	540	546	5,70
		05.10.17	360	20	33	2	90	15	30	4,5	550	555	5,70
<b>ГДК (для поверхневих вод)</b>			–	<b>350</b>	<b>500</b>	<b>45</b>	–	–	<b>200</b>	–	<b>1000</b>	–	–

Жирним шрифтом виділені значення, які перевищують ГДК, встановлені згідно вимог ДержСанПіН 2.2.4-171-10, СанПіН № 4630-88

**Таблиця В.3 – Хімічний склад проб підземних вод зі спостережних свердловин на ділянці  
золотшлаконакопичувача  
за даними Державної установи «Сумський обласний лабораторний центр Міністерства  
охорони здоров'я України», 2011-2017 рр.**

Номер св-ни	Дата відбору	рН	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>		Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Лужність загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cd	Fe			
<i>Спост. свердловина № 201</i>											
201	25.03.11	7,84	197	129	51,5	14,4	0,0004	0,71	602,5	1,29	3,75
201	20.05.11	7,61	227	26	29,5	15,6	0,0004	0,21	504	1,13	2,75
201	30.08.11	7,92	240	236	112,4	18,7	0,0002	0,12	907	1,95	7,15
201	29.03.12	7,82	151	145	128,3	24,3	0,0007	0,16	803	5,53	8,40
201	30.05.12	7,46	151	168	84,2	21,9	0,0004	<b>1,28</b>	697	3,05	6,00
201	18.10.12	7,64	65	153	86,4	20,3	0,0005	0,98	674,5	3,61	5,98
201	04.04.13	7,84	<b>395</b>	222	169,0	28,6	0,0004	0,56	1085,5	2,21	<b>10,78</b>
201	07.06.13	7,45	201	259	120,2	18,2	0,0008	0,47	730	2,31	7,50
201	22.08.13	7,43	213	338	231,5	4,9	0,0003	0,30	1083	4,64	<b>11,95</b>
201	07.11.13	7,41	275	199	144,3	24,3	0,0006	0,72	774	1,71	9,20
201	31.03.14	7,80	225	187	154,7	26,5	0,0006	0,43	780	3,82	9,90
201	17.06.14	7,57	215	205	121,0	29,8	0,0005	0,45	1061,5	3,10	8,51
201	27.08.14	7,24	265	223	95,2	26,5	0,0009	0,21	918	2,84	8,51
201	06.11.14	7,28	190	198	126,3	21,6	0,0007	0,23	916,5	3,62	8,02
201	16.03.15	7,57	214	182	126,3	26,8	0,0008	<b>2,45</b>	976,5	4,65	8,50
201	20.04.15	7,22	289	256	196,4	30,4	0,0008	0,44	1135	5,47	<b>12,30</b>
201	04.08.15	7,69	250	240	98,4	21,9	0,0006	0,37	917	2,17	6,71
201	18.11.15	7,44	268	250	120,2	20,7	0,0005	<b>1,13</b>	870	2,79	7,70
201	04.02.16	7,52	128	210	116	13,4	0,0006	<b>1,04</b>	905	4,86	6,90
201	05.06.16	7,25	105	113	122	13,4	0,0006	<b>1,09</b>	835	4,44	7,20
201	22.07.16	7,15	245	160	124	21,9	0,0005	0,46	702	2,33	8,00
201	04.11.16	7,27	260	207	140	12,2	0,0006	0,9	706,5	2,69	8,00
201	17.02.17	7,24	241	198	116	26,8	0,0006	0,28	737	2,38	7,99
201	05.05.17	7,15	229	203	110	24,32	0,0007	0,96	725	2,46	7,49
201	07.09.17	7,03	189	139	93	17,15	0,0005	1,41	581	2,26	6,06
201											
<i>Спост. свердловина № 202</i>											
202	30.08.11	7,82	240	216	168,6	2,6	0,0004	0,61	1121,5	6,56	8,62
202	29.03.12	7,70	172	188	144,3	15,8	0,0003	0,21	915	5,84	8,50
202	30.05.12	7,82	307	239	152,3	15,8	0,0004	0,94	1140	5,60	8,90
202	18.10.12	7,38	131	194	64,9	28,6	0,0004	<b>1,10</b>	821	3,00	5,59
202	04.04.13	7,86	147	137	123,8	19,1	0,0004	0,31	828	4,12	7,75
202	07.06.13	7,63	146	167	126,3	17,0	0,0007	0,28	720	4,32	7,70
202	22.08.13	7,15	247	186	168,3	21,9	0,0003	0,53	911,25	4,59	<b>10,20</b>

## Продовження таблиці В.3

Номер св-ни	Дата відбору	рН	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>		Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Лужність загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cd	Fe			
202	07.11.13	7,16	265	212	158,3	23,1	0,0007	<b>1,31</b>	901	3,82	9,80
202	31.03.14	7,04	275	214	222,2	42,1	0,0005	0,32	995	5,47	<b>14,55</b>
202	17.06.14	7,29	193	235	198,4	13,2	0,0007	0,73	1422,5	5,94	<b>10,99</b>
202	27.08.14	7,04	233	221	206,4	27,6	0,0008	0,8	1395	5,73	7,43
202	06.11.14	7,0	<b>366</b>	243	174,6	45,8	0,0008	0,41	1396,5	3,31	<b>12,48</b>
202	16.03.15	7,25	337	266	190,4	37,7	0,0009	0,42	1380,5	5,27	<b>12,60</b>
202	20.04.15	7,38	323	267	218,4	25,5	0,0008	0,36	1325	6,30	<b>13,00</b>
202	04.08.15	7,36	267	244	194,3	25,5	0,0007	<b>1,65</b>	1106	6,20	<b>11,80</b>
202	18.11.15	7,29	276	250	160,3	10,9	0,0005	<b>3,49</b>	996	4,24	8,90
202	04.02.16	7,29	250	235	138	19,5	0,0007	0,89	930	3,51	8,5
202	05.06.16	7,40	75	62	124	21,9	0,0007	<b>1,07</b>	827	5,78	8,0
202	22.07.16	7,34	179	154	132	29,2	0,0006	0,29	815	5,96	9,0
202	04.11.16	7,41	339	237	150	13,4	0,0006	0,92	836	3,51	8,6
202	17.02.17	7,17	258	212	160	8,5	0,0007	0,88	819	4,34	8,68
202	05.05.17	7,22	179	240	172	24,32	0,0008	0,33	872,5	6,1	<b>10,58</b>
202	07.09.17	7,15	166	164	142	19,7	0,0006	<b>1,32</b>	804	4,82	8,71
202											
<i>Спост. свердловина № 203</i>											
203	30.08.11	7,80	15	91	98,3	1,5	0,0005	0,28	560,5	7,89	5,03
203	29.03.12	7,97	115	117	50,1	24,3	0,0002	0,16	527,5	3,69	4,50
203	30.05.12	7,95	71	200	108,2	14,6	0,0003	<b>1,38</b>	901	5,29	6,60
203	18.10.12	7,76	61	157	100,2	16,7	0,0003	0,69	692,5	3,77	6,37
203	04.04.13	8,14	118	185	149,3	28,6	0,0004	0,27	936,5	5,62	9,80
203	07.06.13	7,43	138	187	116,2	14,6	0,0007	0,58	640	2,81	7,00
203	22.08.13	6,95	285	313	211,4	18,9	0,0003	0,27	948,25	1,93	<b>12,10</b>
203	07.11.13	7,49	110	237	134,3	28,0	0,0007	0,36	886,5	5,92	9,00
203	31.03.14	7,54	76	131	79,4	8,4	0,0009	0,27	525	2,07	4,65
203	17.06.14	7,48	120	206	113,0	25,3	0,0006	0,16	973,5	4,86	7,72
203	27.08.14	7,13	50	104	69,5	22,9	0,0007	0,34	968	5,27	5,35
203	06.11.14	7,02	235	306	178,6	38,6	0,0007	0,33	967	2,32	<b>12,08</b>
203	16.03.15	7,56	273	250	128,3	42,6	0,0007	0,59	1304	3,41	9,90
203	20.04.15	7,51	220	250	140,3	35,3	0,0007	0,77	1210	4,44	9,90
203	04.08.15	7,71	89	160	108,2	37,7	0,0006	0,91	745	4,96	8,50
203	18.11.15	7,62	154	200	134,3	35,3	0,0007	<b>1,35</b>	839	3,93	9,60
203	04.02.16	7,41	240	214	118	29,2	0,0008	0,5	900	2,69	8,3
203	05.06.16	7,34	21	72	102	26,8	0,0006	<b>1,11</b>	795	6,20	7,3
203	22.07.16	7,29	224	199	128	24,3	0,0007	0,28	837	3,84	8,4
203	04.11.16	7,16	27	56	116	21,9	0,0007	0,56	855	6,20	7,6

## Продовження таблиці В.3

Номер св-ни	Дата відбору	рН	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>		Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Лужність загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cd	Fe			
203	17.02.17	7,30	122	158	122	23,1	0,0007	0,48	920	4,55	7,99
203	05.05.17	7,33	165	140	102	27,97	0,0005	0,37	897	3,84	7,39
203	07.09.17	7,28	138	271	130	9,85	0,0006	0,38	637	0,89	7,30
203											
<i>Спост. свердловина № 204</i>											
204	30.08.11	8,10	297	297	135,1	17,3	0,0003	0,39	1124,5	1,95	8,16
204	29.03.12	7,78	159	164	140,3	8,5	0,0002	0,22	884	6,25	7,70
204	30.05.12	8,25	257	234	82,2	19,5	0,0002	0,38	848,5	6,41	5,70
204	18.10.12	8,03	203	246	78,6	19,1	0,0004	<b>2,37</b>	844,5	1,27	5,49
204	04.04.13	8,06	196	161	110,0	22,6	0,0004	<b>1,06</b>	757	2,11	7,35
204	07.06.13	7,77	184	141	88,2	20,7	0,0007	0,49	550	1,61	6,10
204	22.08.13	7,36	239	187	98,2	21,9	0,0002	<0,1	645,25	1,33	6,70
204	07.11.13	7,43	265	193	110,2	24,3	0,0006	0,23	702	1,41	7,50
204	31.03.14	7,63	262	188	129,0	24,0	0,0007	0,28	710	1,14	8,41
204	17.06.14	7,62	275	204	95,2	27,7	0,0008	0,31	1005,5	1,39	7,03
204	27.08.14	7,32	346	284	103,2	27,7	0,0007	0,06	942	1,55	<b>12,57</b>
204	06.11.14	7,17	203	304	115,0	21,6	0,0006	0,18	940,5	1,34	7,52
204	16.03.15	7,77	275	212	86,2	30,4	0,0006	<b>1,31</b>	900,5	2,07	6,80
204	20.04.15	7,30	261	236	90,2	37,3	0,0007	0,47	945	1,96	7,57
204	04.08.15	7,62	238	267	74,2	25,5	0,0007	0,31	801	1,76	5,80
204	18.11.15	7,56	212	247	112,2	13,4	0,0006	<b>1,04</b>	791,5	1,45	6,70
204	04.02.16	7,63	194	220	98	24,3	0,0006	0,59	840	2,48	6,90
204	05.06.16	7,30	279	207	116	26,8	0,0007	0,49	880	2,48	8,00
204	22.07.16	7,19	281	260	120	14,6	0,0007	0,12	751	1,82	7,20
204	04.11.16	7,21	240	205	112	19,5	0,0007	<b>1,09</b>	784,5	2,17	7,20
204	17.02.17	7,06	156	177	78	23,1	0,0007	0,61	701	1,96	5,79
204	05.05.17	7,28	222	150	108	18,24	0,0007	0,22	741,5	2,66	6,89
204	07.09.17	7,21	183	126	89	17,27	0,0007	0,34	600	1,97	5,86
204											
<i>Спост. свердловина № 205</i>											
205	30.08.11	8,05	208	225	132,9	6,2	0,0004	0,79	965	4,51	7,14
205	29.03.12	7,83	144	142	116,2	12,2	0,0002	0,16	791,5	6,45	6,80
205	30.05.12	8,08	307	285	122,2	28,0	0,0002	<b>1,35</b>	1157,5	2,75	8,40
205	18.10.12	7,92	287	238	76,6	40,6	0,0006	<b>2,92</b>	1150,5	2,60	7,16
205	04.04.13	8,08	190	197	90,4	42,9	0,0004	<b>1,16</b>	802,5	2,31	8,04
205	07.06.13	7,59	173	180	88,2	30,4	0,0007	<b>1,07</b>	630	2,51	6,90
205	22.08.13	7,40	214	227	144,3	6,1	0,0002	0,57	725,25	2,11	7,70
205	07.11.13	7,46	245	235	112,2	30,4	0,0008	0,80	789,5	2,41	8,10
205	31.03.14	7,43	218	214	125,0	28,8	0,0008	0,16	805	2,38	8,61

## Продовження таблиці В.3

Номер св-ни	Дата відбору	рН	Аніони, мг/дм <sup>3</sup>		Катіони, мг/дм <sup>3</sup>				Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	Лужність загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>	Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>
			Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cd	Fe			
205	17.06.14	7,60	258	234	85,4	53,5	0,0007	0,27	1185,5	2,63	8,66
205	27.08.14	7,30	200	254	97,2	44,5	0,0006	0,09	1020	2,63	6,93
205	06.11.14	7,24	262	255	134,9	28,9	0,0006	0,2	1023,5	2,58	9,11
205	16.03.15	7,67	303	259	80,2	52,3	0,0007	0,7	1213	2,79	8,30
205	20.04.15	7,47	285	253	120,2	23,1	0,0006	<b>1,05</b>	1060	2,69	7,90
205	04.08.15	7,77	266	278	108,2	30,4	0,0006	0,44	1012	2,79	7,90
205	18.11.15	7,71	292	283	104,2	23,1	0,0007	0,89	1004,5	2,69	7,10
205	04.02.16	7,62	241	270	130	24,3	0,0006	0,42	1100	3,20	8,50
205	05.06.16	7,35	262	201	122	25,3	0,0007	0,57	965	1,96	8,20
205	22.07.16	7,42	265	202	126	26,8	0,0006	0,09	868	2,02	8,50
205	04.11.16	7,34	183	161	98	13,4	0,0007	0,63	761,5	1,45	6,00
205	17.02.17	7,21	240	221	110	17	0,0007	0,87	804,5	2,48	6,89
205	05.05.17	7,41	236	223	102	19,46	0,0006	0,23	806	2,56	6,69
205	07.09.17	7,34	218	201	113	23,35	0,0005	0,26	746	2,46	7,56
205											
<b>ГДК (для питних вод колодязів і каптажів джерел)</b>		<b>6,5–8,5</b>	<b>350</b>	<b>500</b>	–	–	–	<b>1,0</b>	<b>1500</b>	–	<b>10</b>

Жирним шрифтом виділені значення, які перевищують ГДК для питних вод (згідно вимог ДержСанПіН України № 2.2.4–171–10)

## Додаток Г

## Діаграми хімічного складу підземних вод на території Сумської ТЕЦ

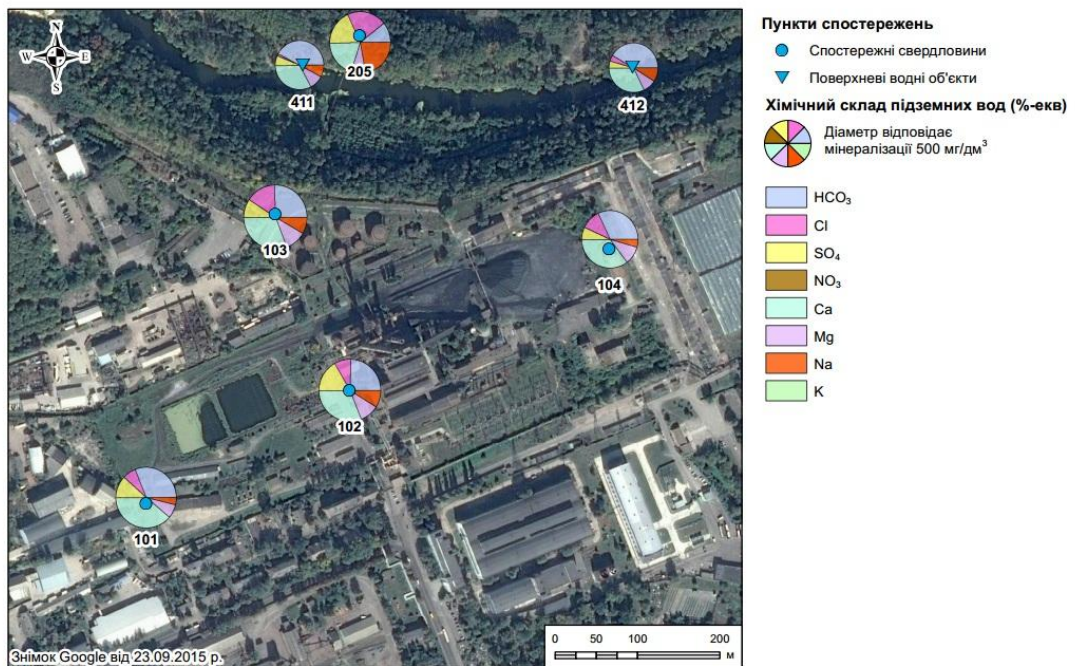


Рисунок Г.1 – Хімічний склад підземних вод на території майданчику Сумської ТЕЦ

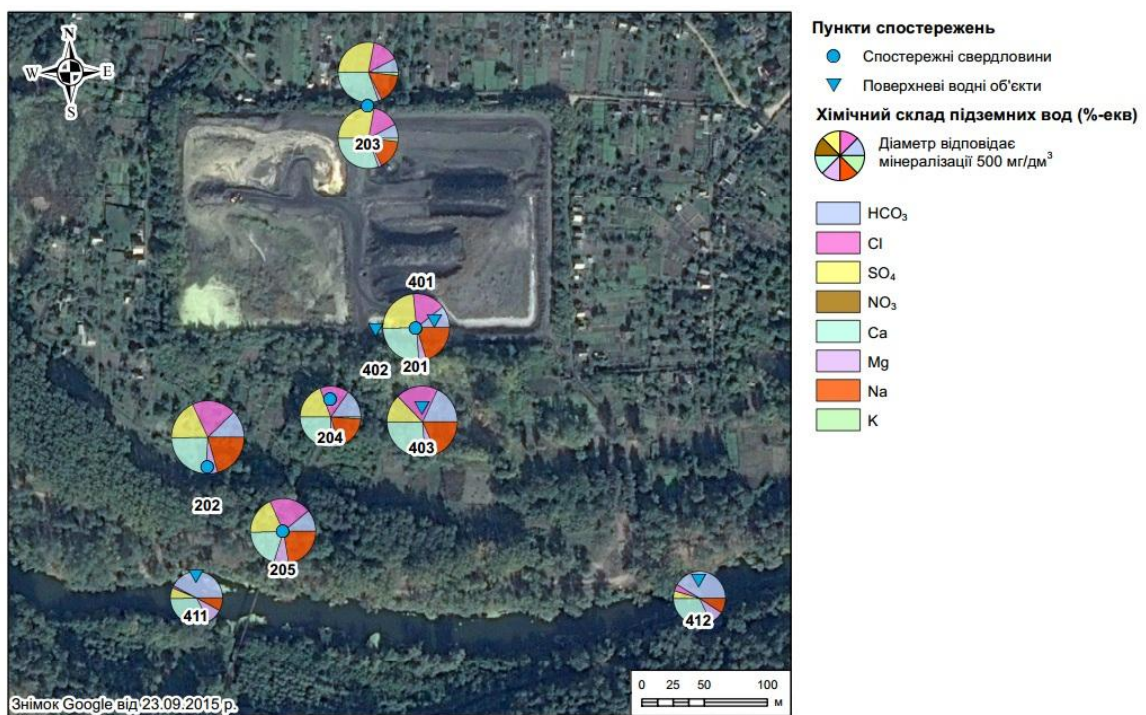
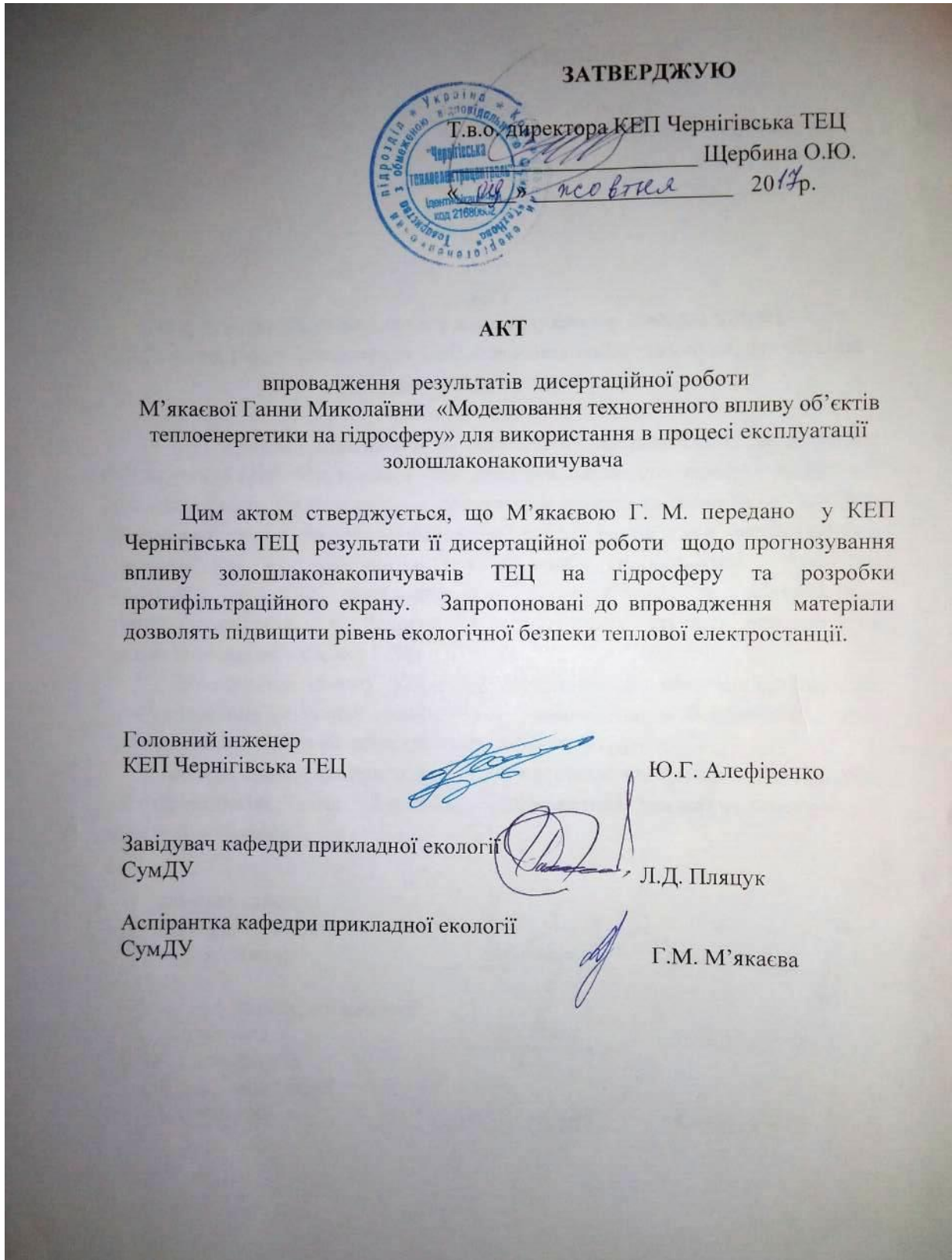


Рисунок Г.2 – Хімічний склад підземних вод на ділянці золошлаконакопичувача Сумської ТЕЦ

## Додаток Д

**Акти впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес та в процес експлуатації золошлаконакопичувача**



## Продовження додатку Д

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор  
Сумського державного університету  
Карпуша В.Д.  
„16” травня 2018 р.

## АКТ

використання в навчальному процесі результатів дисертаційної роботи  
М'якаєвої Ганни Миколаївни «Моделювання техногенного впливу об'єктів  
теплоенергетики на гідросферу»

Основні положення та результати дисертаційного дослідження  
М'якаєвої Ганни Миколаївни на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук впроваджені у навчальний процес та застосовуються при  
викладанні дисциплін «Моделювання та прогнозування стану навколишнього  
середовища», «Техноекологія» для студентів спеціальності 6.040106,  
«Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване  
природокористування». Зокрема, у навчальному процесі впроваджено  
запропоновані М'якаєвою Г.М.:

- математична модель фільтрації забруднюючих речовин (дисципліна  
«Моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища», тема  
«Моделювання міграції забруднюючих речовин у ґрунтах»);
- оцінка впливу підприємств теплоенергетики на довкілля (дисципліна  
«Техноекологія», тема «Загальна характеристика техногенно-екологічної  
ситуації в Україні»).

Завідувач кафедри  
прикладної екології  
д.т.н., професор  
Доцент  
кафедри прикладної екології  
к.т.н., доцент  
Доцент кафедри  
прикладної екології  
к.т.н., доцент

Пляцук Л.Д.

Козій І.С.

Соляник В.О.