

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАТАЛЬЦЕВ ЄВГЕН ВОЛОДИМИРОВИЧ

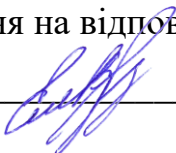
УДК 502/504:620.9:621.1/.2(043.5)

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ
НА НАВКОЛИШНЄ ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ
ОБ'ЄКТАМИ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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

 Батальцев Є. В.

Науковий керівник –
доктор технічних наук, професор
Пляцук Леонід Дмитрович

АНОТАЦІЯ

Батальцев Є. В. Моделювання техногенного впливу на навколишнє природне середовище об'єктами теплоенергетики. – 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, 2021.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04. Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного питання моделювання впливу теплоенергетичних об'єктів на навколишнє природне середовище та розроблення природоохоронних заходів, що підвищують рівень екологічної безпеки в районах їх розміщення.

Метою роботи є вирішення наукової проблеми підвищення рівня екологічної безпеки під час функціонування об'єктів теплоенергетики за допомогою моделювання їх впливу, а також розроблення заходів із зменшення техногенного навантаження на навколишнє природне середовище.

Аналіз теоретичних даних та практичних досліджень засвідчив, що в країнах із великими запасами вугілля (Туреччина, Індія, Казахстан) існує необхідність переходу на нові енергетичні технології спалювання вугілля. Україна також потребує впровадження нових, екологічно чистих технологій його спалювання. У країні теплові електростанції складають основу енергетики, забезпечуючи до 40 % усього виробництва електроенергії. Водночас вони є найпотужнішими об'єктами впливу на навколишнє середовище. Тому питання підвищення рівня екологічної безпеки в районах їх розміщення є дуже важливим. У 2017 році була розроблена й затверджена Енергетична стратегія на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність».

Для об'єктів теплоенергетики, що працюють на вугіллі, запропоновано

чотири шляхи зменшення викидів: заміна або збагачення палива, промивання вугілля, його спалювання в псевдозрідженому шарі, використання фільтрів та скрубєрів. Однак застосування методів очищення не є превентивним методом. Це лише вирішення проблеми, що виникає. Спалювання вугілля в котлах із циркулюючим киплячим шаром із регульованим температурним полем є перспективним напрямом для запобігання виникненню забруднення та збільшення рівня екологічної безпеки.

Прогнозне оцінювання техногенного навантаження на навколишнє природне середовище на основі математичного моделювання процесу горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром та вдосконалення технологічних параметрів низькотемпературного спалювання твердого палива є актуальними завданнями, вирішення яких дозволить підвищити рівень екологічної безпеки.

У роботі проаналізовано вплив теплових електростанцій на навколишнє природне середовище, основні напрями зменшення викидів і скидів ТЕС, особливості енергетичних палив, що визначають екологічні характеристики теплових електростанцій. Наведена класифікація котельних установок для спалювання палива з огляду на екологічну ефективність. Аналіз засвідчив, що топки з циркулюючим киплячим шаром відрізняються не лише більш високим ступенем екологічності, й забезпечують більш високий ступінь згоряння палива (приблизно 98–99 % порівняно з 90–95 % у котлах із стаціонарним киплячим шаром) і можуть працювати з меншим коефіцієнтом надлишку повітря.

На прикладі Чернігівської ТЕЦ були розглянуті природні й техногенні фактори, що впливають на міграцію забруднювальних речовин в атмосферному повітрі та в поверхневій й підземній воді в зоні її розміщення. Описані природно-кліматичні умови району розміщення Чернігівської ТЕЦ. Було проаналізовано викиди цього підприємства, а також методи контролю за станом атмосферного повітря в зоні його впливу.

Описані методи дослідження вмісту забруднювальних речовин у ґрунті, сніговому покриві, воді та рослинах. Наведено схеми експериментальних установок, на яких досліджували фільтрацію забруднювальних речовин та

сорбційні властивості захисного екрана.

У результаті проведених досліджень була розроблена математична модель процесу горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром. Описаний процес деструкції палива в енергетичних котлах. Запропоновані рівняння збереження, в яких використовували гідродинаміку багатофазового потоку, аналіз горіння і викидів оксидів азоту. Описана модель руху паливної складової в зоні горіння котла з циркулюючим киплячим шаром. Для цього використовували систему диференціальних рівнянь, що складається із закону збереження маси, імпульсу, енергії та закону збереження компонентів речовин. У результаті розв'язування чисельним методом системи рівнянь розраховані поля концентрацій продуктів горіння (NO , NO_2 , CO , CO_2 та SO_2) під час згоряння полідисперсної вугільної маси.

Використовуючи програмний комплекс «Barracuda VR», у дослідженні застосовували модель моделювання багатофазних частинок в осередках, у якій газову фазу та рух частинок подавали континуальною моделлю й моделлю Лагранжа відповідно. Цей підхід полягає в тому, що реальні частинки впаковують в обчислювальну частку згідно з їх аналогічними властивостями, зокрема, типом, станом і температурою, що знижує обчислювальну складність. Моделювання для прогнозування горіння палива у циркулюючому киплячому шарі із застосуванням цього методу дозволило одержати точні характеристики горіння та профілі концентрацій основних газових викидів котла.

Розроблена математична модель перенесення забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери. Як забруднювальну речовину вибрано оксид вуглецю, тому що під час згоряння палива у зоні циркуляційного киплячого шару (за температури $900\text{ }^\circ\text{C}$) відбувається повне видалення оксидів азоту, а також оксидів сірки в результаті додавання до зони горіння вапняку. У результаті розрахування були обчислені поля концентрацій забруднювальних речовин, температури повітря, а також максимальне значення концентрації оксиду вуглецю.

Розроблена модель перенесення забруднювальних речовин за профілем

грунту в зоні розміщення ТЕЦ. Ураховуючи зміни напору та водонасиченості, що залежать від кількості опадів, клімату в цілому, спрогнозували стан підземних вод у зоні аерації досліджуваного об'єкта теплоенергетики, а також під час фільтрації води із золошлаконакопичувача. Алгоритми чисельного розв'язання задач профільної фільтрації, масоперенесення забруднювальних речовин були розроблені на базі методу скінченних елементів. Під час опису процесу моделювання міграції забруднювальних речовин у зонах аерації та впливу золошлаконакопичувача буде мати відмінності. Забруднювальні речовини переносяться з тіла золошлаконакопичувача за рахунок фільтрації у водонасиченому ґрунті. У зоні аерації ТЕЦ розглянуто інфільтрацію забруднювальних речовин, що переносяться вниз за профілем з опадами й талою водою, коли вони осідають із відхідних газів на поверхню ґрунту. Під час моделювання процесу міграції забруднювальних речовин у зоні аерації теплоенергетичних об'єктів ураховували перенесення забруднювальних речовин з опадами способом інфільтрації. Розглянута нестационарна задача профільної фільтрації. На основі її результатів була розв'язана задача перенесення забруднювальних речовин. Водночас брали до уваги зміну водонасичення з часом.

З метою оцінювання впливу на стан навколишнього природного середовища ТЕЦ, які працюють на вугіллі, та для виявлення шляхів міграції забруднювальних речовин проведені дослідження ґрунтів, рослинності, а також снігового покриву на вміст важких металів у районі розміщення ТЕЦ. Результати досліджень підтвердили, що підприємство негативно впливає на прилеглі території. Водночас найвищий рівень небезпеки для водних об'єктів становить золошлаконакопичувач.

Проведено дослідження утилізації відхідних газів під час деструкції палива на об'єктах теплоенергетики. Проаналізовані механізми утворення оксидів азоту та сірки у вугільних котлах із циркулюючим киплячим шаром та шляхи зменшення викидів цих шкідливих компонентів. Сформований механізм зв'язування азотних та сірчистих сполук у зоні деструкції палива.

Запропонований режим роботи пристроїв об'єктів теплоенергетики з повною утилізацією техногенних газів.

Проведене екологічне оцінювання стану атмосферного повітря в районі розміщення Чернігівської ТЕЦ, для цього були враховані викиди як самої теплоелектроцентрالی, так і підприємств, що аналогічно впливають на цей район. Урахування забруднення атмосфери джерелами підприємств наведене величинами фонових концентрацій ЗР в атмосферному повітрі, за даними спостережень на стаціонарному посту, розміщеному в місті Чернігові, для таких основних забруднювальних речовин: діоксиду азоту, діоксиду сірки, оксиду вуглецю. Водночас розрахункові величини приземних концентрацій відповідають найбільш несприятливим метеорологічним умовам (небезпечні напрямки та швидкості вітру). Розрахунки виконані відповідно до Методики розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств (ОНД-86) із програмного комплексу «ЕОЛ 2000» v 4.0, розробленого ТОВ «Софт Фонд» і погодженого Міністерством охорони навколишнього природного середовища України. Розрахунок розсіювання забруднювальних речовин проведений для літнього, найбільш несприятливого для розсіювання періоду. Прогнозована концентрація оксиду вуглецю в зоні впливу Чернігівської ТЕЦ після реконструкції збільшилася, але не перевищує рівня ГДК.

Запропоноване влаштування захисного екрана в золошлаконакопичувачі, що зменшить техногенне навантаження місць складування золошлакових відходів на об'єкти гідросфери. Проведені дослідження підтвердили, що місцеві глинисті сорбенти можна ефективно використовувати як сорбенти. Перспективним напрямом також є перероблення золошлаків. Обстеження золошлакових відходів ТЕЦ підтвердило можливість їх використання у сфері будівництва.

Ключові слова: техногенне навантаження, екологічна безпека, об'єкт теплоенергетики, забруднення, гідросфера, атмосфера, атмосферне повітря, забруднення ґрунтів.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Пляцук Л. Д., Батальцев Є. В. Підвищення екологічної безпеки теплових електростанцій за рахунок технології газифікації вугілля. *Екологічна безпека*, № 2/2012 (14). С. 90–92.

2. Bataltsev Y., Plyatsuk L., Ablieieva I., Hurets L., Miakaiev O. Environmental efficiency of managing the combustion process in boilers with circulating fluidized bed. *Technogenic and ecological safety*, №5(1/2019), P. 55–61. DOI: 10.5281/zenodo.2602559.

3. Plyatsuk L. D., Chernysh Y. Y., Ablieieva I. Y., Yakhnenko O. M., Bataltsev Y. V., Balintova M., Hurets L. L. Remediation of soil contaminated with heavy metals. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. Volume 6, Issue 1. P. H1–H8. DOI: 10.21272/jes.2019.6(1).h1.

4. Chernysh Y., Plyatsuk L., Ablieieva I., Yakhnenko E., Roubik H., Miakaieva H., Bataltsev Y., Danilov D. Ecologically safe directions of the low rank coal bioconversion. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. Volume 6, Issue 2. P. H1–H10. DOI: 10.21272/jes.2019.6(2).h1.

5. Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablieieva I., Bataltsev Y., Vaskin R., Roy I., Yakhnenko E., Roubik H. Modelling and development of technological processes for low-rank coal bio-utilization. *Fuel*. Volume 267 (2020), 117298. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117298.

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації

6. Батальцев Є. В., Пляцук Л. Д. Проблеми забруднення атмосфери викидами ТЕЦ та газифікація як перспективний напрямок її вирішення. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (Суми, 23–26 квітня 2013 р.). Суми : СумДУ,

2013. С. 213.

7. Батальцев Е. В., Пляцук Л. Д. Экологические аспекты газификации угля. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : II Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 17–20 квітня 2012 р.). Суми : СумДУ, 2012. С. 94.

8. Батальцев Е. В., Пляцук Л. Д. Газификация как метод уменьшения техногенной нагрузки на окружающую природную среду. *Проблемы безопасности и защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций* : II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Уфа : ФГБОУ ВПО УГАТУ, 2012. С. 182–184.

9. Батальцев Є. В., Пляцук Л. Д. Визначення параметрів, що впливають на процес газифікації вугілля. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування* : I Міжнародна науково-практична конференція (Івано-Франківськ, 20–22 вересня 2012 р.). Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. С. 15–16.

10. Пляцук Л. Д., Батальцев Є. В. Огляд методів внутрішньоциклової газифікації вугілля з погляду на їх екологічну ефективність. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства* : I Міжнародна науково-практична конференція (Львів, 29–30 листопада 2012 р.). Львів : ЛДУ БЖД, 2012. С. 239–242.

11. Батальцев Є. В. Визначальні фактори процесу газифікації як перспективного методу зменшення забруднення атмосфери викидами ТЕЦ. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 22–25 квітня 2014 р.). Суми : СумДУ, 2014. С. 32.

12. Батальцев Є. В., Рой І. О., Петрушанко А. С. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря при спалюванні біомаси в твердопаливних котлах. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : IV Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 19–22 квітня 2016 р.). Суми : СумДУ, 2016. С. 69–70.

13. Батальцев Є. В. Напрями зменшення викидів ТЕС у навколишнє середовище. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : V Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 17–20 квітня 2018 р.). Суми : СумДУ, 2018. С. 206.

14. Батальцев Є. В. Управління процесом горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром з позиції екологічної ефективності. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : VI Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 16–19 квітня 2019 р.). Суми : СумДУ, 2019. С. 223.

15. Данилов Д. В., Пляцук Л. Д., Батальцев Є. В. Екологічно безпечне управління процесом горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром теплових електростанцій. *Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі* : I Міжнародна науково-практична інтернет-конференція (Дніпро, 6–7 лютого 2020 р.). Дніпро, 2020. С. 358–362.

16. Батальцев Є. В. Підвищення екологічної безпеки теплових електростанцій шляхом управління процесом горіння. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : VII Всеукраїнська науково-технічна конференція (Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : СумДУ, 2020. С. 243.

17. Потапова Є. О., Черниш Є. Ю., Батальцев Є. В., Пляцук Л. Д. Огляд перспектив застосування та вилучення CO₂. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)* : IX Міжнародна науково-технічна конференція (Київ 19–22 травня 2020 р.). Київ : НУБіП України, 2020. С. 146–148.

ANNOTATION

Bataltsev Y. V. Modeling of technogenic impact on the environment by thermal power facilities. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the academic degree of the Candidate of Engineering Sciences (Doctor of Philosophy) in the specialty 21.06.01 – Environmental safety. – Sumy State University, Sumy, 2021.

The defense of the dissertation 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, 2021.

The thesis is devoted to the solution of the urgent scientific and practical issue of modeling the technogenic impact of thermal power facilities on the atmosphere and hydrosphere and the development of measures to increase the level of environmental safety in the areas of their location.

The aim of the work is to solve the scientific problem of increasing the level of environmental safety during the operation of thermal power facilities by modeling their impact, as well as to develop measures to reduce the man-made load on the environment.

Analysis of theoretical data and practical research has shown that in countries with large coal reserves (Turkey, India, Kazakhstan) there is a need to move to new energy technologies for coal combustion. Ukraine also needs to introduce new, environmentally friendly technologies for its burning. In our country, thermal power plants form the basis of energetics, providing up to 40 % of total electricity production. At the same time, they are the most powerful objects of environmental impact. Therefore, the issue of improving the level of environmental safety in the areas of their location is very important. In 2017, the Energy Strategy for the period up to 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness" was developed and approved.

There are four ways to reduce emissions on coal-fired power plants: replacing or enriching fuel, flushing coal, burning it in a fluidized bed, using filters and scrubbers. However, the use of cleaning methods is not a preventive method. This is just a solution to the problem that arises. Combustion of coal in circulating fluidized bed boilers with adjustable temperature field is a promising direction to prevent pollution and increase the level of environmental safety.

Forecast estimation of technogenic load on the environment on the basis of mathematical modeling of combustion process in circulating fluidized bed boilers and improvement of technological parameters of low-temperature combustion of solid

fuels are urgent tasks, the solution of which will increase the level of environmental safety.

The work analyzed the impact of thermal power plants on the natural environment, the main directions of reducing thermal power plants emissions and discharges, the peculiarities of energy fuels that determine the environmental characteristics of thermal power plants. The classification of boiler plants for fuel combustion is given, taking into account environmental efficiency. Analysis has shown that circulating fluidized bed furnaces are not only more environmentally friendly, but also provide a higher degree of fuel combustion (about 98–99 % vs. 90–95 % for stationary fluidized bed boilers) and can operate with a lower excess air ratio.

The natural and man-made factors affecting the migration of pollutants in the atmospheric air and into surface and underground waters in the zone of location of Chernihiv CHP were considered. Natural and climatic conditions of the Chernihiv CHP area are described. The plant's emissions were analyzed, as well as methods for monitoring the state of atmospheric air in its influence zone.

Methods of investigation of contaminants content in soil, snow cover, water and plants are described. There are diagrams of experimental installations where filtering of contaminants and sorption properties of protective screen were investigated.

As a result of the studies, a mathematical model of the combustion process in boilers with a circulating fluidized bed was developed. The process of fuel destruction in power boilers is described. Safety equations are proposed, which used hydrodynamics of multi-phase flow, analysis of combustion and emissions of nitrogen oxides. Model of fuel component movement in combustion zone of boiler with circulating fluidized bed is described. To do this, a system of differential equations was used, consisting of the law of preserving mass, momentum, energy and the law of preserving the components of substances. As a result of the numerical solution of the system of equations, fields of concentrations of combustion products (NO , NO_2 , CO , SO_2 and SO_2) during combustion of polydisperse coal mass are calculated.

Using the Barracuda VR software complex, the study applied a model for modeling multiphase particles in cells, in which the gas phase and particle motion were supplied by a continuum model and a Lagrange model, respectively. This approach consists in the fact that real fractions are packed into a computational fraction according to their similar properties, in particular type, state and temperature, reducing computational complexity. Simulations to predict the combustion of fuel in the circulating fluidized bed using this method resulted in accurate combustion characteristics and concentration profiles of the boiler's main gas emissions.

A mathematical model of the transport of pollutants in the surface layer of the atmosphere has been developed. Carbon monoxide is selected as a pollutant because during fuel combustion in the circulating fluidized bed zone (at a temperature of 900 °C), nitrogen oxides are completely removed as well as sulfur oxides as a result of limestone addition to the combustion zone. As a result of the calculation, the fields of concentrations of pollutants, air temperature, as well as the maximum value of the concentration of carbon monoxide were calculated.

A model of transport of pollutants in the soil profile in the CHPP area has been developed. Taking into account changes in head and water saturation, depending on the amount of precipitation, the climate as a whole, the state of groundwater in the aeration zone of the investigated object of thermal power engineering, as well as during the filtration of water from ash and slag storage, was predicted. Algorithms for numerical solution of problems of profile filtration, mass transfer of pollutants were developed on the basis of the method of finished elements. There will be differences during describing the process of modelling the migration of pollutants in the aeration zones and the effects of ash and slag storage. Contaminants are transferred from the ash and slag storage body by filtration in water-saturated soil. In the aeration zone of the CHP, infiltration of pollutants carried down the profile with precipitation and melt water is considered when they settle from the exhaust gases to the soil surface. During the simulation of the process of migration of contaminants in the aeration zone of thermal power facilities, the transfer of contaminants with precipitates by the infiltration method was taken into account. Non-stationary problem of profile

filtering is considered. Based on its results, the task of transferring pollutants was solved. At the same time, the change in water saturation over time was taken into account.

In order to assess the impact on the state of the natural environment of CHPs that work on coal and to identify ways of migrating pollutants, soil, vegetation, as well as snow cover for the content of heavy metals in the area where the CHP is located were studied. The results of the research confirmed that the enterprise negatively affects the surrounding areas. At the same time, ash-and-slag storage has the highest level of danger for water bodies.

A study of waste gas utilization during fuel destruction at thermal power facilities was carried out. Mechanisms of formation of nitrogen and sulphur oxides in coal boilers with circulating fluidized bed and ways to reduce emissions of these harmful components were analyzed. Mechanism is formed for binding nitrogen and sulphur compounds in zone of fuel destruction. The operating mode of devices of objects of thermal power engineering with complete utilization of man-made gases is proposed.

An environmental assessment of the state of the atmospheric air in the area the Chernihiv CHP location was carried out, for which emissions of both the thermal power plant itself and enterprises that similarly affect this area were taken into account. The accounting of air pollution by sources of enterprises is given by the values of background concentrations of pollutants in the atmospheric air, according to observations at a stationary station located in the Chernihiv city, for the following main pollutants: nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide. At the same time, the calculated values of surface concentrations correspond to the most unfavorable meteorological conditions (hazardous directions and wind speeds). Calculations were made in accordance with the Methodology for calculating concentrations in atmospheric air of harmful substances contained in emissions of enterprises (OND-86) from the «EOL 2000» v4.0 program complex developed by Soft Fund LLC and agreed by the Ministry of Environmental Protection of Ukraine. The calculation of the dispersion of contaminants was made for the summer period most unfavorable for

dispersion. The predicted concentration of carbon monoxide in the zone of influence of the Chernihiv CHP after reconstruction increased, but does not exceed the level of maximum permissible concentrations.

Device of protective screen in ash and slag storage is proposed, which will reduce man-made load of places of storage of ash and slag wastes on objects of hydrosphere. Studies have confirmed that local clay sorbents can be effectively used as sorbents. The processing of ash slags is also a promising direction. The study of ash and slag waste of CHP confirmed the possibility of their use in the construction.

Key words: technogenic load, environmental safety, thermal power station, pollution, hydrosphere, atmosphere, atmospheric air, soil pollution.

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

1. Pliatsuk L. D., Bataltsev Ye. V. Pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky teplovykh elektrostantsii za rakhunok tekhnolohii hazyfikatsii vuhillia [Improving the environmental safety of thermal power plants through coal gasification technology]. *Ecological safety*. № 2/2012 (14). P. 90–92.

2. Bataltsev Y., Plyatsuk L., Ablieieva I., Hurets L., Miakaiev O. Environmental efficiency of managing the combustion process in boilers with circulating fluidized bed. *Technogenic and ecological safety*, №5(1/2019), P. 55–61. DOI: 10.5281/zenodo.2602559.

3. Plyatsuk L. D., Chernysh Y. Y., Ablieieva I. Y., Yakhnenko O. M., Bataltsev Y. V., Balintova M., Hurets L. L. Remediation of soil contaminated with heavy metals. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. Volume 6, Issue 1. P. H1–H8. DOI: 10.21272/jes.2019.6(1).h1.

4. Chernysh Y., Plyatsuk L., Ablieieva I., Yakhnenko E., Roubik H., Miakaieva H., Bataltsev Y., Danilov D. Ecologically safe directions of the low rank coal bioconversion. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. Volume 6, Issue 2. P. H1–H10. DOI: 10.21272/jes.2019.6(2).h1.

5. Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablieieva I., Bataltsev Y., Vaskin R., Roy I., Yakhnenko E., Roubík H. Modelling and development of technological processes for low-rank coal bio-utilization. *Fuel*. Volume 267 (2020), 117298. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117298.

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

6. Bataltsev Ye. V., Pliatsuk L. D. Problemy zabrudnennia atmosfery vykydamy TETs ta hazyfikatsiia yak perspektyvnyi napriamok yii vyrishennia [Problems of air pollution by CHP emissions and gasification as a promising area for its solution]. *Modern technologies in industrial production* : Scientific and technical conference of teachers, staff, graduate students and students of the Faculty of Technical Systems and Energy Efficient Technologies (Sumy, 23-26 of April 2013). Sumy: Sumy State University, 2013. P. 213.

7. Bataltsev E. V., Pliatsuk L. D. Ekologicheskie aspekty gazifikacii uglja [Environmental aspects of coal gasification]. *Modern technologies in industrial production* : II All-Ukrainian interuniversity scientific and technical conference (Sumy, 17-20 of April 2012). Sumy: Sumy State University, 2012. P. 94.

8. Bataltsev E. V., Pliatsuk L. D. Gazifikaciya kak metod umen'sheniya texnogennoj nagruzki na okruzhayushhuyu prirodnyuyu sredu [Gasification as a method to reduce technogenic impact on the environment]. *Problems of safety and protection of the population and territory from emergencies* : II All-Russian scientific and practical conference with international participation. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2012. P. 182–184.

9. Bataltsev Ye. V., Pliatsuk L. D. Vyznachennia parametriv, shcho vplyvaiut na protses hazyfikatsii vuhillia [Determination of parameters influencing the process of coal gasification]. *Environmental Security and Balanced Resource Use* : I International Scientific and Practical Conference (Ivano-Frankivsk, 20–22 of September 2012). Ivano-Frankivsk: Ivano Frankivsk National Technical University

of Oil and Gas, 2012. P. 15–16.

10. Pliatsuk L. D., Bataltsev Ye. V. Ohliad metodiv vnutrishnotsyklovoi hazyfikatsii vuhillia z pohliadu na yikh ekolohichnu efektyvnist [Review of methods of intra-cycle gasification of coal from the point of view of their ecological efficiency]. *Environmental safety as a basis for sustainable development of society* : I International scientific-practical conference (Lviv, 29–30 of November 2012). Lviv: Lviv State University of Life Safety, 2012. P. 239–242.

11. Bataltsev Ye. V. Vyznachalni faktory protsesu hazyfikatsii yak perspektyvnoho metodu zmeshennia zabrudnennia atmosfery vykydamy TEC [Determinants of the gasification process as a promising method of reducing air pollution by CHP emissions]. *Modern technologies in industrial production* : III All-Ukrainian interuniversity scientific and technical conference (Sumy, 22–25 of April 2014). Sumy: Sumy State University, 2014. P. 32.

12. Bataltsev Ye. V., Roi I. O., Petrushanko A. S. Vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria pry spaliuvanni biomasy v tverdopalyvnykh kotlakh [Emissions of pollutants into the atmosphere during biomass combustion in solid fuel boilers]. *Modern technologies in industrial production* : IV All-Ukrainian interuniversity scientific and technical conference (Sumy, 19–22 of April 2016). Sumy: Sumy State University, 2016. P. 69–70.

13. Bataltsev Ye. V. Napriamy zmeshennia vykydiv TES u navkolyshnie seredovyshe [Directions for reducing emissions of thermal power plants into the environment]. *Modern technologies in industrial production* : V All-Ukrainian interuniversity scientific and technical conference (Sumy, 17–20 of April 2018). Sumy: Sumy State University, 2018. P. 206.

14. Bataltsev Ye. V. Upravlinnia protsesom horinnia v kotlakh iz tsyrkuliuiuchym kypliachym sharom z pozytsii ekolohichnoi efektyvnosti [Control of combustion process in boilers with circulating fluidized bed from the standpoint of environmental efficiency]. *Modern technologies in industrial production* : VI All-Ukrainian interuniversity scientific and technical conference (Sumy, 16–19 of April 2019). Sumy: Sumy State University, 2019. C. 223.

15. Danylov D. V., Pliatsuk L. D., Bataltsev Ye. V. Ekologichno bezpechne upravlinnia protsesom horinnia v kotlakh iz tsyrkuliuiuchym kypliachym sharom teplovykh elektrostantsii [Ecologically safe control of combustion process in boilers with circulating fluidized bed of thermal power plants]. *Integration of education, science and business in the modern environment* : I International scientific and practical internet conference (Dnipro, 6–7 of February 2020). Dnipro, 2020. P. 358–362.

16. Bataltsev Ye. V. Pidvyshchennia ekologichnoi bezpeky teplovykh elektrostantsii shliakhom upravlinnia protsesom horinnia [Improving the environmental safety of thermal power plants by controlling the combustion process]. *Modern technologies in industrial production* : VII All-Ukrainian interuniversity scientific and technical conference (Sumy, 21–24 of April 2020). Sumy: Sumy State University, 2020. P. 243.

17. Potapova Ye. O., Chernysh Ye. Yu., Bataltsev Ye. V., Pliatsuk L. D. Ohliad perspektyv zastosuvannia ta vyluchennia CO₂ [Review of prospects for the use and removal of CO₂]. *Problems of modern energy and automation in the system of nature management (theory, practice, history, education)* : IX International scientific and technical conference (Kyiv, 19–22 of May 2020). Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2020. P. 146–148.

ЗМІСТ

С.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	21
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ТЕПЛОВИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ ТА НАПРЯМКІВ ЇЇ ВИРІШЕННЯ.....	30
1.1 Аналіз впливу теплових електростанцій на навколишнє природне середовище	30
1.1.1 Взаємодія ТЕС та навколишнього середовища.....	31
1.1.2 Основні напрями зменшення викидів і скидів ТЕС у навколишнє середовище	34
1.1.3 Особливості енергетичних палив, що визначають екологічні характеристики ТЕС.....	36
1.1.4 Класифікаційні екологічні параметри вугільного палива: індекс забрудненості, показник шкідливості	40
1.2 Класифікація котельних установок для спалювання палива з огляду на їх екологічну ефективність.....	48
Висновки до розділу 1 та поставлення завдання дослідження.....	58
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	59
2.1 Характеристика Чернігівської ТЕЦ як об'єкта дослідження	59
2.2 Природно-кліматична характеристика району дослідження	60
2.3 Методи контролю за впливом ТЕЦ на навколишнє середовище	62
2.3.1 Контроль стану атмосферного повітря	62
2.3.2 Контроль стічних, поверхневих та підземних вод.....	63
2.3.3 Контроль ґрунтів	65
2.3.4 Контроль впливу відходів на довкілля.....	66
2.4 Методика вивчення масоперенесення забруднювальних речовин у ґрунтах	67

2.5	Методика дослідження сорбційних здатностей протифільтраційного екрана.....	68
	Висновки до розділу 2	71
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕС НА НАВКОЛИШНЄ ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ.....		
	3.1 Математичне моделювання процесу деструкції з формуванням відхідної газової складової	72
	3.2 Моделювання перенесення забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери	89
	3.3 Фізична картина перенесення забруднювальних речовин у зоні впливу ТЕЦ.....	91
	3.4 Математичне моделювання перенесення забруднювальних речовин у ґрунтах.....	95
	3.4.1 Профільна задача фільтрації.....	98
	3.4.1.1 Алгоритм розв'язування задачі профільної фільтрації методом скінченних елементів	99
	3.4.2 Профільна задача масоперенесення забруднювальних речовин.....	101
	3.4.2.1 Розв'язування профільної задачі масоперенесення забруднювальних речовин методом скінченних елементів	103
	3.5 Моделювання фільтрації забруднювальних речовин із місць складування золошлакових відходів.....	107
	3.5.1 Одновимірна задача фільтрації.....	107
	3.5.2 Перевірка адекватності математичної моделі	108
	3.5.3 Двовимірна задача фільтрації	110
	3.6 Моделювання перенесення забруднювальних речовин у зоні аерації об'єктів теплоенергетики	113
РОЗДІЛ 4 ДООЧИЩЕННЯ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ПІД ЧАС ДЕСТРУКЦІЇ ПАЛИВА		
	4.1 Зменшення оксидів азоту у відхідних газах.....	116
	4.1.1 Механізм утворення N_2O в циркулюючому киплячому шарі	118

4.2 Зменшення діоксидів сірки у відхідних газах	120
Висновки до розділу 4	124
РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	125
5.1 Техногенне навантаження на довкілля	127
5.2 Промислові відходи ТЕЦ	128
5.3 Джерела викидів забруднювальних речовин в атмосферу	129
5.4 Джерела впливу на гідросферу	130
5.5 Джерела впливу на літосферу.....	131
5.6 Обґрунтування необхідності реконструкції Чернігівської ТЕЦ.....	131
5.7 Екологічне оцінювання стану атмосферного повітря в районі розміщення Чернігівської ТЕЦ	134
Висновки до розділу 5	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	140
ДОДАТКИ.....	160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення

ВРЗ	– великорозмірний заповнювач;
ГДВ	– гранично допустимий викид;
ГДК	– гранично допустима концентрація;
ЗР	– забруднювальна речовина;
ПРН	– природні радіонукліди;
ТЕЦ	– теплова електроцентраль;
ПЕК	– паливно-енергетичний комплекс;
ТЕС	– теплова електростанція;
ЦКШ	– циркулюючий киплячий шар;
НТВ	– низькотемпературна вихрова технологія;
ЗШВ	– золошлакові відходи.

Умовні позначення

ρ	– густина, кг/м ³ ;
H	– напір, м;
k_f	– коефіцієнт фільтрації, м/добу;
L	– глибина, м;
D_M	– коефіцієнт молекулярної дифузії, м ² /с;
c	– концентрація, мг/м ³ ;
d	– діаметр, м;
t	– час, с;
θ	– пористість, м ³ /м ³ ;
D	– гідродинамічна дисперсія, м ² /с;
S_w	– водонасичення, м ³ /м ³ ;
T	– температура, °С;
p	– тиск, Па;

- V – витрата, $\text{м}^3/\text{с}$;
 v – швидкість, $\text{м}/\text{с}$;
 W – вологість, %;
 x, y, z – декартові координати.

ВСТУП

Актуальність теми. Енергетика будь-якої країни є визначальним фактором ефективності розвитку економіки і технічного рівня промисловості. Основу енергетики України складають теплові електростанції (ТЕС) на органічному паливі, що забезпечують до 40 % усього виробництва електроенергії. Водночас вони є найпотужнішими об'єктами впливу на навколишнє природне середовище. З труб теплових електростанцій в атмосферне повітря викидається велика кількість оксидів сірки й азоту, що є основною причиною виникнення кислотних дощів. Крім того, атмосферне повітря забруднюється дрібними твердими частинками золи, неповністю згорілого палива. Разом із вугіллям до топок теплоенергетичних об'єктів може потрапляти пуста порода, що містить домішки природних радіонуклідів, тому має місце радіоактивне забруднення атмосферного повітря й земної поверхні, що може перевищувати можливе радіоактивне забруднення за нормальної експлуатації атомних електростанцій. Це пов'язано з тим, що в золі, зокрема леткій, залишаються ізотопи уранорадієвої та торієвої родин, що є у вихідному вугіллі. Коли воно спалюється, ізотопи виділяються з маси вуглецю, стають досить концентрованими й небезпечними. Крім того, відвали золи та шлаку займають великі площі, забруднюють підземні й поверхневі води.

У країнах із великими запасами вугілля (Туреччина, Індія, Казахстан) існує необхідність переходу на нові енергетичні технології спалювання вугілля. Україна також потребує впровадження нових, екологічно чистих технологій його спалювання. У 2017 році була розроблена й затверджена Енергетична стратегія на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність».

Для об'єктів теплоенергетики, що працюють на вугіллі, запропоновано чотири шляхи зменшення викидів: заміна або збагачення палива, промивання вугілля, його спалювання в псевдозрідженому шарі, використання фільтрів та скрубєрів. Однак застосування методів очищення не є превентивним методом.

Це лише вирішення проблеми, що виникає. Спалювання вугілля в котлах із циркулюючим киплячим шаром із регульованим температурним полем є перспективним напрямом для запобігання виникненню забруднення та збільшення рівня екологічної безпеки.

Прогнозне оцінювання техногенного навантаження на навколишнє природне середовище на основі математичного моделювання процесу горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром та вдосконалення технологічних параметрів низькотемпературного спалювання твердого палива є актуальними завданнями, вирішення яких дозволить підвищити рівень екологічної безпеки.

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 з науковим напрямом 04.06 – «Екологічно чиста енергетика і ресурсозберігаючі технології», плану заходів на 2010–2030 рр. з реалізації «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року», затвердженому розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071-р від 24.07.2013 року.

Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри екології та природоохоронних технологій Сумського державного університету за темами «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики» (номер держреєстрації 0116U006606) та «Розробка шляхів поліпшення екологічної ситуації міст і промислових зон» (номер держреєстрації 0111U006335), згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України, в яких автор брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вирішення наукової проблеми підвищення рівня екологічної безпеки під час функціонування об'єктів теплоенергетики за допомогою моделювання їх впливу, а також

розроблення заходів із зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище.

Відповідно до мети були поставлені такі завдання:

- провести аналіз особливостей техногенного впливу викидів теплових електростанцій на навколишнє природне середовище;
- провести аналіз існуючих шляхів зменшення техногенного навантаження теплових електростанцій на навколишнє середовище;
- визначити чинники, що впливають на емісію забруднювальних речовин під час спалювання вугілля на теплових електростанціях, та вдосконалити технологію спалювання палива;
- провести математичне моделювання процесу горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром;
- визначити чинники, що впливають на фільтрацію та інфільтрацію забруднювальних речовин (ЗР) у районах розміщення об'єктів теплоенергетики;
- провести моделювання процесу перенесення ЗР у навколишньому середовищі;
- розробити заходи щодо зменшення впливу золошлакозасобиачувача на об'єкти гідросфери;
- на підставі проведених досліджень обґрунтувати рекомендації щодо вдосконалення процесу горіння в котлах теплових електростанцій із метою зменшення емісії забруднювальних речовин.

Об'єкт дослідження – вплив ТЕС на стан навколишнього середовища.

Предмет дослідження – моделювання процесу горіння та перенесення забруднювальних речовин у місцях розміщення об'єктів теплоенергетики.

Методи дослідження. Для математичного моделювання використовували програмний продукт COMSOL Multiphysics. Методи, які використовували для проведення експериментальних досліджень міграції забруднювальних речовин у зоні впливу об'єкта теплоенергетики: атомно-абсорбційним визначали вміст важких металів, гравіметричним – вміст твердих частинок, потенціометричним

– рН. Під час дослідження сорбційних властивостей захисного екрана застосовували такі методи: рентгенівську дифрактометрію, фотоколориметрію і титриметрію. Під час дослідження золошлакових відходів (ЗШВ) для визначення дисперсного складу та механічних властивостей використовували фізичні методи. Оброблення результатів експериментів виконували за допомогою пакета прикладних програм Microsoft Excel.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

– уперше запропоновано регулювання температурного поля в котлоагрегаті для повного зменшення емісії оксидів азоту під час спалювання твердого палива;

– уперше проведене комп'ютерне моделювання розподілу температури в енергетичному котлі, що доводить ефективність зменшення оксидів азоту з використанням повного температурного ефекту;

– уперше в Україні запропоноване використання технології циркулюючого киплячого шару з використанням різних видів палива;

– уперше оцінений вплив на навколишнє середовище в разі використання котлів із керуванням температурним режимом горіння;

– удосконалена математична модель перенесення забруднювальних речовин у ґрунті способом, що враховує інтенсивність атмосферних опадів під час інфільтрації та який дозволяє прогнозувати рівень техногенного навантаження на навколишнє середовище в зоні впливу теплоенергетичних об'єктів із високою точністю;

– удосконалені режими роботи котельного обладнання з метою зниження техногенного впливу на навколишнє середовище.

Практичне значення одержаних результатів. Практична реалізація дисертаційної роботи щодо зменшення температури горіння в котлах об'єктів теплоенергетики дала змогу зменшити техногенне навантаження на навколишнє середовище під час спалювання вугілля зі збереженням тепловіддачі палива.

СП «Технополіс» передані результати науково-теоретичних досліджень, а саме науково-технічне рішення повної утилізації відхідних газів (SO_x , NO_x , CO_2)

із подальшим упровадженням у проєкт реконструкції енергоблока малої потужності (акт впровадження від 15.05.2020 р.).

Результати науково-теоретичних досліджень, передані Комунальному енергогенеруючому підприємству «Чернігівська ТЕЦ» ТОВ фірми «ТехНова» (акт впровадження від 20.09.2020 р.):

- математичне та комп'ютерне моделювання температурного поля в котлі з циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ);

- методика розрахунку та управління температурним полем у зоні горіння в ЦКШ;

- методика розрахунку камери (зони) горіння в ЦКШ з урахуванням різних видів палива;

- методика розрахунку газових і пилових викидів, зони їх розсіювання;

- науково-технічне рішення повної утилізації відхідних газів (SO_x , NO_x , CO_2) із подальшим упровадженням у проєкт реконструкції Чернігівської ТЕЦ.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету в дисциплінах «Основи технологій захисту навколишнього середовища» та «Техноекологія» (акт впровадження від 18.11.2020 р.).

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні експериментальних досліджень, обробленні одержаних результатів та їх аналізуванні. Дисертаційна робота – самостійне, завершене дослідження автора у сфері екологічної безпеки. Усі наукові та прикладні висновки, що складають основний зміст роботи, одержав автор самостійно. Автор сформулював мету та завдання, що дозволили провести моделювання техногенного впливу на навколишнє середовище теплоенергетичних об'єктів; розробив математичну модель перенесення забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери; розробив математичні моделі масоперенесення та профільної фільтрації з описом алгоритмів їх чисельного розв'язання; запропонував влаштування протифільтраційного екрана в золошлаконакопичувачі; проаналізував золошлакові відходи теплових електроцентралей (ТЕЦ) для дослідження можливості їх застосування як наповнювачів у будівництві.

Вибір теми дисертаційної роботи, поставлення завдань наукового дослідження, обговорення результатів, що були одержані, проведені разом із науковим керівником – доктором технічних наук, професором Л. Д. Пляцуком. У списку праць за темою дисертаційної роботи наведений внесок автора в працях, опублікованих у співавторстві.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 12 наукових конференціях різних рівнів: Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції (СумДУ, м. Суми, 17–20 квітня 2012 р.), II Всеросійській науково-практичній конференції за міжнародної участі (Уфа, ФГБОУ ВПО УГАТУ, 2012 р.), науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (СумДУ, м. Суми, 23–26 квітня 2013 р.), I Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування» (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, 20–22 вересня 2012 р.), I Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства» (ЛДУ БЖД, м. Львів, 2012 р.), III Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції (СумДУ, м. Суми, 22–25 квітня 2014 р.), IV Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції (СумДУ, м. Суми, 19–22 квітня 2016 р.), V Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції (СумДУ, м. Суми, 17–20 квітня 2018 р.), VI Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції (СумДУ, м. Суми, 16–19 квітня 2019 р.), I Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції (м. Дніпро, 6–7 лютого 2020 р.), VII Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції (СумДУ, м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.), науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (НУБіП України, м. Київ, 19–22 травня 2020 р.).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 17 наукових праць, із яких 4 статті в наукових фахових виданнях із переліку МОН України, 1 стаття в

закордонному науковому виданні, що індексується наукометричними базами даних, 12 тез доповідей у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, списку використаних джерел, 3 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 168 сторінок, з яких основного тексту – 115 сторінок. Робота містить 33 рисунки та 8 таблиць за текстом. Список використаних джерел уміщує 164 найменування і розміщений на 20 сторінках. Додатки розміщені на 9 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ТЕПЛОВИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ ТА НАПРЯМКІВ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

1.1 Аналіз впливу теплових електростанцій на навколишнє природне середовище

На сьогодні теплові електростанції є найпоширенішими виробниками теплової та електричної енергії. З труб теплових електростанцій в атмосферне повітря викидається величезна кількість оксидів азоту та сірки, що є основною причиною виникнення кислотних дощів. Крім того, атмосферне повітря забруднюється дрібними твердими частинками золи, неповністю згорілого палива. Разом з вугіллям у топки теплоенергетичних об'єктів може потрапляти пуста порода, що містить домішки природних радіонуклідів, тому має місце радіоактивне забруднення атмосферного повітря й земної поверхні, яке може перевищувати можливе радіоактивне забруднення за нормальної експлуатації атомних електростанцій [1–5]. Це пов'язано з тим, що в золі, зокрема в леткій, залишаються ізотопи урано-радієвої та торієвої родин, що є у вихідному вугіллі. Коли воно спалюється, вони виділяються з маси вуглецю, стають досить концентрованими й небезпечними. Крім того, відвали золи займають значні площі, забруднюючи поверхневі та підземні води [6–8].

Використання навіть дуже ефективних очисних пристроїв [9–12] може скоротити рівень забруднення навколишнього природного середовища, проте не може вирішити проблему повністю, бо в процесі функціонування цих очисних установок також виникають відходи [1]. Хоча їх кількість уже менша, але концентрація шкідливих ЗР у них підвищена. До того ж робота більшості очисних пристроїв та споруд потребує значних енергозатрат, що також є небезпечним для навколишнього середовища. Навіть, незважаючи на

впровадження різноманітних природоохоронних заходів на підприємствах паливно-енергетичного комплексу (ПЕК), рівень навантаження на природне середовище є значно високим. Це вимагає впровадження нової технології поводження із твердими видами палива для зменшення техногенного навантаження на довкілля.

Для об'єктів теплоенергетики, що працюють на вугіллі, запропоновано чотири шляхи зменшення обсягів шкідливих викидів: заміна або збагачення палива, промивання вугілля, його спалювання в псевдозрідженому шарі, використання фільтрів, скрубєрів.

Щодо зміни палива, то є сорти вугілля, що мають низький уміст сірки, але економічні фактори можуть унеможливити перехід на них. Крім того, деякі види такого вугілля характеризуються меншою теплотою згорання, тому їх використання може не дати бажаного ефекту – зменшення шкідливих пилогазових викидів. Крім використання дорогого низькосірчастого вугілля, викиди діоксиду сірки можна скоротити, якщо очищувати вугілля до спалювання у котлі. Робота різних газоочисних агрегатів базується на хімічних реакціях за участі діоксиду сірки. Утворені в цьому разі сполуки можна або скидати у відходи, або застосовувати як продукт, що має збут. На сьогодні застосування скрубєрів – загальноприйнята технологія [7–8].

1.1.1 Взаємодія ТЕС та навколишнього середовища

Теплові електростанції розглядаються як об'єкти виробництва тепло- та електроенергії, що використовують первинні ресурси – органічне паливо, воду та атмосферне повітря. У результаті технологічного процесу на цих теплоенергетичних об'єктах утворюються матеріальні й енергетичні відходи, що негативно впливають на стан навколишнього природного середовища [13, 14]. Можна виділити такі групи матеріальних відходів:

– організовані, що надходять у навколишнє природне середовище через димові труби, пульпопроводи, відвідні канали тощо, та такі, що залежать від режиму роботи теплоелектростанції;

– неорганізовані, що залежать від погодних умов (температури повітря, опадів, швидкості вітру тощо) та пори року, ніж від режимів роботи.

Технічна політика в галузі охорони навколишнього середовища визначається необхідністю обмеження викидів і скидів забруднювальних речовин, фізичних впливів, утворення відходів, за додержання яких забезпечуються нормативи з якості навколишнього середовища в зоні розміщення теплоелектростанцій [15–17].

На рисунку 1.1 наведені схема взаємодії ТЕС із навколишнім середовищем і структура матеріальних та фізичних відходів, що забруднюють атмосферне повітря, поверхневі й ґрунтові води, ґрунти.

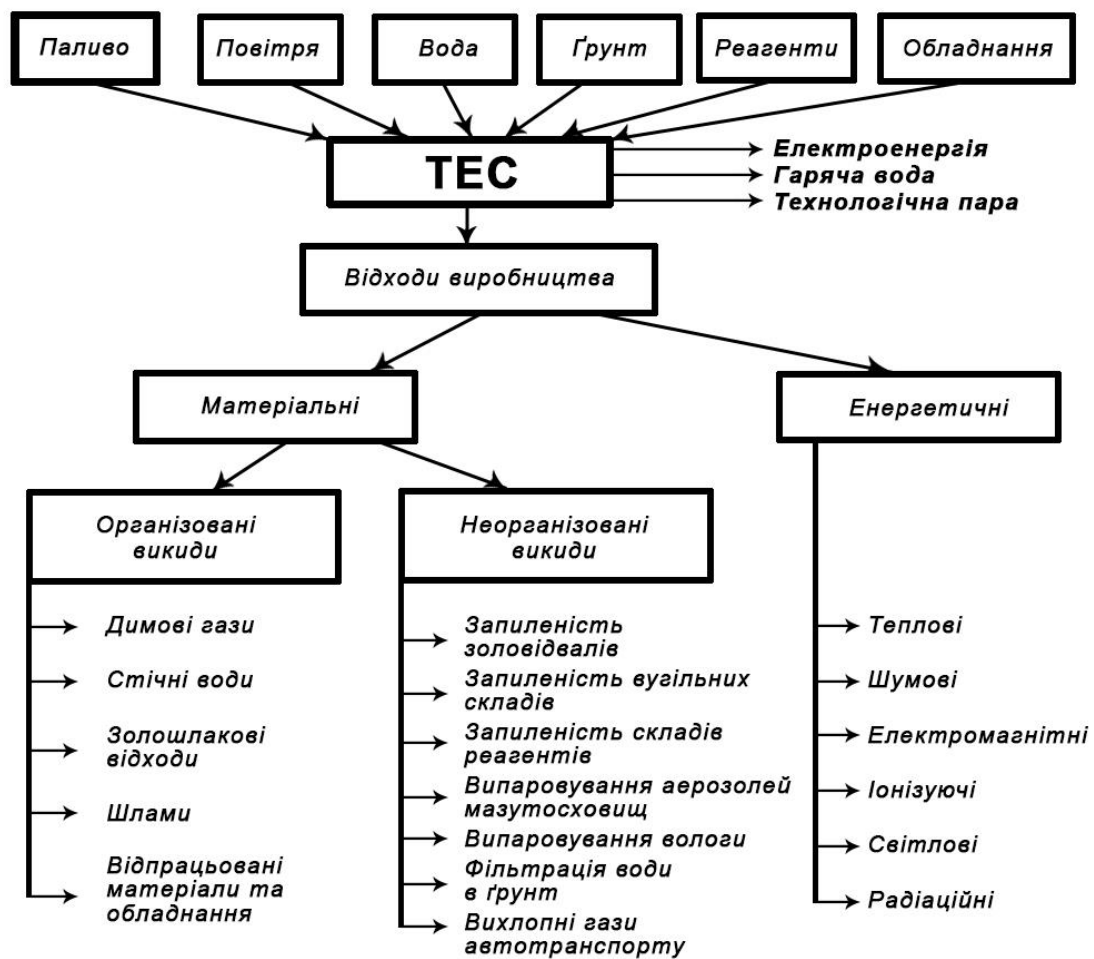


Рисунок 1.1 – Схема ресурсоспоживання і відведення відходів ТЕС в навколишнє природне середовище [15]

Під час аналізування негативного впливу теплоелектростанцій на стан навколишнього середовища комплексно враховують чинники:

- технологічну схему виробництва енергії та параметри енергообладнання теплової електростанції;
- вид і склад палива;
- природно-кліматичні умови;
- екологічний стан зони розміщення ТЕС.

Забруднення навколишнього природного середовища відбувається під час реалізації основних і допоміжних процесів на об'єктах теплоенергетики. У таблиці 1.1 наведені технологічні процеси на ТЕС та їх вплив на атмосферу.

Згідно з екологічними законами, повністю «безвідходні теплові електростанції» створити неможливо. ТЕС можна віднести до екологічно безпечних (або маловідходних), якщо негативний вплив на навколишнє середовище в процесі її експлуатації мінімальний і перебуває в межах «господарської ємності біосфери» (з урахуванням її здатності до самоочищення) [17, 18]. На такій тепловій електростанції максимально реалізуються технологічні процеси, що перешкоджають утворенню шкідливих твердих, рідких і газоподібних відходів, теплових відходів, а стічні води можуть використовуватися у замкнених циклах повторно й багаторазово, тверді виходять у товарному вигляді або можуть слугувати сировиною для суміжних виробництв, наприклад, у будівництві. Відхідні гази та стічні води повинні підлягати максимально глибокому очищенню, а обмежена кількість твердих відходів ТЕС надходить на тривале й безпечне зберігання. До таких теплових електростанцій необхідно віднести екологічно чисті ТЕС, що сьогодні розробляються в нашій країні [19–21].

Таблиця 1.1 – Вплив технологічних процесів ТЕС на атмосферу [15]

Технологічний процес	Обладнання	Хімічне забруднення	Фізичний вплив
Основні технологічні процеси ТЕС			
Транспортування та розвантажування палива	Мазутна естакада. Розвантажувальний пристрій вугілля. Газопровід	Вуглеводні, вугільний пил	Шум
Зберігання і перевалювання палива на складі	Склад вугілля, мазутосховище	Вугільний пил, продукти окиснення вугілля в штабелі, вуглеводні	Шум
Подача палива на спалювання	Паливоподача з аспіраційними установками, газопровід із продувними пристроями	Вугільний пил, вуглеводні	Шум
Спалювання палива	Котел із газопилоочисним устаткуванням, камери згоряння	Оксиди азоту, сірки, вуглецю, зола, пентаксид ванадію, бенз(а)пірен, мікроелементи	Теплове забруднення
Очищення поверхонь нагріву	Поверхні нагріву котла	Вугільна зола, зола мазутна, пентаксид ванадію	—
Подача повітря на спалювання	Вентилятори дуття, компресори	—	Шум, вібрація
Відведення димових газів в атмосферу	Димососи котла, що відводять газопроводи ГТУ	—	Шум, вібрація, теплове забруднення
Продування паропроводів	Скидні й продувні пристрої	Водяна пара	Шум
Охолодження циркуляційної води	Градирні, бризкальні басейни	Водяна пара	Шум, теплове забруднення
Складування золошлаків	Золовідвали	Зола, водяна пара, стічні води	Радіаційне забруднення

1.1.2 Основні напрями зменшення викидів і скидів ТЕС у навколишнє середовище

Політика в галузі охорони навколишнього середовища визначається необхідністю додержання екологічних норм на локальному, регіональному та глобальному локальному рівнях [13]:

– локальний рівень – це обмеження скидів і викидів забруднювальних

речовин, утворення відходів, фізичних впливів; за їх додержання забезпечуються нормативи якості навколишнього природного середовища в районі впливу теплоенергетичних об'єктів.

– регіональний рівень включає в себе обмеження скидів і викидів забруднювальних речовин за двосторонніми й багатосторонніми міжнародними угодами, конвенціями, зокрема Конвенцією про транскордонне забруднення повітря на великі відстані;

– глобальний рівень – це обмеження, встановлені Кіотським протоколом.

Системний характер екологічних заходів передбачає [22–24]:

– використання нових та більш ефективних технологій виробництва електричної на базі органічних палив, завдяки чому забезпечується значне зменшення витрат палива й негативний вплив на навколишнє природне середовище;

– вдосконалення структури паливного балансу теплоелектростанцій зі зменшенням частки високосірчистих і високозольних видів палива;

– оптимізацію структури генеруючих потужностей теплових електростанцій з урахуванням стану довкілля в місцях їх розташування;

– перехід на нові технології спалювання вугілля з метою зменшення або запобігання утворенню забруднювальних речовин (спалювання в киплячому шарі або у розплавленому шлаку, застосування композитного палива, вихрове спалювання, внутрішньоциклова газифікація палива, низькотемпературне каталітичне спалювання, тощо);

– нові технології водокористування на теплових електростанціях з метою скорочення витрат вихідної води з природних водойм, скорочення об'єму стічних вод (зневоднення шламів із поверненням води в цикл, повторне й послідовне використання стічних вод, використання оборотних систем тощо);

– застосування сучасних технологій очищення відхідних газів від шкідливих викидів, використання продуктів очищення в господарстві (шлак, зола, шлами);

- нові технології очищення стічних вод (безреагентні способи очищення, термічне знесолення тощо);
- надійну, економічну експлуатацію устаткування теплових електростанцій з використанням АСУ.

Проекти енерготехнологічних комплексів на базі екологічно безпечних теплоелектростанцій є перспективними. Вони забезпечують вироблення теплої електроенергії, сировини для різних галузей народного господарства (металургії, будівельної та хімічної індустрії). Реалізація цих комплексів зменшить техногенне навантаження об'єктів теплоенергетики на навколишнє середовище [22, 23].

1.1.3 Особливості енергетичних палив, що визначають екологічні характеристики ТЕС

Мінімальний вміст у паливі мінеральної частини, паливно-зв'язаного азоту та сірки, від яких залежать викиди твердих частинок і кислотоутворювальних компонентів (NO_2 , SO_2) є перевагами будь-якого палива в екологічному аспекті [25–26]. Більш того, на сьогодні паливо оцінюється ще й за вмістом горючих водню і вуглецю, останній під час спалювання утворює вуглекислий газ CO_2 , що є одним із основних парникових газів. У цьому разі враховують такі три групи факторів: екологічність палива, його екологічний потенціал, екологічну сумісність із навколишнім середовищем [25, 27–29].

До екологічного потенціалу палива відносять: вміст у ньому золи, азоту й сірки, а також уміст токсичних мікроелементів у мінеральній частині, таких як миш'як, ванадій, солі важких металів [28]. До цієї ж групи відноситься вміст радіонуклідів (урану та торію, калію, фосфору) та інші фізико-хімічні властивості золи, що мають вплив на роботу газоочисного обладнання.

Екологічна сумісність із навколишнім середовищем – це ступінь шкоди від того чи іншого шкідливого викиду з урахуванням складу ґрунту в зоні поширення цього викиду.

Екотехнологічність палива визначає можливість використання нових технологій для вирішення проблем, що виникають за традиційного способу спалювання вугілля. Продукти горіння твердих органічних палив наведені на рисунку 1.2.

Усі тверді палива (вугілля, сланці та торф) мають у своєму складі мінеральну масу, що утворює золу та шлак після спалювання [29]. Шлак видаляється з топки в розплавленому вигляді (стосується топок із рідким шлаковидаленням) або випадає в холодну воронку котла. Зола виноситься з топки з продуктами згоряння, велику її частину можна вловлювати в золоуловлювачах [30–32].

Зола виносу у своєму складі містить не лише мінеральну, а й горючу частину палива. Під час спалювання вугілля (наприклад, антрациту) вміст горючих в леткій золі досягає 10–20 % (за масою). Це впливає на погіршення використання палива, а також призводить до збільшення обсягів викидів [33, 34].

Зольність палива, а також реакційні властивості вугілля є важливими параметрами палив з точки зору забруднення атмосфери твердими частинками [32].

Викиди діоксиду сірки відбуваються під час спалювання палив, бо вони містять сірку у своєму складі. Це мазут й усі види твердого палива. Кількість SO_2 , що викидається з димовими газами, пропорційна витраті палива та вмісту сірки у вихідному паливі [35–38].

Утворення оксидів азоту відбувається з азоту повітря (швидкі й термічні NO_x) та азотовмісних компонентів у паливі (паливні NO_x). Частка паливних складових у топках із твердим шлаковидаленням висока – 95–100 %. Лише топки із рідким шлаковидаленням за T_{max} понад 1 600 °C характеризуються наявністю паливних і термічних NO_x [39–44]. На кількість паливних впливає реакційність палива та вміст зв'язаного азоту. Як екологічний параметр запропоновано використовувати безрозмірний параметр ξ_{NO_x} , що залежить від паливного коефіцієнта і вмісту азоту на суху масу палива

$$\xi_{NO_x} = \frac{C_{CB}}{V^{\Gamma}} + (1 + N^C), \quad (1.1)$$

де N^C – вміст азоту в сухій масі палива, %.

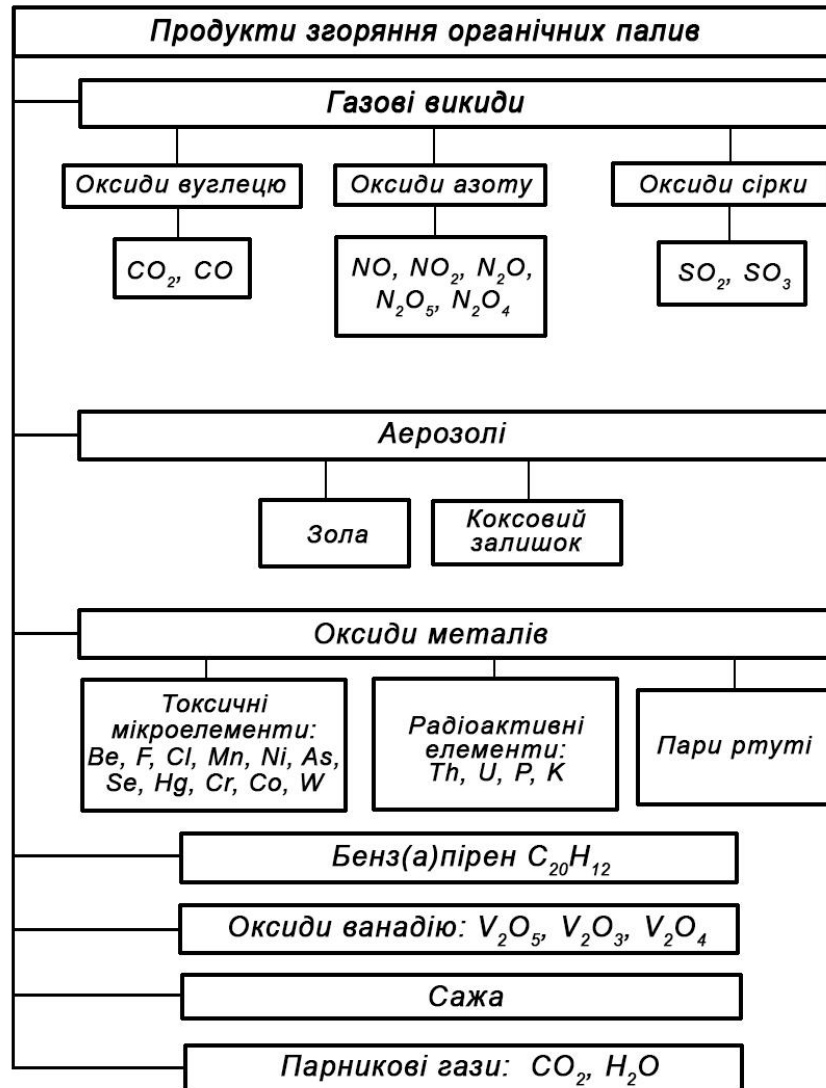


Рисунок 1.2 – Шкідливі викиди продуктів згоряння органічних палив [14]

Кількість NO_x , що виникають, лінійно залежить від цього параметра. Масовий викид шкідливих речовин залежить не лише від відсоткового вмісту золи, сірки та азоту в паливі, а й від витрати палива, що також залежить від теплоти згоряння палива [39]. Тому основним параметром, що характеризує кількість утвореної золи й діоксиду сірки, є їх вміст у паливі [45].

У таблиці 1.2 наведені дані, які характеризують екологічний потенціал деяких палив, що надходять до ТЕС [15].

Таблиця 1.2 – Екологічні параметри деяких видів палива [15]

Марка палива	A_{np} , % · кг/МДж	S_{np} , % · кг/МДж	FR	N, %	ξ_{NO_x}
Березовське вугілля 2Б	0,30	0,013	1,08	0,60	2,68
Гусиноозерське вугілля 3Б	4,3	0,033	1,32	0,88	3,11
Райчихінське вугілля 2Б	3,09	0,023	1,22	0,94	3,16
Челябінське вугілля 3Б	2,84	0,064	1,27	1,08	3,35
Кузнецьке вугілля Г	0,72	0,033	1,53	2,19	4,72
Кузнецьке вугілля 1СС	0,78	0,017	2,22	1,65	4,87
Нерюнгринське вугілля СС	2,33	0,008	4,01	0,67	5,68
Кузнецьке вугілля Т	0,92	0,014	6,14	1,66	8,47
Донецький АШ	1,91	0,082	23,6	0,55	25,2

З таблиці 1.2 бачимо, що найнепривабливішим з точки зору викидів NO_x , є донецький АШ, далі – кузнецький Т, нерюнгринський СС тощо. Найменша кількість паливних азотів утворюється під час спалювання березовського, гусиноозерського та райчихінського палива.

З таблиці 1.2 бачимо, що найбільш екологічним є вугілля Кузнецького басейну. Найбільша кількість сірки міститься в донецькому вугіллі, в горючих сланцях і сірчистому мазуті.

Під час спалювання кам'яного вугілля з великим значенням ξ_{NO_x} в конструкції топки необхідно передбачити комплекс заходів зі зменшення викидів NO_x , під час спалювання палив із малим значенням ξ_{NO_x} досить застосувати один із заходів для досягнення нормативних викидів [46–48].

В енергетиці використовуються природний газ, промислові гази (коксових і доменних печей) та попутний газ [48]. До їх складу входять в основному вуглеводні та молекулярний азот. У попутному газі може міститися в невеликій кількості сірка у вигляді H_2S . Продукти згоряння газів являють собою оксиди азоту, оксиди вуглецю, оксиди сірки, якщо вона наявна в газі, альдегіди, органічні кислоти (CH_3COOH) і циклічні ароматичні вуглеводні [49–51].

Останнім часом велика увагу приділяють викидам парникових газів, що руйнують озоновий шар атмосфери. До таких газів відносять ті, які містяться у викидах ТЕС: діоксид вуглецю CO_2 та оксид азоту N_2O , причому на частку CO_2 припадає 99,7 % [52–53]. Утворена під час горіння палива (особливо газу) водяна пара, з'єднуючись в атмосфері з оксидами сірки та азоту, наявними в димових газах, сприяють утворенню кислотних дощів. Тому паливо почали оцінювати за вмістом у ньому горючих вуглецю С і водню Н [54–59].

1.1.4 Класифікаційні екологічні параметри вугільного палива: індекс забрудненості, показник шкідливості

На екологічні показники (величину шкідливих викидів як в атмосферу, так і в систему золовидалення), а отже, й на величину шкоди, що завдається від підвищення шкідливих викидів, і на рівень істотних витрат, спрямовуваних на впровадження заходів щодо зниження цих шкідливих викидів і пом'якшення несприятливого їх впливу на навколишнє середовище, істотно впливають характеристики палива та його мінеральної частини: зольність вихідного палива, вміст сірки, вміст азоту в паливі, вміст у золі палива токсичних мікроелементів (миш'як, фтор, ртуть, хлор та ін.), а також токсичних мікроелементів важких металів (ванадій, хром, марганець, кобальт, нікель, цинк, свинець, мідь, берилій, фосфор, титан, стронцій) [60–62].

На екологічні показники роботи золоуловлювачів [63], системи золовидалення впливають такі властивості палива і золи, які оцінюються сукупністю характеристик, що визначили умови їх технологічного використання (в процесах золоуловлювання, газоочищення й золовидалення): питомий електричний опір золи; адгезійні й аутогезійні властивості частинок золи, вміст у золі вільного окису кальцію, радіоактивність золи і палива, фазово-мінералогічний склад золи (вміст у золі мінералів, здатних до гідратації й твердіння), абразивні властивості золи, вміст лужних металів у золі, зведені величини золи, сірки та інших елементів, що припадають на одиницю

теплотворної здатності палива і характеризують загальний обсяг викидів, пов'язаних із зростанням витрат палива за зниженням його калорійності, а отже, сумарного вмісту компонентів: $A_{\text{прив}}^r$, $S_{\text{прив}}^r$ тощо [64].

Для оцінювання якості палива з точки зору екологічного рівня забрудненості може бути використаний питомий показник – індекс забруднення, який визначається як відношення шкідливого викиду, що характеризує даний склад палива, до теплоти його згоряння (табл. 1.3):

$$U_3 = \frac{m}{100Q_i^r}, \quad (1.2)$$

де m – масова частка шкідливих речовин, що містяться в одиниці маси (об'єму) палива.

Таблиця 1.3 – Індекс забруднення характерних низькосортних енергетичних палив [64]

Паливо	Вологість, W^r , %	Зольність, A^d , %	Сірчистість, S^d , %	Вихід легких речовин, V^{daf} , %	Теплота згоряння Q_i^r , МДж/кг	Індекс забруднення навколишнього середовища	
						U_3^A	$U_3^{SO_2}$
Буре вугілля	14–60	4–45	0,5...7,5	40–63	5,0...16,0	2,5–9,0	0,5–3,0
Кам'яне вугілля ($A^d > 40\%$)	7–15	40–55	0,5–1,0	24–33	12,0–19,0	2,0–4,9	0,2–0,8
Відходи збагачення вугілля							
Шлам	3–33	20–45	0,2–0,3	5–33	16,7–21,5	9,3–27	0,1–1,8
Відсів	5,5–31	15–40	0,4–4,0	36–45	14,7–24,0	6,3–2,7	0,2–2,7
Промпродукт	6,6–15	26...46	0,3–9,0	20–44	14,9–22,0	12–3,1	0,2–6,0
Антрацитовий штиб							
Донбасу	4–14	15–32	0,4–3,6	2,4–7,0	20,0–27,7	5,4–16	1,15–1,8
Кузбасу	6–10	13–22,5	0,3–0,4	4–5,5	23,0–27,7	4,7–9,8	0,2–1,1
Торф	45–50	9–15	0,2–0,5	67–72	8,0–9,3	9,7–1,7	0,21–0,6
Горючі сланці	5–32	49–75	1,0–3,0	50–90	6,0–12,0	3,8–12	–
Рослинне (деревина) паливо	20–60	0,2–7,0	0,2–1,0	80	7,1–8,2	–	0,83–5,0

Індекс забруднення палива за зольністю

$$U_3^A = \frac{A^r}{100Q_i^r}. \quad (1.3)$$

Індекс забруднення за викидом сірчистих сполук

$$U_3^{SO_2} = \frac{S^r M_{SO_2}}{100 Q_i^r M_s}, \quad (1.4)$$

де A^r , S^r – відповідно зольність і сірчистість палива; M_s та M_{SO_2} – молекулярні маси відповідно сірки й діоксиду сірки.

У загальному вигляді показник сумарної шкідливості енергетичних палив «П» виражається сумою окремих показників шкідливості. Ці показники можуть бути зведені до безрозмірного вигляду, перераховані на умовне паливо, а токсичність тієї чи іншої екологічно шкідливої складової (домішки) враховується зіставленням ГДК_і з ГДК_н для нейтрального нетоксичного пилу [65].

Залежно від походження шкідливі речовини, що виділяються в атмосферу під час роботи ТЕС, можна поділити на чотири групи [65, 66].

До першої групи (I) речовин відносять двоокис сірки, летку золу, сполуки важких металів, уміст токсичних мікроелементів та інші домішки, кількість яких визначається складом палива і порівняно мало залежить від технології його спалювання.

До другої групи (II) речовин відносять домішки, кількість яких визначається як складом палива, так і технологією його спалювання: оксиди азоту, окис вуглецю, бенз(а)пірен та інші поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), формальдегіди та органічні кислоти. Показник шкідливості цих величин може бути поданий таким чином.

Для першої групи

$$П_i^I = \frac{1,45 \Gamma_i^r F (100 - \eta) M_z}{Q_i^r ГДК_i M_m}, \quad (1.5)$$

де Γ_i^r – вміст домішок у робочій масі палива, %; η – ступінь видалення даної домішки з газів, %; F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осадження шкідливих домішок в атмосфері; Q_i^r – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг; M_r і M_r – молекулярні маси домішок у паливі та газах (продуктах згоряння).

Для другої групи

$$P_i'' = \frac{1,45C_i V^r (100 - \eta) M_z}{Q_i ГДК_i} \quad (1.6)$$

де (на додаток до раніше перелічених величин) C_i – концентрація домішок в 1 м³ димових газів за нормальних умов, г/м³; V^r – обсяг газів, утворених під час спалювання 1 кг палива за нормальних умов, м³/кг.

Група III вміщує шкідливі домішки, зумовлені неорганізованим процесом горіння, що характеризується якістю палива і його станом: виділенням в атмосферу через запиленість вугільних складів, золовідвалів, вузлів пересипання та перевантаження; виділенням продуктів горіння (CO, CO₂ та ін.) внаслідок самозаймання палива, його самоокиснення; виділенням парів вуглеводнів у системі зливу мазуту з цистерн тощо.

Особливо істотна для цієї групи, наприклад, запиленість нерюнгринського вугілля. Це вугілля видобувають у зоні вічної мерзлоти, воно найбільш схильне до запилюваності, і традиційні аспіраційні системи під час його транспортування не справляються із забезпеченням знепилювання трактів та потребують спеціальних рішень (пінознепилювачів із використанням поверхнево-активних речовин та ін.).

Самозаймання, самоокиснення особливо характерні для вугілля Кансько-Ачинського басейну. Щоб виключити горіння на складі та виділення в атмосферу цілої гами продуктів самозаймання і тління в шарі, необхідні відповідні технічні рішення. Це вугілля відносять до групи з найвищою схильністю до самозаймання [67–69].

Основним негативним впливом на навколишнє середовище в разі експлуатації вантажно-складських комплексів є забруднення повітряного басейну вугільним пилом, що виділяється під час транспортування вугілля, його складування в штабелі, розвантаження вагонів, зберігання в штабелях [70].

Інтенсивності пилоутворення сприяють зниження вологості вугілля під час його зберігання, великий вміст у вугіллі дрібних фракцій, кліматичні умови [68, 71].

Найбільш негативно на навколишнє середовище впливає зберігання вугілля на відкритих складах. Закриті склади є найбільш екологічно чистими, однак вимагають значного підвищення капітальних витрат.

Середніми за ефективністю (і капітальними витратами) є вкриті склади. У разі їх використання забруднення навколишнього середовища значно знижується порівняно з відкритими складами. Однак вони потребують високих капітальних витрат на складське й вантажне устаткування і на зведення будівельних споруд; мають низький питомий коефіцієнт укладання штабеля; вимагають великих земельних відводів під територію складу; не виключають можливості змерзання вугілля в штабелі в зимовий час [72, 73].

Шкідливий вплив зберігання вугілля в штабелях знижується за рахунок: аспірації місць перевантаження вугілля з очищенням відсмоктуваного повітря; гідрозрошення місць запиленості в літній час; укриття вугільних складів будівельними конструкціями; обгороження вугільних складів ґратчастими конструкціями; поверхневого покриття штабелів емульсійної легкоруйнівною плівкою.

Під час зберігання й складування вугілля на ТЕС (30-добовий запас) необхідно:

- відчуження достатньої території для складування нормативного запасу з урахуванням можливостей подальшого розширення складу;
- виконання профілактичних заходів проти самозаймання палива;
- забезпечення захисту водного басейну від зливових стоків із території вугільного складу, повітряного басейну – від викидів пилу, а також продуктів горіння палива, пожежобезпеки розміщених поблизу будівель і споруд.

Під час зберігання кансько-ачинського вугілля, що швидко й активно самозаймається, без виконання спеціальних заходів спостерігаються сильна запиленість та загазованість. Це призводить до серйозних наслідків, навіть до обмеження діяльності виробництв, розміщених поблизу вугільного складу, і неможливості створення нормативного запасу палива. Стічні води вугільного складу можуть мати $pH = 2,7$, значний вміст сульфатів, цинку, міді, низки

токсичних елементів, що містяться у викопному вугіллі, зокрема миш'яку і фтору. Дуже небезпечним, із точки зору санітарно-гігієнічного впливу та екологічної чистоти, є вміст у вугільному пилу вільного двоокису кремнію. За впливу на людину це призводить до пневмоколіозу [73].

Ущільнений (фіброгенетичний) вплив двоокису кремнію зростає зі зменшенням пилових частинок. Особливо небезпечні частинки діаметром менше ніж 5 мікрон. Таких частинок на тракті подачі палива під час транспортування кузнєцького вугілля міститься 3,5 %, а під час транспортування нерюнгринського – до 10 %.

До IV групи можна віднести вугілля з екологічно шкідливим впливом, що має підвищені радіаційно-гігієнічні характеристики. До таких характеристик належать [74]:

- потужність експозиційної дози (ПЕД) гамма-випромінювання, що накопичується природними радіонуклідами (ПРН);
- концентрація природних радіонуклідів;
- питома ефективна активність вугілля, розрахована за мінімальними, максимальними й середніми значеннями концентрації ПРН.

Іонізуюче випромінювання ПРН, що містяться у вугіллі, підвищує радіаційний фон на вугільному складі ТЕС та в інших місцях, де накопичується й транспортується вугілля [74–76].

Концентрація природних радіонуклідів створюється в основному за рахунок умісту калію, торію-232 і радію, а також стронцію та інших елементів [77–79].

Радіаційна активність має місце і для золошлакової суміші (за вмістом у золі радіоактивних нуклідів).

Вищевикладені принципи обчислення і підсумовування часткових показників шкідливості P_i (або, що практично те саме, індексу забруднення U_3) досить об'єктивно відображають екологічний індекс палива. На основі такого методичного підходу можна класифікувати основні енергетичні палива, використовувані в Україні. Ця класифікація, на наш погляд, може бути базою

для ціноутворення палива, умов раціонального розподілу палива за регіонами для теплових електростанцій. Така система показників дозволяє встановлювати внесок до забруднення атмосфери кожної домішки або низки домішок під час їх сумачії, визначати умови, що забезпечують будь-яке потрібне співвідношення часткових показників шкідливості, розраховувати умови порівнянності варіантів.

Водночас можна також оцінити необхідний ступінь очищення газів, наприклад від золи (в разі обмеження висоти димової труби ТЕС 250,0 м). Вона залежить від наведеної зольності палива A^n та встановленої потужності ТЕС – N . Ефективність золоуловлювання залежно від потужності ТЕС і зольності палива

$$\eta = 100 - \frac{4,3}{A^n \sqrt[3]{N^2}}, \quad (1.7)$$

де A – коефіцієнт золоуловлювання, який беруть, наприклад, за наведеної зольності 4 % і менше – для КЕС-2400 і ТЕЦ-600, таким, що дорівнює 99 %; за наведеної зольності більше ніж 4 % – 99,5 %.

Необхідно мати на увазі, що якщо не обмежувати висоти димової труби 250,0 м, то капітальні витрати на спорудження такої димової труби будуть зростати пропорційно третьому ступеню кожного метра її висоти.

Під час взаєморозрахунків із постачальниками палива необхідно встановити нормативно-договірний (близький до середнього) рівень технічних показників, що безпосередньо впливає на екологічні показники, такі як уміст азоту в паливі, сірки, золи (зольність), ванадію.

Результати розрахунку часткових сумарних шкідливих умов, наприклад для кузнецького вугілля шахтного видобування марок ТР, 2СС, 1СС, наведені в таблиці 1.4 (як приклад розрахунку деяких компонентів).

Таблиця 1.4 – Приклад розрахунку шкідливих умов для деякого кузнецького вугілля [14]

Марка кузнецького вугілля	A^r , %	S^r , %	N^r , %	V_2O_5 , %	$\Sigma\Pi$	Π_{SO_2}	Π_{NO_2}	Π_3	$\Pi_{V_2O_5}$	$\Sigma\Pi'$
1СС	18,2	0,3	1,5	0,09	0,6843	0,0074	0,0569	0,45	0,17	0,0705
2СС	18,2	0,4	1,5	0,09	0,6657	0,0095	0,0572	0,43	0,16	0,0726
ТР	16,8	0,4	1,5	0,09	0,5947	0,0090	0,0557	0,38	0,15	0,0700

Примітка. $\Sigma\Pi'$ підраховували за умов ефективності золоуловлювання 99 %.

Фактично в разі надходження кузнецького вугілля з різних родовищ технічні характеристики, що безпосередньо впливають на величину показників шкідливості, коливаються в широких межах [14]:

– для вугілля підземного видобування $A^d = 18\text{--}30$ %, $S^d = 0,3\text{--}0,7$ %, $N^{daf} = 1,9\text{--}2,9$ %;

– для вугілля відкритого видобування $A^d = 16\text{--}25$ %, $S^d = 0,3\text{--}0,5$ %, $N^{daf} = 1,8\text{--}2,2$ %;

– для продуктів перероблення (збагачення) вугілля видобутку $A^d = 26\text{--}40$ %, $S^d = 0,4\text{--}0,9$ %, $N^{daf} = 2,1\text{--}2,9$ %.

Одночасно для цієї групи палива широко змінюється його калорійність, що значно впливає на загальні витрати палива, наведені характеристики, а отже, й на рівень викидів.

На підставі хімічних та атомно-абсорбційних методів досліджень установлено, що основні мікроелементи кансько-ачинського вугілля такі: кобальт, нікель, хром, ртуть, марганець, мідь, ванадій, цирконій, титан, олово, фтор. Із зазначених елементів марганець, ванадій, хром, кобальт, ртуть, фтор мають здатність накопичуватися в навколишньому середовищі. Миш'як має ефект сумачії в поєднанні з сірчистим газом та аерозолями сірчаної кислоти. Хром, нікель і кобальт відносять до особливо токсичних елементів, що характеризуються канцерогенними властивостями.

1.2 Класифікація котельних установок для спалювання палива з огляду на їх екологічну ефективність

Способами зниження викидів в атмосферне повітря, крім сучасних методів очищення, є використання технології екологічно чистого спалювання вугільного пального. Тому питання ефективного спалювання актуальне впродовж усього етапу розвитку теплоенергетики. Практично на кожній електростанції України, що працює на твердому паливі, ведеться пошук варіантів вирішення цього складного завдання [80–84].

Топковий пристрій є основою традиційних парових котлів, в ньому відбувається перетворення хімічної енергії палива на фізичну теплоту продуктів згоряння, яка передається через поверхні, що нагріваються середовищем (парою чи водою) [81].

За видом топкових процесів топки поділяються на такі: з нерухомим шаром палива, з киплячим шаром, з циркулюючим киплячим шаром, камерні (факельні) топки для спалювання твердого, твердого пилоподібного, газоподібного чи рідкого палива [80, 85–90].

З точки зору вмісту сірки, викиди якої з димовими газами сьогодні істотно обмежуються в навколишнє середовище, в перерахунку на горючу масу палива виділяють низько- (біовідходи, торф – до 5 кг на 1 тонну), середньо- (антрацит та кам'яне вугілля – 10–30 кг/т) і високосірчисте (шлами, всі види буровугільної продукції – більше ніж 40 кг/т) паливо. Під час спалювання в нерухомому шарі і в камерних топках викиди діоксиду сірки становлять 4 000 мг/м³ та більше за норми викидів 3 500 мг/м³ для діючих котлів. Для нових цей показник становить 200 мг/м³. Як бачимо, сіркоочищення димових газів необхідне для камерних топок і з нерухомим шаром [91–94].

Для топок із циркулюючим киплячим і киплячим шаром більше ніж 90 % сірки можна зв'язувати вапняком, що подається до топки [95].

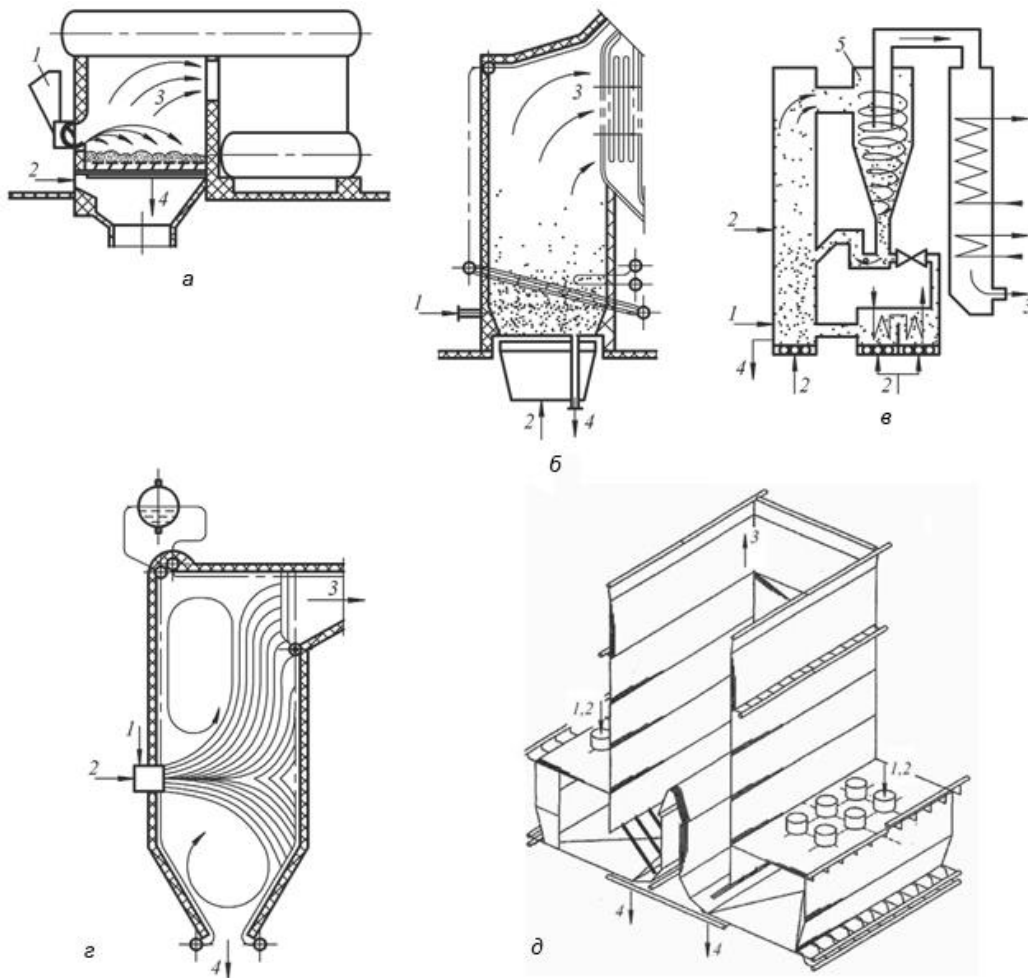


Рисунок 1.2 – Основні типи топок [80]: а – топка з нерухомим шаром; б – топка із киплячим шаром; в – топка із циркулюючим киплячим шаром; г – камерна топка; д – арочна топка (з плавильними передтопками); 1 – подача палива; 2 – дуття (подача повітря); 3 – вихід продуктів згоряння і золи виносу; 4 – відведення донної золи; 5 – циклон

Камерні топки

Принцип роботи камерних топок (рис. 1.2 г) [80] такий: паливо з повітрям подають в топку через пальники прямими чи закрученими потоками, воно запалюється за рахунок променистого теплообміну з ядром факела і гарячими стінками, потім ежектується високотемпературним потоком продуктів згоряння і далі за напрямком потоку горить у факелі. Для спалювання у факелі використовують тверде, рідке та газоподібне паливо. Тверде паливо має бути розмелене до пилоподібного стану. Внаслідок його різної питомої швидкості

горіння (реакційної здатності) воно потребує більше часу на згорання. Під час факельного спалювання час перебування паливних частинок у топці визначається шляхом ділення об'єму топки на витрату продуктів згорання за температури, що є середньою для топки. Якщо котли мають однакову паропроодуктивність, то витрата продуктів згорання слабо залежить від виду палива за номінального навантаження. Чим більша реакційна здатність палива, тим менший об'єм топки потрібний для спалювання [96, 97].

У камерних топках до спалювання тверде паливо треба розмелювати в спеціальних млинах до пилоподібного стану, вміст дрібних фракцій у вихідному паливі навіть бажаний. Однак вимоги до вологості й зольності палива для цього типу топок найбільш жорсткі, оскільки умови стабільного займання та горіння визначаються тепловим балансом нижньої частини топкового пристрою, де розміщене ядро факела. Здебільшого проектним паливом є вугілля, що має зольність не більше 20–22 %, вологість не більше ніж 10–14 %. Якщо зольність буде висока, то необхідна спеціальна конструкція топки або підсвічування факела мазутом чи природним газом. Вологість є критичною, бо вугільний пил залягає в трубопроводах і проміжних бункерах вище від певного її значення, хоча млини продувають нагрітим повітрям чи продуктами згорання, тобто таким чином підсушують паливо до допустимої вологості; у кожному конкретному випадку сушильна продуктивність млинів є обмеженою [96].

Перевагами факельного (камерного) способу спалювання є [91]:

- в камерних топках можна спалювати будь-який вид палива, навіть відходи вугілля, що утворюються в разі їх збагачення;
- знижене недоспалювання;
- можливість створення камерних топок на будь-яку, як завгодно велику потужність;
- надійність експлуатації за низьких коефіцієнтів надлишку повітря (навіть під час спалювання вугільного пилу).

До недоліків необхідно віднести такі:

- більш високі концентрації оксидів сірки й азоту;
- обмежена нижня межа продуктивності (теплова потужність не нижча ніж 20 МВт під час спалювання вугільного пилу), тобто ми не можемо спалювати вугільний пил у маленьких топках, особливо якщо режими роботи міняються;
- підвищені енерговитрати на власні потреби через необхідність попередньо готувати паливо (системи пилоприготування).

Топки з нерухомим шаром

У таких топкових пристроях (рис. 1.2 а) [80] паливо вільно розміщується на решітці та продувається повітрям знизу. Швидкість газоповітряного потоку в шарі є такою, що його піднімальна сила є меншою за вагу паливних частинок. Це досягається за рахунок їх великого розміру (більше ніж 6 мм). Калорійність палива важлива для підтримання горіння, тому в топках із нерухомим шаром спалюється зазвичай антрацит і кам'яне із зольністю не більше ніж 25 %, буре вугілля з вологістю не більше ніж 30 %, а також торф'яні та буровугільні брикети, деревні відходи та кусковий торф [88]. Якщо у паливі наявні дріб'язок, то це, навпаки, критично, бо він збільшує втрати недоспаленого вуглецю з унесенням та, що важливіше, перешкоджає вільному проходженню через шар окиснювача. В шарі через це виникають зони проскоку окиснювача. Як наслідок, виникають зони нерівномірного горіння, через що виникає локальне недоспалювання і викиди СО з димовими газами, та зони перегріву (як наслідок – прискорене руйнування решітки). Ось чому в нерухомому шарі вміст дрібних частинок в паливі суворо нормується: клас крупності 0–6 мм не перевищує 10–20 % за масою 96. В нерухомому шарі для спалювання краще підходить брикетоване паливо з малозольного бурого вугілля і торфу. Якщо брикетувати високозольне паливо, то це не призводить до ефективного згорання, тому що утворений на поверхні частково спалених брикетів шар шлаку перешкоджає проникненню окиснювача в глибину. Топки з нерухомим

шаром мають місце переважно в комунальних та промислових котельнях, проте в 90-х роках більшість їх перевели на спалювання природного газу [97].

Топки з киплячим шаром

У таких топках (рис. 1.2 б) [80] використовується паливо класу крупності від 0–6 мм до 0–25 мм (можуть використовуватись біовідходи – до 50 мм). У шарі вага частинок зрівноважується піднімальною силою газоповітряного потоку, внаслідок цього виникає інтенсивне тепломасоперенесення по перерізу шару та по висоті – псевдозрідження [98–100]. Площа живого перерізу, а отже, й швидкість газу у надшаровому просторі менші (не більше ніж 1,0–2,5 м/с), тому більшість частинок, винесених із шару, повертаються назад до шару. Середня температура шару не перевищує 950 °С, а палаючі частинки не перегріваються, через те що частка їх у шарі невелика та вони оточені інертними газами. За таких умов не утворюється велика кількість оксидів азоту, а оксиди сірки можливо зв'язувати до хімічно інертного гіпсу вапняком, що подаються в шар. Киплячий шар не вимає високої якості палива: в ньому можна успішно спалювати вугілля й вуглецевмісні відходи із зольністю не більше ніж 70 %, а також малозольні з вологістю не більше ніж 60 % [101]. Як паливопідготовку, насамперед для низькорекційного палива, використовують метод гранулювання паливних частинок. Паливні гранули до 13–25 мм у киплячому шарі згоряють повністю за рахунок тривалого часу перебування у топці та обмежених температур горіння, що нижче ніж точка плавлення золи. За кордоном топки дуже поширені на парових і водогрійних котлах продуктивністю не більше ніж 100 т/год [95, 102–105].

Порівняно з пиловугільними котлами, серед переваг топок із киплячим шаром можна виділити такі [95, 106]:

- високий коефіцієнт конвективного теплообміну;
- довготривале перебування паливних частинок у киплячому шарі, що забезпечує спалювання подрібненого палива, відходів виробництва, вугілля з підвищеною зольністю;
- можливість створення більш компактної топки без необхідності в

системі пилоприготування;

– зв'язування сірки шляхом додаванням до шару вапняку, що зменшує викиди оксидів сірки в атмосферу;

– низька температура в шарі (приблизно 800–950 °С) забезпечує ліквідацію термічних оксидів азоту та призводить до скорочення викидів оксидів азоту в цілому.

Топки з циркулюючим киплячим шаром

Для організації процесу горіння в киплячому шарі наявність дрібнодисперсних частинок у паливі не є критичною, на відміну від нерухомого шару, коли ефективність горіння істотно зменшується [80, 107–109]. Це пов'язано з тим, що дрібнодисперсні частинки (менші за 0,5 мм) виносяться з шару та назад не повертаються. А горіння дрібнодисперсних частинок припиняється, тому що температура в надшаровому просторі нижче температури у шарі. Вловити ці дрібні частинки та повернути в шар на допалювання малоефективні, оскільки циклони вловлюють до 70% пилоподібних частинок. Коли паливо почали дробити нижче 0–3 мм, а швидкість газу на переріз топки збільшили до 5–7 м/с, відбувся якісний стрибок. В умовах, коли потужний потік частинок 0,1–1 мм виноситься з шару, ККД циклону збільшується до 99 % і більше, бо добре вловлювані частинки зазначеного розміру захоплюють за собою більш дрібні частинки. Таким чином і виникли топки ЦКШ (рис. 1.2 в) [80, 110].

Їх відмінність полягає в тому, що циклон встановлюють одразу за топковим пристроєм, у ньому всі недогорілі частинки повертаються назад до топки (рис. 1.3). Тобто частинки виявляються «замкненими» в системі «топка – циклон – топка», поки не згорять. Топки з ЦКШ не поступаються камерним за економічністю, але зберігають всі екологічні переваги [95, 110].

Отже, топки з ЦКШ мають більш високий ступінь згорання палива (приблизно 98–99 %, у той час, як у камерних топках він становить 90–95 %). Для них характерен менший коефіцієнт надлишку повітря [104, 105].

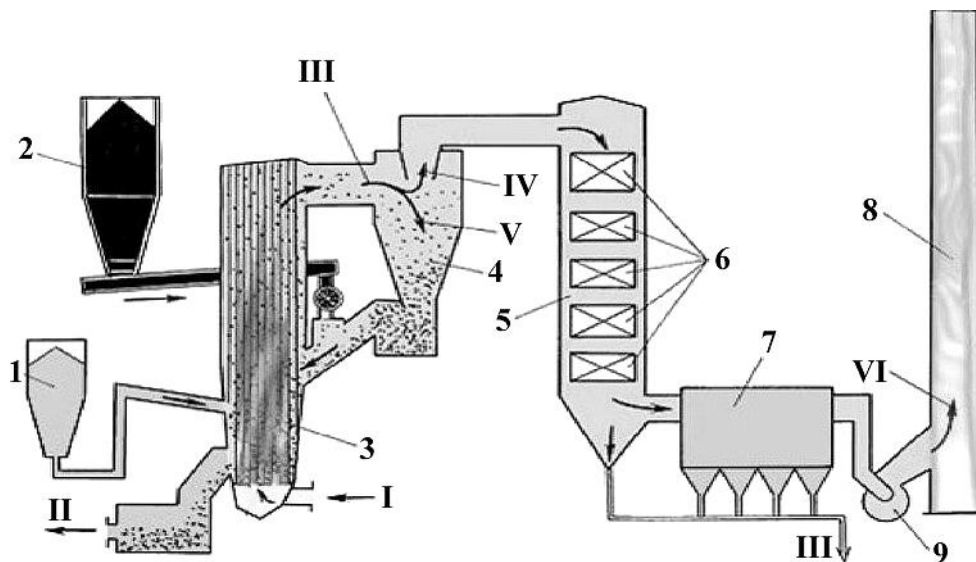


Рисунок 1.3 – Організація процесу горіння в ЦКШ:

1 – бункер з вапняком; 2 – бункер з вугіллям; 3 – киплячий шар; 4 – циклон;
 5 – шахта конвективна; 6 – поверхні нагріву; 7 – електричні фільтри; 8 – труба;
 9 – димосос; I – дуття (подача повітря); II – шлак, що направляється на
 шлаковідвал; III – продукти згоряння та частинки повітря; IV – продукти
 згоряння, що направляються в конвективну шахту; V – повернення частинок на
 допалювання; VI – пилогазові викиди в атмосферу

Дослідження, спрямовані на прикладне використання технології ЦКШ, беруть початок із середини 70-х років. У 1979 році в Фінляндії побудували перший енергетичний котел з циркулюючим киплячим шаром [104].

На сьогодні розробниками цієї технології є Foster Wheeler, Babcock&Wilcox, основний споживач таких реакторів з ЦКШ – це Китай. Індія та В'єтнам також проявляють помітний інтерес до цієї технології, бо мають великі запаси вугілля.

Що стосується вимог до якості палива, то у ЦКШ вони не жорсткіші, ніж у киплячого шару, але ефективність згоряння твердого палива, зокрема того, що містить дрібні частинки, взагалі вища. Технологія має кращі показники щодо зв'язування оксидів сірки за рахунок тривалого утримування в топці вапняку. За викидами NO_x – внаслідок організації відновної зони між уводами первинного і вторинного дуття [110].

Для топків із ЦКШ характері менші масштабні обмеження, вони використовуються в котлах великих енергоблоків електричною потужністю 300 МВт і більше, а також в малих парових та водогрійних котлах, як топкові пристрої з нерухомим і киплячим шаром. Регулювання навантаження таких енергоблоків з ЦКШ складає 40–100 %. Варто відмітити, що для роботи котлів з циркулюючим киплячим шаром за рівнем зольності для спалювання підходять шламові відходи із зольністю не більше ніж 60 %, яких накопичено до 150 млн тонн (приблизно 70 млн тонн умовного палива). Утилізація цього типу відходів розширила б паливну базу для теплової енергетики та вирішила б екологічні проблеми із рекультивацією площ, що зайняті мулонакопичувачами. Агломерація високозольного шламу є необхідною умовою для спалювання його в ЦКШ. Це можна забезпечити під час сушіння за рахунок природної глинистої компоненти [95, 101].

Процес спалювання в циркулюючому киплячому шарі вважається процесом, забезпечуючим низький рівень викидів забруднювальних речовин. Завдяки йому можливо ефективно вловлювати діоксид сірки за рахунок використання вапняку. При цьому для процесу абсорбції умови у топці є досить сприятливими. Тому в циркулюючому киплячому шарі оксиди сірки вловлюють дуже ефективно, ніж під час вприскування вапна в топку з пиловугільним спалюванням. Також не утворюються «термічні» оксиди азоту з азоту повітря. Крім того, ступінчата подача повітря дозволяє також зменшити рівень NO_x [103].

Основні переваги котельних пристроїв з ЦКШ такі:

- ефектне спалювання високозольних та низькокалорійних палив, а також тих, що мають малий вміст летких речовин, стабільна температур в топці, низький вміст в шарі вуглецю, досить тривалий час перебування коксозольного залишку в реакційній зоні;

- ефектне зв'язування сірки завдяки дешевому способу подачі в топку вапняку;

- низькі викиди оксидів азоту (не більше ніж 200–300 мг/м³), при цьому не

потрібні спеціальні засоби видалення азоту;

– спрощена схема підготовки палива, можливість спалювання палива різної якості в одному котлі, швидкий пуск із «гарячого» стану, гарні динамічні характеристики;

– компактність котельної установки, оскільки засоби очищення від сірки та азоту відсутні, що дає можливість розмістити ЦКШ-котел в існуючих котельних комірках.

Низькотемпературна вихрова технологія

Ця технологія є сучасною ефективною технологією енергетичного використання твердого органічного палива. Такий спосіб спалювання і топковий пристрій розробили під керівництвом радянського вченого-теплоенергетика В. В. Померанцева на кафедрі «Реакторо- і парогенераторобудування» Ленінградського політехнічного інституту (Санкт-Петербурзький державний політехнічний університет, СПбДПУ). У період із 1970 р. до 1990 р. НТВ технологія була апробована в енергетиці [111–114].

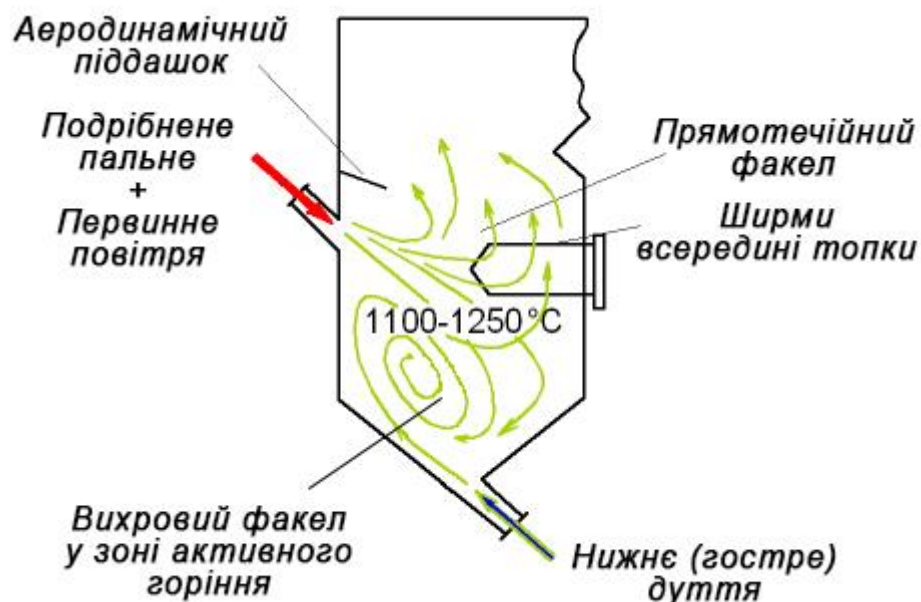


Рисунок 1.4 – Низькотемпературна вихрова топка В. В. Померанцева

До переваг технології низькотемпературного вихрового спалювання відносять гарантоване забезпечення стійкого займання і горіння твердого палива без підсвічування газом та мазутом, поліпшені екологічні показники й

усунення шлакування. Низькотемпературну вихрову технологію спалювання можна реалізувати шляхом модернізації котла в традиційній камерній топці [114].

У традиційній технології пиловугільного спалювання основна частина палива згорає в зоні активного горіння (рис. 1.4). Ця зона розміщена біля пальників і займає відносно невеликий обсяг камерної топки. А в топці з низькотемпературною вихровою технологією спалювання ця зона займає значно більший обсяг топкового простору. В результаті в топці створюється можливість вирівняти рівень температури в об'ємі вихрової зони за рахунок активної аеродинаміки і знизити на 100–300 °С максимальну температуру.

За рахунок багаторазової циркуляції палаючих паливних частинок, ступеневого введення окиснювача і зниженого рівня температури вихрових топок забезпечуються поліпшені показники за викидами оксидів сірки та азоту, а також підвищується ефективність роботи золоуловлювального обладнання.

Низький рівень температури в зоні активного горіння і ступінчасте підведення окиснювача до палива обумовлюють зниження оксидів азоту. Температура згорання продуктів у топці низькотемпературного вихрового спалювання не перевищує 100–250 °С. У таких умовах «термічні» оксиди азоту утворюються в малій кількості. Порівняно з традиційною технологією спалювання в топках НТВ-спалювання концентрація оксидів азоту в 1,2–2,0 рази нижча [114].

Крім того, ця технологія створює гарні умови для зв'язування оксидів сірки. Тривале перебування у вихровій зоні та велика поверхня реагування частинок золи сприяють зв'язуванню оксидів сірки з основними оксидами мінеральної частини палива (CaO, MgO). Ступінь зв'язування оксидів сірки вищий на 20–50 % (залежно від марки палива) порівняно з технологією прямоотечійного факела. Також необхідно зазначити, що умови вихрової топки дозволяють застосовувати різні сорбенти на основі CaO для підвищення ступеня зв'язування оксидів сірки.

Основними недоліками є високе питоме енергоспоживання, підвищене механічне недоспалювання через віднесення великих частинок й ерозія внутрішньотопкових поверхонь нагріву, низька ефективність роботи на паливах із високою вологістю і зольністю, зважаючи на те, що покриття внутрішньої поверхні топки спікається золою, а також складність видалення спеченої золи.

Висновки до розділу 1 та поставлення завдання дослідження

Проведений аналіз теоретичних і практичних досліджень із проблем впливу об'єктів теплоенергетики на довкілля, показана необхідність подальшої деталізації, конкретизації впливу викидів процесу горіння, низки природних і техногенних факторів під час моделювання техногенного навантаження. На підставі проведеного патентно-літературного дослідження показано, що недостатня вивченість процесів деструкції палива неможливості повною мірою прогнозувати стан об'єктів навколишнього природного середовища в зоні впливу об'єктів теплоенергетики.

Результати проведеного аналізу дали можливість сформулювати актуальність поставлених досліджень у дисертаційній роботі, наукових завдань та визначити основні напрямки досліджень:

- провести аналіз впливу об'єктів теплоенергетики на довкілля та факторів, що захищають навколишнє природне середовище;
- провести математичне моделювання процесу забруднення навколишнього природного середовища;
- оцінити вплив об'єктів теплоенергетики на екологічний стан прилеглих територій;
- розробити заходи щодо зниження впливу об'єктів теплоенергетики на довкілля.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [1, 18–21].

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика Чернігівської ТЕЦ як об'єкта дослідження

Об'єкт дисертаційного дослідження – вплив викидів ТЕС на стан навколишнього природного середовища.

Масштаби техногенного впливу об'єктів теплоенергетики на навколишнє середовище розглянемо на прикладі КЕП «Чернігівська ТЕЦ» ТОВ фірми «ТехНова», яка є головним джерелом постачання теплової енергії для міста Чернігова. КЕП «Чернігівська ТЕЦ» є найбільшим забруднювачем повітря Чернігівської області. За 2019 рік викиди даного підприємства становили 9,488 тис. тонн – це 34,6 % від загального обсягу викидів у Чернігівській області. Тому має місце значний негативний вплив на навколишнє середовище [115].

Установлена потужність Чернігівської ТЕЦ – 210 МВт, потужність виробництва електроенергії в середньому – 957 583 тис. кВт · год, теплової – 723 646 Гкал. Як паливо на ТЕЦ використовується вугілля марки АШ, а також природний газ.

За даними інвентаризації викидів, Чернігівська ТЕЦ викидає в атмосферне повітря 24 забруднювальні речовини, серед них – ртуть, свинець, оксиди міді, нікелю, хром, миш'як, цинку, марганець, залізо та інші. Перехід на тверде паливо зумовив збільшення викидів важких металів.

Золошлаконакопичувач, вугільне поле та реагентне господарство є потенційними джерелами забруднення об'єктів гідросфери, зокрема підземних вод [116]. Крім того, можлива міграція забруднювальних речовин із зони аерації ТЕЦ, де вони, осідаючи з відхідних газів на поверхню ґрунту, переносяться по профілю ґрунту з опадами, талою водою. У зоні розміщення золошлаконакопичувача за рахунок забруднення прилеглих територій у разі пиління міграція шкідливих речовин також має місце.

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

Негативним чинником діяльності підприємства є значні обсяги утворення золи від спалювання вугілля. Золошлакові відходи шляхом гідротранспортування надходять у золошлакозакладачі. На сьогодні резерв вільних площ золозакладача № 2 вичерпано [117].

2.2 Природно-кліматична характеристика району дослідження

Природно-кліматичні умови району розміщення промислового підприємства – одним із факторів, що впливають на поширення ЗР.

Температура холодного місяця (січень) $-5,9$ °С, найбільш жаркого (липень) $+19,2$ °С. Абсолютна мінімальна температура -34 °С, абсолютна максимальна температура $+39$ °С.

Згідно з ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування», за характеристичними значеннями ваги снігового покриву розміщення проммайданчика ТЕЦ належить до шостого району зі значенням 1720 Па. Середня дата появи снігового покриву – 10–15 листопада, сходження снігу – 25–31 березня. Найбільша кількість днів зі сніговим покривом припадає на січень: у цьому місяці сніговий покрив спостерігається 26 днів із 31. Найбільш ранні дати випадання снігу відзначаються на початку жовтня. Стійкий сніговий покрив устанавлюється щорічно, середні дати його припадають на середину грудня. Руйнування стійкого снігового покриву в середньому настає в кінці березня, найбільш пізні терміни – в кінці квітня. Висота снігового покриву: середня – 23–26 см, найбільша – 56 см. Глибина промерзання ґрунту: середня – 80 см, найменша – 15 см, найбільша – 169 см.

Початок весни зазвичай припадає на березень – квітень. Літо в Чернігівській області помірно жарке. Для літа характерні спекотні періоди,

проте іноді спостерігається похолодання. Восени спостерігаються окремі повернення тепла (кілька періодів «бабиного літа»).

Згідно з ДБН В. 1.2–2:2006 територія Чернігівської ТЕЦ належить до другого вітрового району. Нормативне значення вітрового тиску становить 410 Па. У районі розміщення проммайданчика ТЕЦ взимку домінують південно-західні й західні вітри зі швидкістю 4,2 м/с, влітку – північні й західні (3,1–3,2 м/с). Штиль спостерігається в 11,2 % випадків у січні і в 21,8 % випадків – у липні.

Середня відносна вологість за 1 рік становить 78 %. Середня місячна відносна вологість повітря в січні – 85 %, у липні – 72 %. Середньорічна кількість опадів становить 595 мм. Велика кількість опадів випадає у вигляді дощу. Найбільш вологий місяць – липень. Упродовж зими випаровування незначне – 1–9 мм. У весняний період сумарне випаровування різко зростає внаслідок збільшення радіаційного балансу і значних вологозапасів ґрунту. Найбільших значень випаровування досягає в липні – 102 мм.

Метеорологічні характеристики району розміщення Чернігівської ТЕЦ наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Метеорологічні характеристики району розміщення Чернігівської ТЕЦ

Характеристика	Величина
Коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери, А	180
Середня максимальна температура повітря найбільш жаркого місяця, °С	26,8
Середня температура повітря найбільш холодного місяця, °С	-8,2
Коефіцієнт рельєфу місцевості	1
Середньорічна роза вітрів, %	
Пн	14
Пн-С	8
С	12
Пд-С	9
Пд	14
Пд-Зх	11
Зх	18
Пн-Зх	14
Швидкість вітру (U_m), за середніми багаторічними даними, ймовірність перевищення якої в році становить 5 %, м/с	6–7

2.3 Методи контролю за впливом ТЕЦ на навколишнє середовище

2.3.1 Контроль стану атмосферного повітря

З метою контролю викидів ЗР в атмосферу проводяться:

- контроль обсягів викидів ЗР, зокрема, утримання й кількості викидів забруднювальних речовин;
- порівняння кількості викидів ЗР та їх вмісту із нормативами ГДВ і технологічними нормативами;
- звітність із контролю за викидами та облік викидів.

Система контролю за викидами установок спалювання на об'єктах теплоенергетики повинна забезпечувати виконання вимог ЗУ «Про охорону атмосферного повітря», галузевих нормативних документів, дозволів на викиди ЗР, а також одержати:

- інформацію про додержання гранично допустимих і технологічних нормативів викидів ЗР;
- систематичні дані про викиди ЗР, вихідні дані до звітності за формою № 2-ТП (повітря);
- дані для виявлення й аналізу причин, у разі перевищення показників нормативів.

Забруднювальні речовини, що викидаються в атмосферу при спалюванні на ТЕЦ та підлягають контролю, є такі:

- суспендовані тверді частинки, недиференційовані за складом;
- оксид вуглецю;
- оксиди азоту;
- двоокис сірки (ангідрид сірчистий).

Обсяг газів та вміст забруднювальних речовин, що відходять від топкових пристроїв, повинен бути супроводжений вимірами вмісту в димових газах кисню, а також температури й тиску цих газів для приведення вимірних значень вмісту забруднювальних речовин та обсягу газів до нормальних умов газу і встановленим умістом кисню. Система газового аналізу включає низку

приладів для вимірювання швидкості та хімічного складу видхідних газів, концентрації пилю.

Для приведення витрати димових газів до нормальних умов у місці встановлення датчиків вимірювання швидкості встановлюють датчики для вимірювання температури й тиску димових газів.

Газоаналізатор комплектують шафою, розміщеною в приміщенні газоаналізу.

Прилади системи моніторингу встановлюють за димососом на газоході.

Для забезпечення необхідної точності вимірів місця встановлення приладів ущільнюють.

2.3.2 Контроль стічних, поверхневих та підземних вод

Моніторинг підземних вод промислового майданчика Чернігівської ТЕЦ повинен здійснюватися методами контролю рівневого й гідрохімічного режимів з метою запровадження регулярних спостережень за станом та якістю цих вод на території можливого впливу.

Завдання локального моніторингу підземних вод на території об'єкта теплоенергетики – проведення регулярних спостережень за їх станом гідрохімічними і гідродинамічними дослідженнями, а саме:

- аналіз стану підземних вод, виявлення забруднень і прогнозування їх змін;

- надання оперативної та систематичної інформації про стан підземних вод з метою розроблення обґрунтованих рішень з охорони навколишнього природного середовища.

Сьогодні систематичний контроль стану підземних вод території промислового майданчика проводиться співробітниками електроцентралі по відомчій мережі режимних свердловин.

Стаціонарний контроль проводять по всіх свердловинах, перебуваючих у належному технічному стані, що відповідає чинним вимогам, і придатних для повноцінного випробування підземних вод.

Під час стаціонарних спостережень повинні дотримуватися загальноприйнятні методики, що використовуються в гідрогеологічній практиці контролю. Не рідше ніж один раз на місяць проводять вимірювання рівня води у свердловині за допомогою електрорівнемірів різних модифікацій або рулетки з хлопакою.

Результати цих вимірювань фіксуються у спеціальному журналі.

Проби води для хімічного аналізу відбирають за допомогою пробовідбірників. Обов'язковою умовою в цьому разі є механічне або ручне прокачування свердловин з одночасним витягуванням не менше ніж двох об'ємів води, що міститься в стовбурі.

Періодичність відбору проб – двічі за 1 рік у періоди, що характеризуються високим і низьким стоянням підземних вод. Найбільш зручний для цього – період передвесняного мінімуму та період осіннього або весняного максимуму рівня. Така частота є достатньою для встановлення факту забруднення підземних вод як за розрізом, так і за площею.

Відбір проб можна скоротити до одного разу за рік, якщо мають місце незначні сезонні зміни у режимі хімічного складу і вмісту забруднювальних речовин або їх відсутності. Якщо в пробах підземних вод виявлені забруднювальні речовини на рівні вище від ГДК, то частоту відбору проб збільшують до 4 разів за 1 рік. Спостереження можна проводити щоквартально або в періоди, характерні в режимі підземних вод (весняний і осінній максимальні рівні або передвесняний і літньо-осінній мінімальні). Якщо в пробі виявлені забруднення, що перевищують рівень ГДК, то відбір проб має бути проведений повторно із виконанням повторного аналізу.

Відібрані проби води підлягають повному хімічному аналізу з визначенням сольового складу, вмісту біогенних елементів, забруднювальних речовин токсичної дії. Обсяг спостережень за станом поверхневих вод залишається на існуючому рівні.

2.3.3 Контроль ґрунтів

Під час еколого-геохімічних досліджень ґрунтів проводять ландшафтно-геохімічне картування і випробування ґрунтів у районі розміщення ТЕЦ, визначають комплекс речовин, що є потенційними забруднювачами, установлюють рівень забруднення, площу поширення та ступінь небезпеки.

В зоні можливого впливу ТЕЦ моніторинг повинен включати постійні спостереження за станом ґрунту. При цьому контроль здійснюють за двома показниками: хімічними та радіологічними.

Хімічні показники включають вміст таких компонентів: нафтопродукти та рівень рН, важкі метали, нітрити та нітрати, свинець, ртуть, миш'як.

Оцінювання рівня забруднення ґрунтів виконується зіставленням фактично спостережуваних концентрацій забруднювальних речовин токсичної дії з їх фоновими концентраціями та ГДК.

Стаціонарні спостереження виконують не рідше ніж один раз на 3 роки за допомогою загальноприйнятих методик, використовуваними в практиці контролю ґрунтів.

Відбір проб для проведення хімічного контролю забруднення ґрунтів повинен здійснюватися на спеціальних майданчиках розміром 5 м × 5 м за методом конверта.

На кожному пробному майданчику відбирається по п'ять точкових проб масою 0,2 кг, потім допомогою змішування з них утворюють об'ємну пробу масою 1 кг. Проби відбирають на глибині до 0,2 м у спеціальні пакети, наклеюють етикетку встановленого зразка.

Моніторинг стану ґрунтів проводять упродовж усього періоду експлуатації об'єкта теплоенергетики. Його результати повинні узгоджуватися з даними моніторингу підземних і поверхневих вод.

2.3.4 Контроль впливу відходів на довкілля

Основна маса відходів, утворюваних у процесі реконструкції Чернігівської ТЕЦ, належить до 4-го класу небезпеки. Водночас деякі види відходів, утворюваних на тепловій електроцентралі, становлять небезпеку для здоров'я населення та стану навколишнього природного середовища.

Найважливішими складовими зниження техногенного впливу на довкілля є організація моніторингу та контролю за утворенням і накопиченням, зберіганням та утилізацією відходів.

На цей час на Чернігівській ТЕЦ функціонує система поводження з відходами. На підприємстві за збирання та належне зберігання відходів призначені відповідальні особи, які ведуть первинний облік кількості відходів, що утворюються, зберігаються й утилізуються, визначені місця збору і майданчики для тимчасового зберігання. Договори з організаціями на утилізацію відходів укладаються своєчасно.

Спостереження та контроль за впливом утворюваних відходів на навколишнє природне середовище передбачає таке:

- постійний кількісний облік утворення, накопичення і використання відходів;
- один раз на квартал визначають приземні концентрації пилу на прилеглий до шлакових територій;
- один раз на рік визначають вміст важких металів у ґрунтах на прилеглий до шлакових територій.

Для розміщення відходів, утворюваних у процесі подальшої експлуатації Чернігівської ТЕЦ, додаткові площі не використовуються. Передбачені на

підприємстві способи утилізації відходів дозволяють зменшити техногенне навантаження на навколишнє середовище.

Додаткові заходи з організації контролю щодо поводження з відходами відсутні.

Поводження з відходами при дотриманні санітарно-екологічних правил збирання, зберігання та утилізації відходів дозволяє мінімізувати негативний вплив на навколишнє природне середовище та комфортність проживання населення.

2.4 Методика вивчення масоперенесення забруднювальних речовин у ґрунтах

Масоперенесення забруднювальних речовин у ґрунтах досліджували на експериментальній установці, представленій на рисунку 2.1.

Вона складається з циліндричної колони довжиною 30 см (1) з досліджуваним матеріалом (3) і посудини (2) для подавання фільтрату. Складові експериментальної установки закріплені на штативі, завдяки чому вона є компактною. Циліндрична колонка розбірного типу, складається з плексигласових кілець із внутрішнім діаметром 5 см, висотою 1 см. Зразок ґрунту у циліндрі розміщений над колбою (6) для збирання фільтрату. Для запобігання розмиву зразка ґрунту на його поверхні розміщений фільтр. Дно колонки виконане з тканинного фільтра (5), який приклеєний до нижнього кільця, в яке вмонтовані електроди (4). Електроди за допомогою моста змінного струму (7) дають змогу вимірювати концентрацію водорозчинних речовин у вихідному перерізі фільтраційної колони.

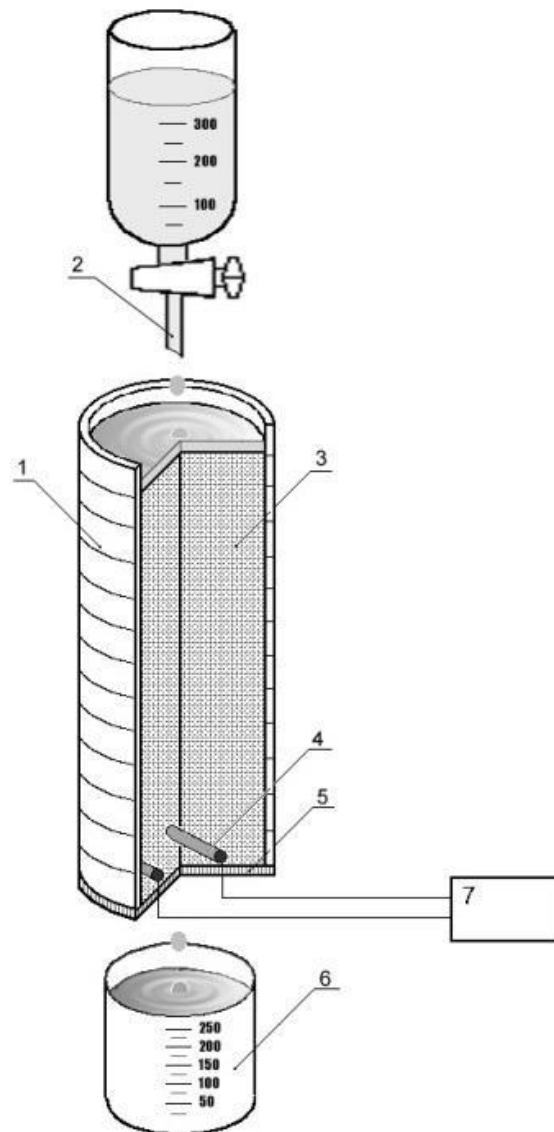


Рисунок 2.1 – Експериментальна установка з вивчення фільтрації забруднювальних речовин: 1 – колонка; 2 – посудина; 3 – досліджуваний матеріал; 4 – електроди; 5 – фільтр; 6 – колба; 7 – електричний міст

2.5 Методика дослідження сорбційних здатностей протифільтраційного екрана

Дослідження структури глини за допомогою рентгенодифракційного методу

Для проведення досліджень використовували автоматизований дифрактометр ДРОН-4-07 (НВП «Буревісник», Росія). Система його

автоматизації базується на мікропроцесорному контролері, що забезпечує передавання даних у цифровому вигляді на ПК і керування гоніометром ГУР-9. Результати експериментів передавалися безпосередньо у програмний пакет DifWin-1 (ТОВ «Еталон ПТЦ», Росія). З метою ідентифікації кристалічних фаз дані із цього пакета передавали в програмний комплекс Crys-tallographica Search-Match Oxford Cryosystems Ltd [118]. Шляхом порівняння одержаних результатів із базою картотеки Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) виконували ідентифікацію ліній рентгенівського спектра.

Дослідження сорбції природним сорбентом

Сорбцію природним сорбентом досліджували на експериментальній установці, наведеній на рисунку 2.2.

З метою дослідження процесів адсорбції був приготований модельний розчин $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, що містив від 0,025 до 0,35 моль-екв./л іонів Ni^{2+} . Об'єм модельного розчину із розрахунку Т : Р ~ 1 : 20 становив 60 г, масу адсорбенту брали 3 г. Готували 5 % суспензію адсорбенту з модельним розчином, перемішували цю суміш 30 хв. Температуру підтримували на рівні $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Досліди виконували з дотриманням однакових гідродинамічних умов.

Після того, як закінчилися процеси сорбції, отриманий розчин ми фільтрували через паперовий пакет для відділення твердої фази. Концентрація Ni^{2+} у фільтраті визначалася, використовуючи його комплексоутворення з ЕДТА. Мурексид був індикатором, оскільки він утворює комплекс з іоном Ni^{2+} .

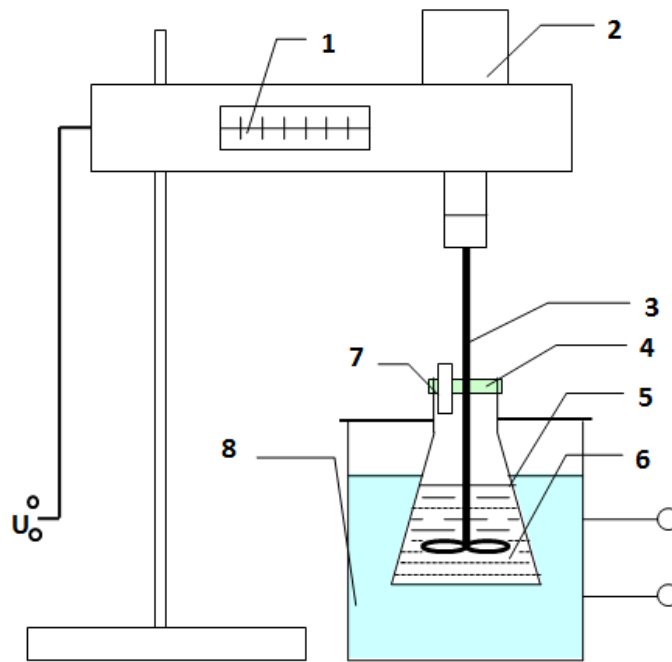


Рисунок 2.2 – Експериментальна установка апарата з мішалкою для дослідження сорбції: 1 – регулятор обертів мішалки; 2 – електричний двигун; 3 – мішалка; 4 – ущільнювач; 5 – колба з розчином; 6 – середовище, що досліджується; 7 – пристрій для відбору проб; 8 – термостат

Титрування проводили у лужному середовищі з використанням аміачного буфера за $\text{pH} = 10$. Додавали невелику кількість мурексиду в якості індикатора та чекали, поки він повністю розчиниться. Після цього проводили титрування розчином ЕДТА до тих пір, поки досліджуваний розчин не змінить колір з жовтого на пурпурний. Додавали невелику кількість концентрованого розчину аміаку, якщо після завершення титрування зміна кольору відбувалася повільно.

Показник адсорбції розраховується як різниця концентрацій вихідного та рівноважного розчинів:

$$\Gamma = \frac{(C_0 - C)V}{m} \quad (2.1)$$

де Γ – показник адсорбції, моль-екв./г;

C_0 і C – вихідна концентрація адсорбату та його рівноважна концентрація, моль-екв./л;

m – маса адсорбенту, г;

V – об'єм розчину адсорбату, л.

За допомогою пакета програм Microsoft Excel проводили математичне оброблення результатів проведених експериментів.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 наведено характеристику об'єкта дослідження, розглянуто основні фактори, що впливають на навколишнє природне середовище, та методи його захисту в зоні розміщення об'єкта теплоенергетики.

Наведені методи досліджень атмосфери, гідросфери та ґрунтів.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [23, 119].

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕС НА НАВКОЛИШНЄ ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

3.1 Математичне моделювання процесу деструкції з формуванням відхідної газової складової

Чисті вугільні технології – важливий варіант для скорочення викидів забруднювальних речовин під час спалювання викопних видів палива. В країнах, які розвиваються та де вугілля є легкодоступним, вони часто економічно ефективні [119–121].

У країнах з великими запасами вугілля (Туреччина, Індія, Казахстан) [122–124] існує необхідність переходу на нові енергетичні технології спалювання вугілля. Україна також потребує впровадження нових, екологічно чистих технологій його спалювання. У 2017 році була розроблена й затверджена Енергетична стратегія на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність».

Традиційне спалювання палива на теплоенергетичних об'єктах призводить до викиду шкідливих газів, що містять тверді частинки та краплі рідини. Ці гази контролювано видаляються через димові труби. При цьому основними забруднювальними речовинами, що викидаються, є:

– діоксид сірки (SO_2): теплові електростанції, що працюють на викопному вугіллі, шкодять здоров'ю населення, оскільки викидають дрібні частинки, що можуть проникати до легень і поглинатися кровотоком. Діоксид сірки спричиняє кислотні дощі, що завдають шкоди біоресурсам, ґрунтам, окиснюють об'єкти гідросфери [125].

– оксиди азоту (NO_x): викликають появу озону або смогу на рівні земної поверхні, негативно впливають на легеневу тканину, загострюють астму і роблять організм більш сприйнятливим до хронічних респіраторних

захворювань [125, 126];

– зважені тверді частинки: летка зола чи сажа можуть бути причиною хронічного бронхіту, загострення астму, здатні навіть призводити до летального кінця;

– ртуть: вугільні теплові електростанції є джерелами викидів ртуті, цей токсичний важкий метал пошкоджує мозок, викликає проблеми з серцево-судинною системою.

Щорічно тепловими електростанціями викидаються й інші шкідливі забруднювальні речовини, серед них – кадмій, свинець та інші важкі метали, миш'як, вуглеводні, леткі органічні сполуки та окис вуглецю, що спричиняє головні болі і створює додаткове навантаження для людей із захворюваннями серцево-судинної системи [127, 128].

Слід зазначити, що під час спалювання різних видів палива в атмосферне повітря викидаються неоднакові кількості забруднювальних речовин. У цьому разі рівень впливу на навколишнє природне середовище буде залежати від виду палива, що спалюється [129]. У таблиці 3.1 наведені характеристики вугілля, а в таблиці 3.2 – середній обсяг викидів під час його спалювання.

Таблиця 3.1 – Теплові характеристики різних типів вугілля [130]

Тип вугілля	Температура займання	Температура початкового викиду
Буре вугілля	250–450	130–170
Бітумне вугілля	400–500	200–300
Антрацит	700–800	380–400

Таблиця 3.2 – Середня емісія шкідливих газів під час спалювання антрациту та бурого вугілля [130]

Забруднювач	Антрацит	Буре вугілля
CO ₂	94,600	101,000
SO ₂	765	1,361
NO _x	292	183
CO	89,1	89,1
Тверді частинки	1,203	3,254

На рисунках 3.1 і 3.2 показана динаміка викидів основних забруднювальних речовин в Україні, що викидаються стаціонарними джерелами.

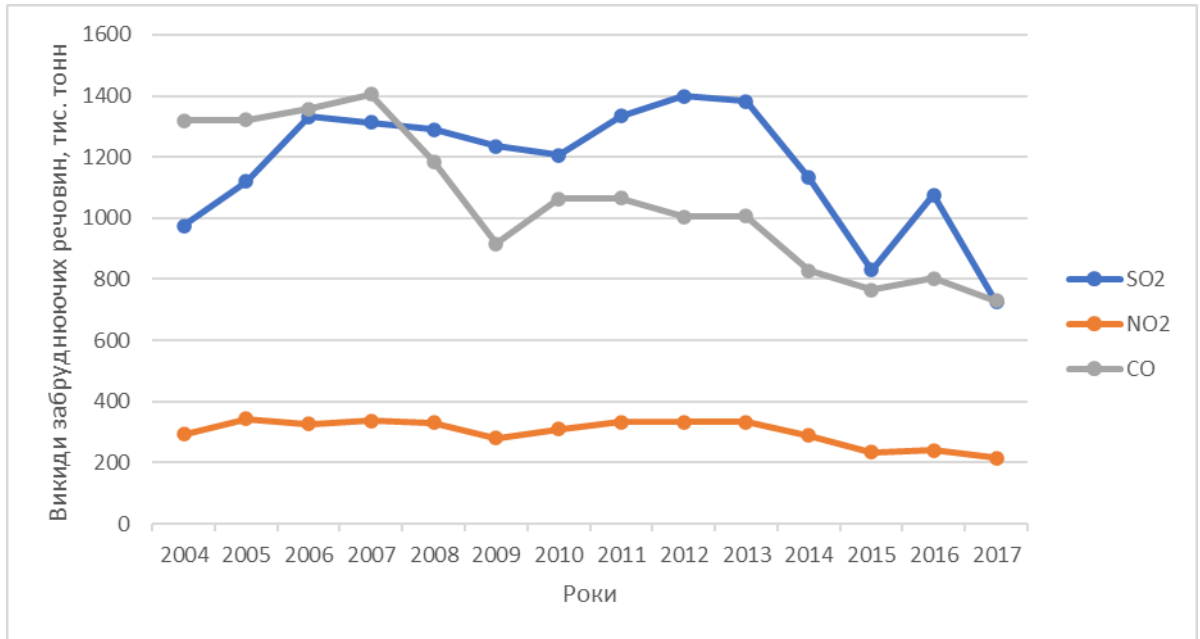


Рисунок 3.1 – Викиди забруднювальних речовин в Україні від стаціонарних джерел [131]

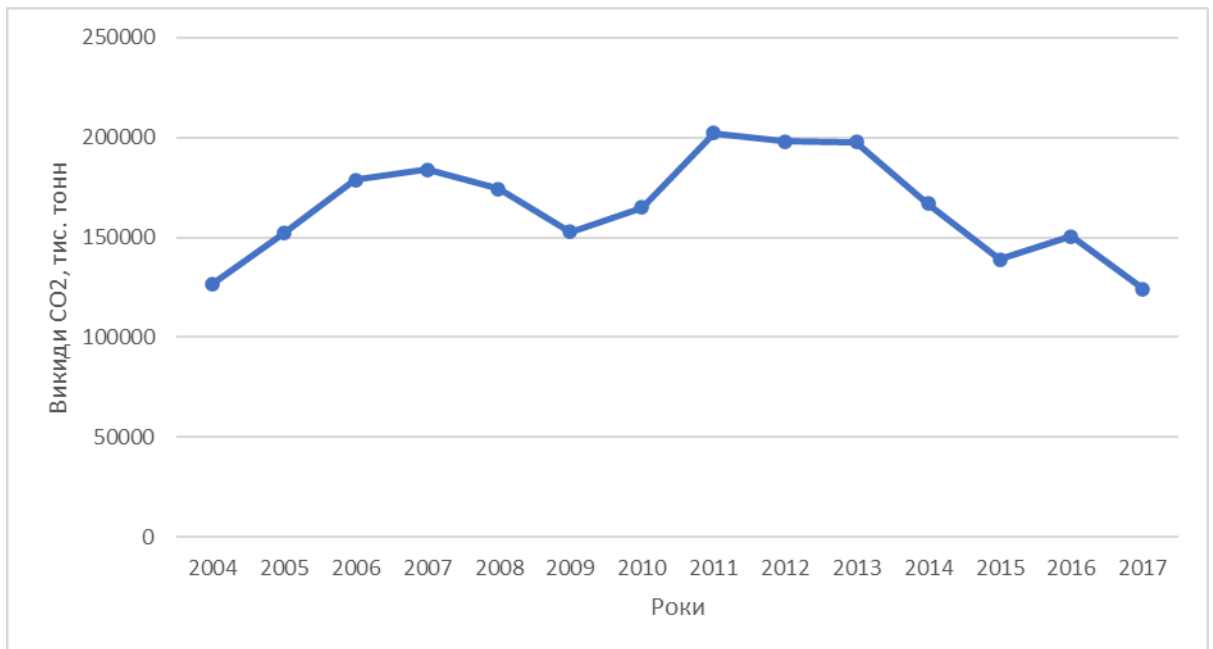


Рисунок 3.2 – Викиди CO₂ стаціонарними джерелами [131]

Концентрація шкідливих домішок у приземному шарі атмосфери визначає рівень його забруднення, на який впливають такі технологічні фактори: температура й витрати газоповітряної суміші, концентрація домішок у викидах,

діаметр і висота джерела викиду тощо. Мають місце й метеорологічні чинники, до яких можна віднести напрямок і швидкість панівних вітрів, температуру і вологість повітря, розміщення джерела викиду, наявність туманів, інверсії, кількість опадів тощо. Взаємодія цих факторів формує мікрокліматичні умови у зоні розміщення об'єктів теплоенергетики.

На формування мікроклімату у зоні розміщення об'єктів теплоенергетики впливають ще такі фактори:

- теплове забруднення водних об'єктів і повітряного басейну;
- хімічне забруднення повітряного басейну (викиди димових газів).

Наслідком теплового забруднення повітря та водних об'єктів є зміна температури атмосферного повітря у зоні розміщення теплоенергетичного об'єкта, зміна вологості повітря, швидкості вітру тощо.

Потужні й активні викиди в атмосферне повітря димових газів та специфіка енерговиробництва обумовлюють вплив Чернігівської ТЕЦ на зміну мікроклімату в зоні її впливу.

Продукти згоряння твердого органічного палива (переважно донецького вугілля марки АШ) Чернігівської ТЕЦ основними забруднювальними речовинами, що потрапляють у атмосферне повітря, є оксиди вуглецю, азоту та сірки, а також тверді частинки – зола.

Опишемо процес деструкції палива в енергетичних котлах.

Рівняння збереження, в яких використовували гідродинаміку багатофазного потоку, аналіз горіння і викидів NO_x , мають такий вигляд:

Рівняння безперервності:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q v_q) = 0, \quad (3.1)$$

$$\alpha_q + \alpha_s = 1. \quad (3.2)$$

Рівняння характеристик:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q X_q^t) + \nabla(\alpha_q \rho_q X_q^t v_q) = \nabla(\alpha_q \rho_q D_k^t \nabla X_q^t) + S_q. \quad (3.3)$$

Рівняння імпульсу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q v_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v v_q) = \nabla \cdot \bar{\tau}_q - \alpha_q \nabla P + \alpha_q \rho_q g + F_q. \quad (3.4)$$

Рівняння газової фази:

$$F_q = K_{qs} (v_s - v_q), \quad (3.5)$$

$$\bar{\tau}_q = \alpha_g \mu_{g,eff} (\nabla v_g + \nabla_{v_g}^T) + \alpha_g (\lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g) \nabla v_q \bar{I}, \quad (3.6)$$

$$\mu_{g,eff} = \mu_g + \mu_{g,t}. \quad (3.7)$$

Рівняння твердої фази:

$$F_q = K_{sq} (v_q - v_s), \quad (3.8)$$

$$\bar{\tau}_s = -P_s \bar{I} + \alpha_s \mu_s (\nabla v_s + \nabla_{v_s}^T) + \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla v_s \bar{I}, \quad (3.9)$$

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2}. \quad (3.10)$$

Рівняння енергії:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q h_q) = & -\alpha_q \frac{\partial P_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla v_q - \\ & -\nabla \cdot q_q + Q_{PQ} + S_Q \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$Q_{gs} = \frac{6k_g \alpha_g \alpha_s N_{u_g}}{d_s^2} (T_g - T_s). \quad (3.12)$$

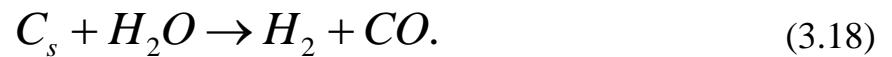
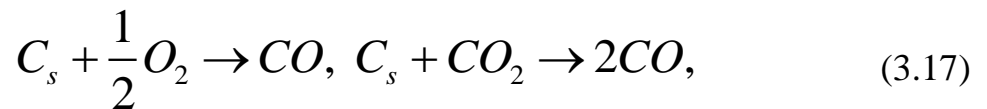
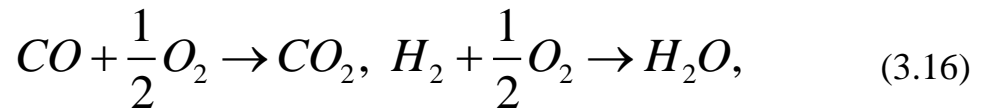
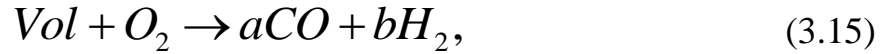
Дискретно-фазова модель:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u - u_p) + \frac{g_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x. \quad (3.13)$$

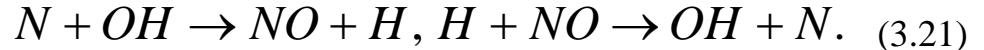
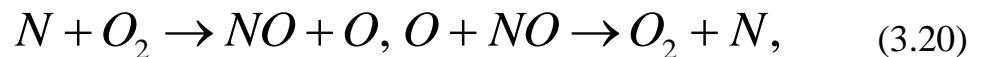
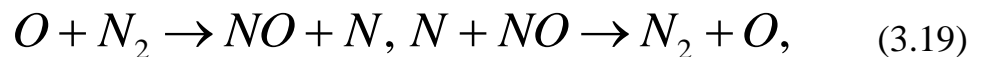
Модель спалювання вуглецю з видаленням летких речовин:

$$R' = T^\beta A e^{-E/RT} \left(P_n - \frac{R'}{D'} \right)^N. \quad (3.14)$$

Рівняння реакції горіння:



Моделювання утворення NO_x , утворення термічних оксидів азоту:



Результати гідродинамічного аналізу наведені на рисунку 3.3.

Як бачимо з рисунка 3.3, об'ємна частка піску в печі ЦКШ не змінилася через 200 с після запуску. У результаті цього аналізу об'ємна частка піску становила відповідно 5–8 % у камері згоряння, 6–9 % – у погрузній трубі, і 15–18 % – у замкненому контурі.

Як бачимо з рисунка 3.4, швидкість повітря в печі ЦКШ не змінилася через 200 с після запуску. У результаті цього аналізу швидкість повітря становила відповідно 5–7,5 м/с в камері згоряння і в циклоні, 15–17,5 м/с – в погрузній трубі, і 0,2–5 м/с – в замкненому контурі.

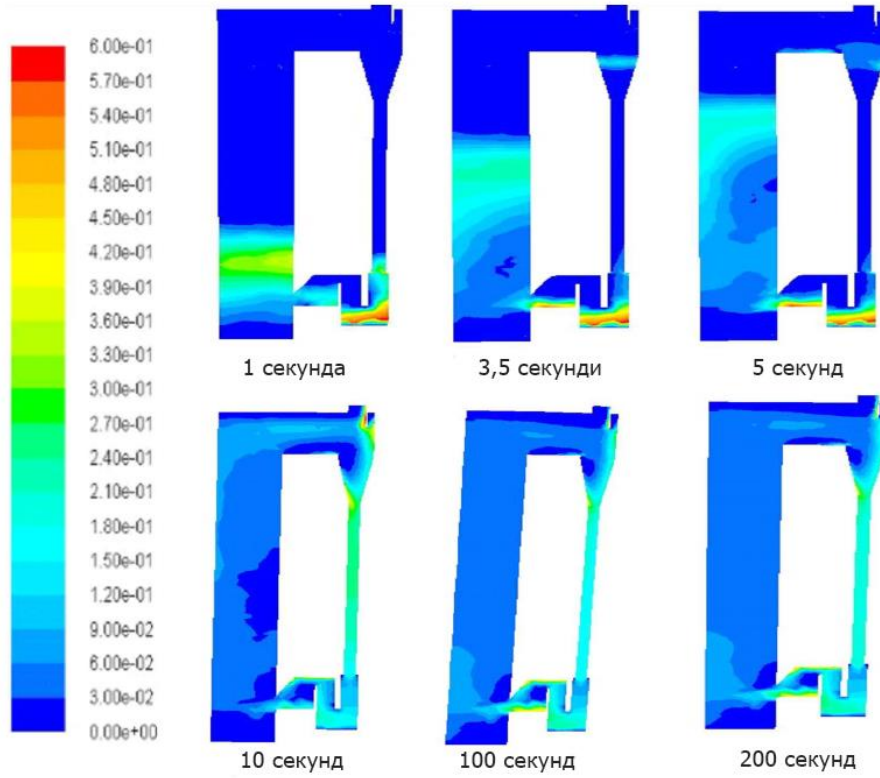


Рисунок 3.3 – Зміна тимчасової об'ємної частки твердої фази в циркуляційній системі, ppm

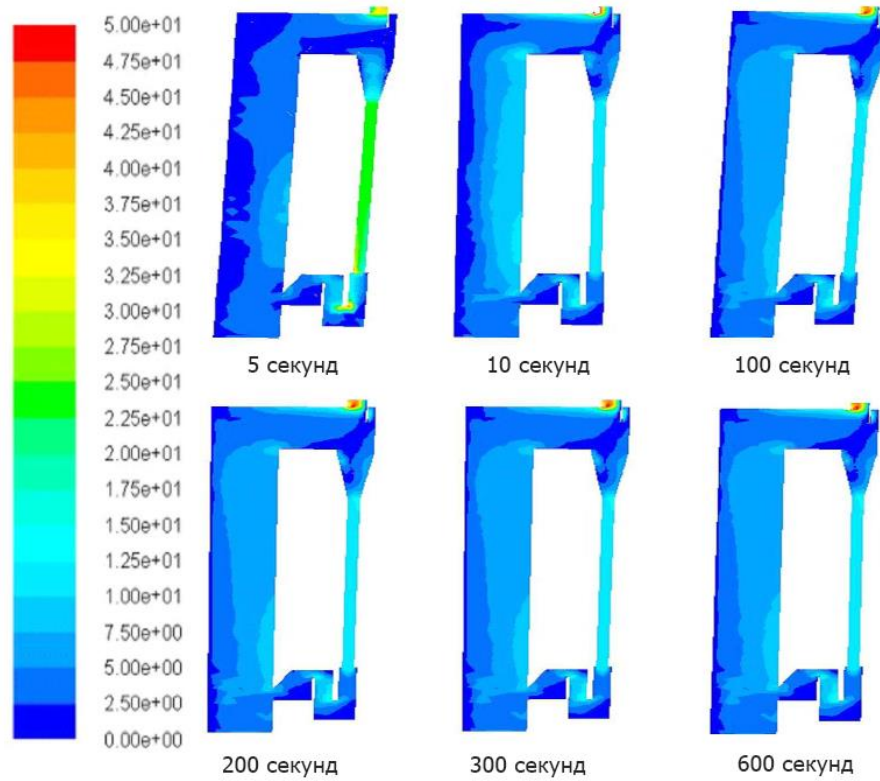


Рисунок 3.4 – Зміна тимчасової швидкості повітря у твердотільній циркуляційній системі, ppm

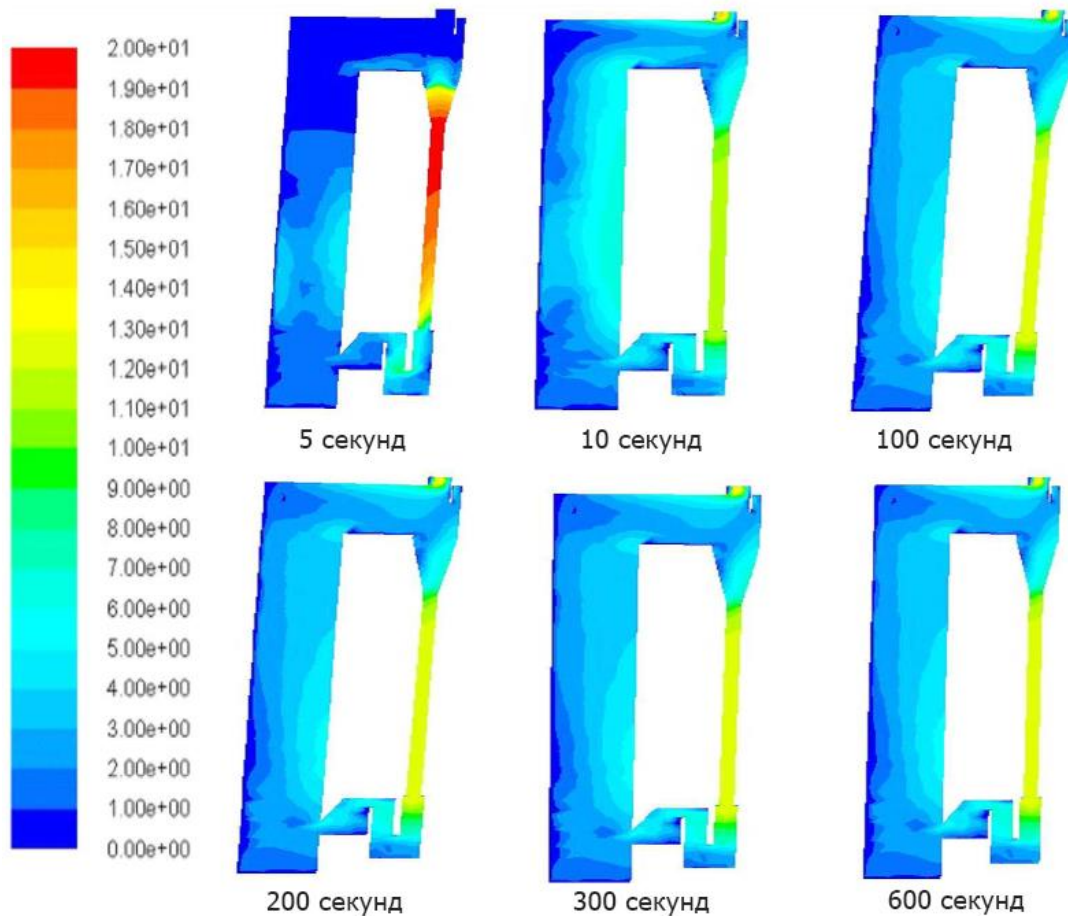


Рисунок 3.5 – Зміна тимчасової швидкості піску
у твердій циркуляційній системі, ppm

Як бачимо з рисунка 3.5, швидкість піску в печі ЦКШ не змінилася через 200 с після запуску. У результаті цього аналізу швидкість піску становила 3–5 м/с в камері згоряння, 5–6 м/с – в циклоні, 12–15 м/с – в погрузній трубі, і 0–3 м/с – в замкненому контурі.

Як бачимо з рисунка 3.4, швидкість повітря в камері згоряння становила 6 м/с для стаціонарного режиму. Також швидкість піску в камері згоряння становила 4 м/с. Для порівняння, для спалювання 0,36 кг/с бурого вугілля на електростанції Тунчбілеке із стехіометричною швидкістю 1,2 використовували 2,8 кг/с повітря [132, 133]. Масова витрата первинного повітря становила 2,1 кг/с і 500 К, а масова витрата вторинного повітря – 0,7 кг/с і 300 К. Це вторинне повітря додається на висоті 6 м від основи камери згоряння. Ці умови наведені на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Граничні умови камери згоряння
з циркулюючим киплячим шаром

У проведенні цього аналізу спалювання без попереднього змішування і метод дискретних фаз використовуються щодо спалювання вугілля та вуприскування вугілля в камеру згоряння. Крім того, механізми Зельдовича [134], загальна динаміка реакції De-Seote [135] і відношення еквівалентності 1/1.2 застосовуються для розрахунків щодо термічного утворення NO_x через утворення паливних NO_x та швидкого утворення NO_x у камері згоряння.

Розподіл температури і викидів NO_x показано на рисунку 3.7. Як бачимо з рисунка 3.7, викиди NO_x збільшилися до 771 ppm, і вони були зменшені в камері згоряння. Викиди NO_x були знижені до 38,5 ppm, а в стаціонарних умовах і на виході з камери згоряння температура становила 1 123 К (860 °С). Результати гідродинамічного аналізу та аналізу горіння, а також результати рефері [136–138] можна порівняти один з одним.

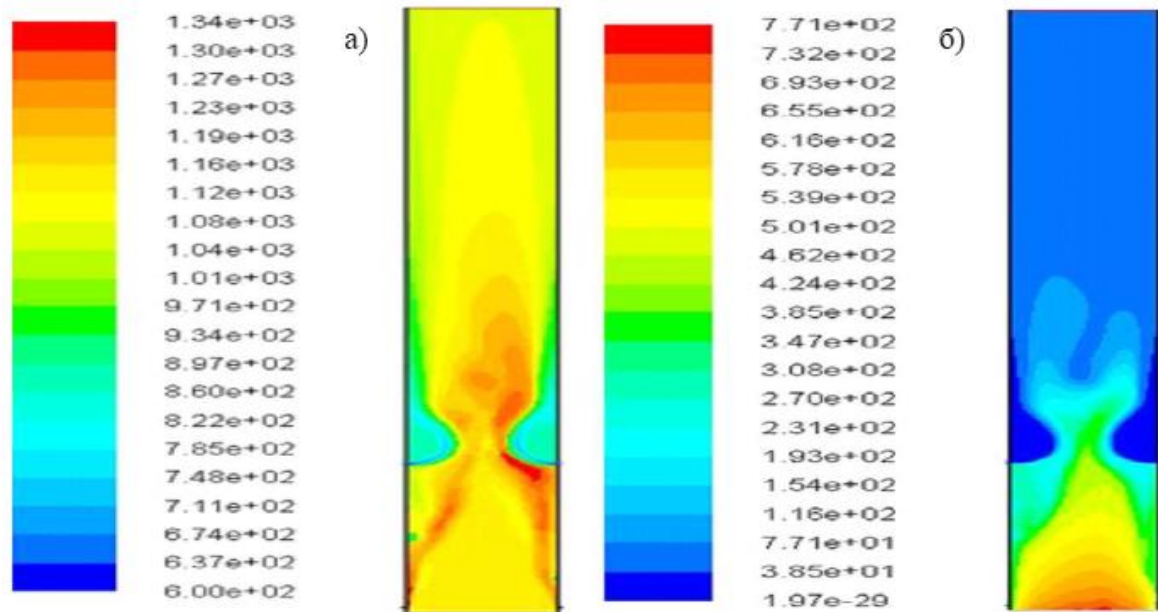


Рисунок 3.7 – Розподіл температури та викидів NO_x у камері згоряння:

а) розподіл температури [K]; б) розподіл викидів NO_x [ppm]

Висока концентрація викидів оксидів азоту NO_x обумовлена високою температурою в ядрі факела горіння, що необхідна для спалювання вугілля марки АШ з рідким шлаковидаленням, а високі рівні оксиду сірки SO_2 у викидах обумовлені значним вмістом сірки в вихідному паливі. Хоча мокрим очищенням можна вловити деяку кількість діоксиду сірки (до 2,5 %), екологічні проблеми з очищення атмосферного повітря від оксидів сірки та азоту у цьому разі залишаються невирішеними.

На Чернігівській ТЕЦ проведена підготовка техніко-економічного обґрунтування реконструкції, що передбачає встановлення нового енергоблоку на 60 МВт. Дефіцит енергоспоживання на ділянці покривається лише на 60–70 %, цим і обумовлено збільшення енергетичної потужності. Але, як наслідок збільшення потужності, є збільшення техногенного навантаження на довкілля під час спалювання твердого палива. Встановлення котла з циркулюючим киплячим шаром без установа додаткового обладнання для очищення відхідних газів зможе забезпечити високі екологічні показники за викидами.

У цілому очікується зниження обсягу викидів забруднювальних речовин в

атмосферне повітря на рівні 6 370,9 т/рік. Звісно, це можна розглядати ще й як позитивний фактор з позиції впливу ТЕЦ на мікроклімат у районі її розміщення.

Додержання нормативів є необхідною умовою допустимості реконструкції обладнання та експлуатації Чернігівської ТЕЦ, серед них:

- нормативи ГДК забруднювальних речовин;
- нормативи екологічної безпеки атмосферного повітря, що зменшують техногенне навантаження на навколишнє середовище.

Під час визначення безпосереднього забруднювального впливу викидів гранично-допустимі концентрації (ГДК) є основними критеріями оцінювання якості атмосферного повітря. Вони обмежують техногенне навантаження на навколишнє середовище та негативний вплив на населення.

Для кожної із забруднювальних речовин, що викидаються в атмосферу, необхідно додержуватися умови:

$$\frac{C_m}{ГДК} \leq 1 \quad (3.23)$$

де C_m – максимальна розрахункова приземна концентрація забруднювальної речовини в атмосферному повітрі, мг/м³;

ГДК – максимально-разова гранично-допустима концентрація, мг/м³.

Перспективні напрямки енергетичної стратегії розглядають екологічно чисту вугільну генерацію шляхом шляхом розвитку та впровадження:

- енергоблоків із суперкритичними параметрами пари з коефіцієнтом корисної дії від 46 до 55 % під час спалювання смолоскиповим способом якісного висококалорійного вугілля;

- енергоблоків із закритичними параметрами пари, обладнаними котлами з ЦКШ.

Для об'єктів теплоенергетики, що працюють на вугіллі, запропоновано чотири шляхи зменшення обсягів шкідливих викидів: збагачення або заміна палива, його промивання, спалювання в псевдозрідженому шарі, використання фільтрів, скрубєрів [139].

Щодо зміни палива, то є сорти вугілля, що мають низький уміст сірки, але економічні фактори можуть унеможливити перехід на них. Крім того, деякі види такого вугілля характеризуються меншою теплотою згорання, тому їх використання може не дати бажаного ефекту – зменшення шкідливих пилогазових викидів. Крім використання дорогого низькосірчистого вугілля, викиди діоксиду сірки можна скоротити, якщо очищувати вугілля до спалювання у котлі. Робота різних газоочисних агрегатів базується на хімічних реакціях за участі діоксиду сірки. Утворені в цьому разі сполуки можна або скидати у відходи, або застосовувати як продукт, що має збут. На сьогодні застосування скруберів – загальноприйнята технологія.

Дослідження екологічної ефективності керуванням температурним полем у зоні горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром дозволить вирішити проблему очищення викидів, що виникає. Тому спалювання вугільного палива в котлах із ЦКШ є досить перспективним варіантом для запобігання виникненню забруднення навколишнього середовища [119].

Комп'ютерне моделювання турбулентного процесу горіння в котлах із ЦКШ дозволяє розрахувати температурне поле, забезпечуючи виключення викидів шкідливих газових компонентів в атмосферне повітря.

Розглянуті хімічні процеси, що відбуваються в зоні горіння, які описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь ефективним методом теоретичного дослідження, є чисельне моделювання з проведенням обчислювального експерименту.

Для обчислювального експерименту на прикладі реальної енергетичної моделі використовували пакет прикладних програм ANSYS Fluent.

Для опису руху в зоні горіння паливної складової використовували систему диференціальних рівнянь (3.24)–(3.27), що включає закон збереження маси, імпульсу, енергії, закон збереження компонентів речовин:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}, \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial t_{i,j}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i, \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho h) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) \frac{\partial Q_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_q, \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_\beta) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_\beta u_i) - \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + R_\beta. \quad (3.27)$$

де $u_{i,j}$ – швидкість; f_i – об’ємні сили; ρ – густина; τ – тензор напружень; p – тиск; t – час; h – ентальпія; $x_{i,j}$ – координата; j_i – дифузійний потік; R_β – джерело речовини; C_β – масова концентрація.

У результаті розв’язання чисельним методом системи рівнянь розраховані поля концентрацій продуктів горіння (NO , NO_2 , CO , CO_2 та SO_2) під час горіння полідисперсної вугільної маси.

Використовуючи програмний комплекс «Barracuda VR», у дослідженні застосовували модель моделювання багатофазних частинок в осередках (MP-PC), у якій газову фазу та рух частинок подавали континуальною моделлю й моделлю Лагранжа відповідно. Цей підхід полягає в тому, що реальні частки впаковують в обчислювальну частку згідно з їх аналогічними властивостями, зокрема типом, станом і температурою, що знижує обчислювальну складність. Моделювання для прогнозування горіння палива в циркулюючому киплячому шарі із застосуванням цього методу дозволив одержати точні характеристики горіння та профілі концентрацій основних газових викидів котла, зображені на рисунку 3.8.

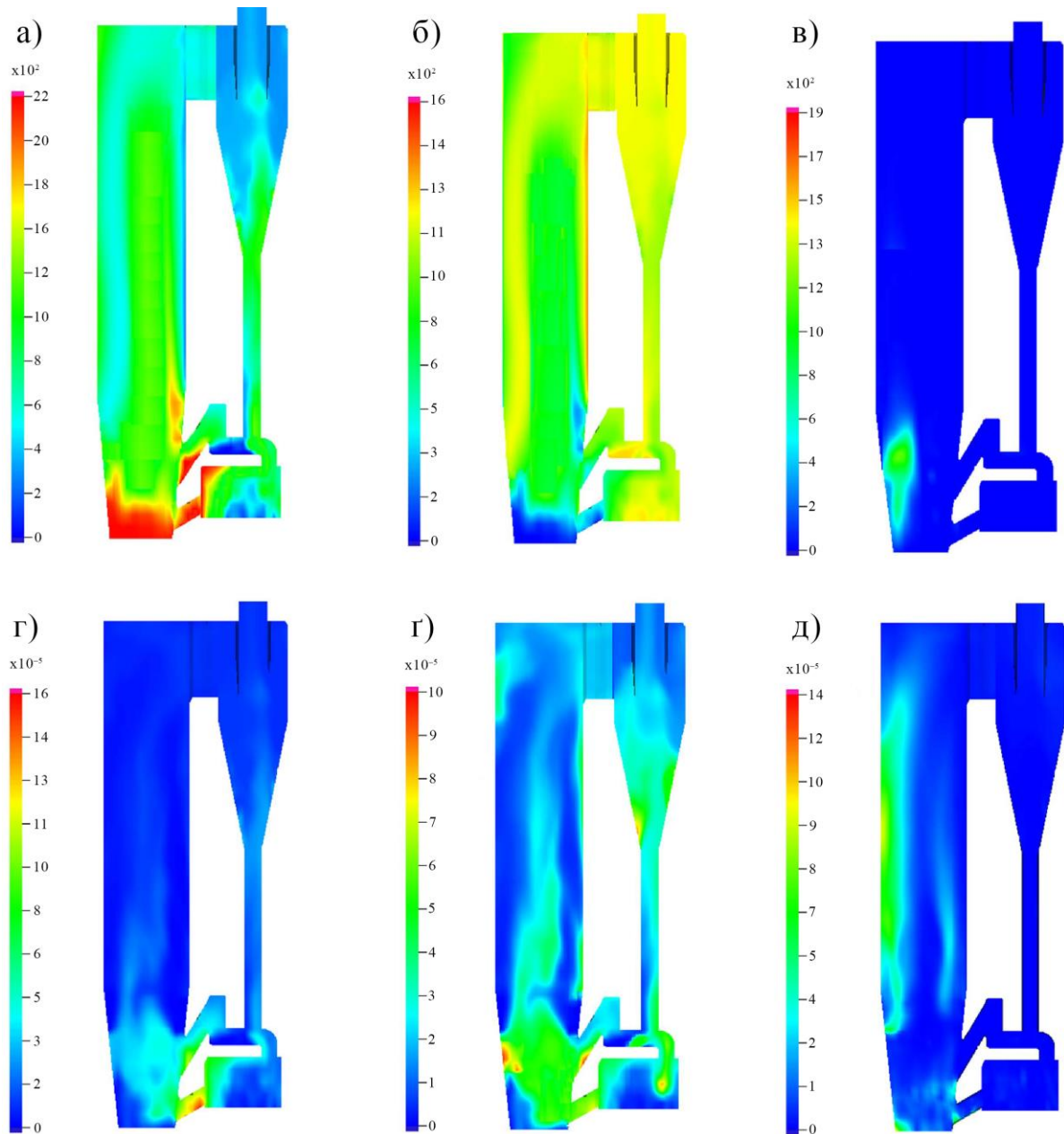


Рисунок 3.8 – Профілі концентрацій основних газів котла ЦКШ, ppm:
 а) O_2 ; б) CO_2 ; в) CO ; г) SO_2 ; г) NO ; д) NO_2

Принцип роботи топок із циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ) та оцінювання їх ефективності

Для організації процесу горіння в киплячому шарі наявність дрібнодисперсних частинок у паливі не є критичною, на відміну від нерухомого шару, коли ефективність горіння істотно зменшується. Це пов'язано з тим, що дрібнодисперсні частинки (менші за 0,5 мм) виносяться з шару та назад не повертаються. А горіння дрібнодисперсних частинок припиняється, тому що температура в надшаровому просторі нижче температури у шарі [120, 121].

Вловити ці дрібні частинки та повернути в шар на допалювання малоефективні, оскільки циклони вловлюють до 70% пилоподібних частинок. Коли паливо почало дробити нижче 0–3 мм, а швидкість газу на переріз топки збільшили до 5–7 м/с, відбувся якісний стрибок. В умовах, коли потужний потік частинок 0,1–1 мм виноситься з шару, ККД циклону збільшується до 99 % і більше, бо добре вловлювані частинки зазначеного розміру захоплюють за собою більш дрібні частинки. Таким чином і виникли топки ЦКШ (рис. 3.9).

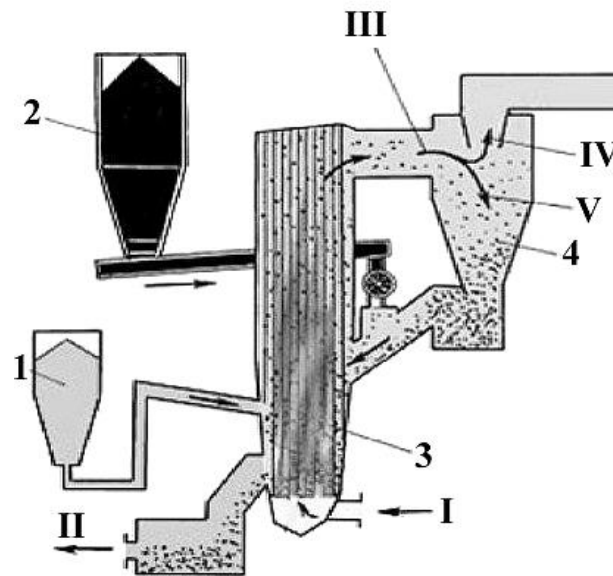


Рисунок 3.9 – Організація процесу горіння в ЦКШ:

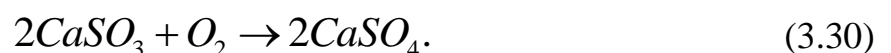
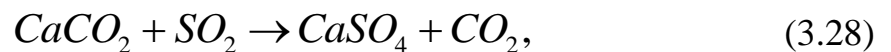
1 – бункер з вапняком; 2 – бункер з вугіллям; 3 – киплячий шар;
4 – циклон; I – дуття (подача повітря); II – шлак, що направляється на
шлаковідвал; III – продукти згоряння; IV – продукти згоряння, що
направляються в конвективну шахту; V – повернення частинок на допалювання

Їх відмінність полягає в тому, що циклон встановлюють одразу за топковим пристроєм, у ньому всі недогорілі частинки повертаються назад до топки. Тобто частинки виявляються «замкненими» в системі «топка – циклон – топка», поки не згорять. Топки з ЦКШ не поступаються камерним за економічністю, але зберігають всі екологічні переваги.

Що стосується вимог до якості палива, то у ЦКШ вони не жорсткіші, ніж у киплячого шару, але ефективність згоряння твердого палива, зокрема того, що містить дрібні частинки, взагалі вища. Технологія має кращі показники щодо зв'язування оксидів сірки за рахунок тривалого утримування в топці вапняку. За викидами NO_x – внаслідок організації відновної зони між уводами первинного і вторинного дуття.

Для топок із ЦКШ характері менші масштабні обмеження, вони використовуються в котлах великих енергоблоків електричною потужністю 300 МВт і більше, а також в малих парових та водогрійних котлах, як топкові пристрої з нерухомим і киплячим шаром. Регулювання навантаження таких енергоблоків з ЦКШ складає 40–100 %. Варто відмітити, що для роботи котлів з циркулюючим киплячим шаром за рівнем зольності для спалювання підходять шламові відходи із зольністю не більше ніж 60 %, яких накопичено до 150 млн тонн (приблизно 70 млн тонн умовного палива). Утилізація цього типу відходів розширила б паливну базу для теплової енергетики та вирішила б екологічні проблеми із рекультивацією площ, що зайняті мулонакопичувачами. Агломерація високозольного шламу є необхідною умовою для спалювання його в ЦКШ. Це можна забезпечити під час сушіння за рахунок природної глинистої компоненти.

Процес спалювання в циркулюючому киплячому шарі вважається процесом, забезпечуючим низький рівень викидів забруднювальних речовин. Завдяки йому можливо ефективно вловлювати діоксид сірки за рахунок використання вапняку:



Для сульфїду кальцію характерна погана розчинність у воді (0,136 г/л), під час процесу очищення він швидко перенасичує розчин, випадає у вигляді дрібних кристалів.

Для організації процесу сорбції умови в топках із циркулюючим киплячим шаром виявляються досить вдалими. Тому в них сірка вловлюється більш ефективно, ніж у топках з пиловугільним спалюванням під час уприскування вапна в зону горіння. Під час спалювання вугілля в котлах ЦКШ практично не утворюються термічні оксиди азоту NO_x з азоту повітря. Рівень NO_x також можна знизити за рахунок ступінчастого подання повітря.

Більше того, під час спалювання органічного палива за температурного режиму 850–900 °С, що властивий котлам ЦКШ, не відбувається утворення оксидів азоту.

Отже, основні переваги технології спалювання у котлах ЦКШ є такі:

- ефектне спалювання високосольних та низькокалорійних палив, а також тих, що мають малий вміст летких речовин, стабільна температур в топці, низький вміст в шарі вуглецю, досить тривалий час перебування коксозольного залишку в реакційній зоні;

- ефектне зв'язування сірки завдяки дешевому способу подачі в топку вапняку;

- низькі викиди оксидів азоту (не більше ніж 200–300 мг/м³), при цьому не потрібні спеціальні засоби видалення азоту;

- спрощена схема підготовки палива, можливість спалювання палива різної якості в одному котлі, швидкий пуск із «гарячого» стану, гарні динамічні характеристики;

- компактність котельної установки, оскільки засоби очищення від сірки та азоту відсутні, що дає можливість розмістити ЦКШ-котел в існуючих котельних комірках.

Оцінювання екологічної ефективності технології

У зв'язку з реалізацією нових проектних рішень щодо модернізації Чернігівської ТЕЦ очікується зниження обсягу шкідливих викидів у атмосферне повітря (табл. 3.3), що досягається встановленням котлоагрегатів з екологічно чистою технологією спалювання в циркулюючому киплячому шарі замість існуючих котлів із факельним способом спалювання, з можливістю

керувати температурним полем й установленням електрофільтрів.

Таблиця 3.3 – Прогнозоване зниження викидів забруднювальних речовин після проведення реконструкції ТЕЦ

Забруднювальна речовина	Валові викиди забруднювальних речовин, т/рік			
	існуюче становище	після реконструкції	зменшення викидів	збільшення викидів
Оксиди азоту, NO _x	528,7	259,2	269,5	–
Діоксид сірки, SO ₂	3 830,4	1 174,9	2 655,5	–
Оксид вуглецю, CO	71,3	358,3	–	287,0
Зважені речовини	4 591,1	858,2	3 732,9	–
Разом	9 021,5	2 650,6	6 657,9	287,0

Як бачимо з таблиці 3.3, концентрація оксиду вуглецю в котлах із ЦКШ більша, ніж за факельного способу спалювання, що зумовлене підтриманням надлишку повітря на рівні 1,25. Тому необхідно передбачити додаткові рішення для очищення викидів.

У цілому, за рахунок впровадження технічних рішень і природоохоронних заходів очікується зниження обсягу викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря на рівні 6 370,9 т/рік (близько 70,6%). Запропоновані рішення дозволять зменшити техногенне навантаження на довкілля та покращити екологічну ситуацію в зоні впливу об'єкта теплоенергетики.

3.2 Моделювання перенесення забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери

Аналіз впливу теплоенергетичних об'єктів на навколишнє природне середовище засвідчив, що перенесення забруднювальних речовин в атмосферу та підземні води відбувається із зони аерації, території проммайданчика та золошлаконакопичувача. При цьому моделювання міграції забруднювальних речовин має відмінності в описі даного процесу в зоні впливу золошлаконакопичувача та зоні аерації.

Розглянемо нижній прикордонний шар атмосфери, обмежуючись мезомасштабними процесами, для яких товщина шару D і горизонтальний масштаб руху L задовольняють співвідношення

$$\delta_1 = \frac{D}{L} \ll 1. \quad (3.31)$$

Як вихідні дані візьмемо тривимірні рівняння гідротермодинаміки «сухої» атмосфери в обертаючій декартовій системі координат.

Рівняння Нав'є – Стокса:

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} + w \frac{\delta u}{\delta z} = \frac{\delta \Phi}{\delta x} + lv + A_M \Delta u + \frac{\delta}{\delta z} k_M \frac{\delta u}{\delta z}, \quad (3.32)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + w \frac{\delta v}{\delta z} = \frac{\delta \Phi}{\delta y} + lu + A_M \Delta v + \frac{\delta}{\delta z} k_M \frac{\delta v}{\delta z}, \quad (3.33)$$

$$\frac{\delta w}{\delta t} + u \frac{\delta w}{\delta x} + v \frac{\delta w}{\delta y} + w \frac{\delta w}{\delta z} = \frac{\delta \Phi}{\delta z} + \beta \theta + A_M \Delta w + \frac{\delta}{\delta z} k_M \frac{\delta w}{\delta z}. \quad (3.34)$$

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0. \quad (3.35)$$

Рівняння температури:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} + u \frac{\delta \theta}{\delta x} + v \frac{\delta \theta}{\delta y} + w \frac{\delta \theta}{\delta z} = A_T \Delta \theta + \frac{\delta}{\delta z} k_T \frac{\delta \theta}{\delta z}. \quad (3.36)$$

Як забруднювальну речовину виберемо оксид вуглецю, тому що під час згоряння палива в зоні циркуляційного киплячого шару (за температури 900 °С) відбувається повне видалення оксидів азоту, а також оксидів сірки внаслідок додавання в зону горіння вапняку.

У рівняннях (3.32)–(3.36) прийняті позначення: t – час; вісь Ox направлена на Схід, вісь Oy – на Північ, а вісь Oz – вертикально вгору; $\vec{v} = (u, v, w)$ – вектор

швидкості руху повітря; $\Delta = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2}$ – двовимірний оператор Лапласа;

$\Phi = RT_{сер} p' / p$ – флуктуації геопотенціалу (R – питома газова стала; $T_{сер}$ – середня температура повітря в шарі; p' – флуктуації атмосферного тиску); l – параметр

Коріоліса; для подання турбулентних потоків і напружень використана концепція коефіцієнтів турбулентного обміну, за якої A_M, k_M – коефіцієнти горизонтальної й вертикальної турбулентної в'язкості; $\theta = T(p_0/p)^{R/c_p}$ – потенційна температура (p – атмосферний тиск, що залежить лише від висоти; p_0 – атмосферний тиск у поверхні землі; c_p – теплоємність за постійного тиску); $\beta = g\sqrt{\theta}$ – параметр плавучості (g – прискорення сили тяжіння; θ – середня потенційна температура навколишнього повітря); A_T, k_T – коефіцієнти горизонтальної й вертикальної турбулентної температуропровідності; A_S, k_S – коефіцієнти горизонтальної та вертикальної турбулентної дифузії (їх вважають постійними величинами); c_g – швидкість геострофічного вітру на верхній вільній межі приземного шару атмосфери; dd – азимут геострофічного вітру; θ_S – температура повітря на рівні шорсткості підстильної поверхні; γ_i – коефіцієнт тепловіддачі (i – номер типу шорсткої поверхні).

Розглянемо майданчик розмірами $L \times L$. Швидкість геострофічного вітру c_g над приземним шаром атмосфери та його напрямок, товщину приземного шару D вважаємо відомими величинами. Горизонтальні поля швидкості вітру вище за підстильну поверхню обчислюють за формулами $u = -c_g \sin(dd)$, $v = -c_g \cos(dd)$. Наприклад, за $dd = 0$ вітер північний, а за $dd = 90^\circ$ – східний. Також вітер можна задавати як середній поперечний переріз шару поля швидкості. На бічних межах припускаємо виконання умов $\frac{\partial \vec{v}}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = 0$, де n – зовнішня нормаль на бічних межах підстильної поверхні.

3.3 Фізична картина перенесення забруднювальних речовин у зоні впливу ТЕЦ

У зоні аерації розглядаємо інфільтрацію забруднювальних речовин, які осідають з відхідних газів на ґрунтову поверхню та переносяться вниз за її профілем з опадами й талою водою. На швидкість перенесення при цьому

впливає кількість опадів, вона також впливає й на водонасичення ґрунту, та температура навколишнього середовища, від якої залежить випаровування з поверхні ґрунту.

Перенесення забруднювальних речовин з тіла золошлаконакопичувача перенесення у водонасиченому ґрунті здійснюється за рахунок фільтрації [143].

При цьому спостерігаються такі явища:

- відсутня чітка межа між розчином, що потрапив в ґрунт, та вологою у цьому ґрунті, фронт розчину забруднювача «розмивається»;
- утворюється розширена зона дисперсії через безперервне перемішування ґрунтової вологи та розчину;
- великі пори ґрунту та більша швидкість потоку сильніше «розмивають» фронт розчину забруднених вод.

Процес моделювання поширення забруднювальних речовин успішний лише в тому разі, коли є правильне розуміння механізмів, від яких залежить рух розчинених речовин у потоці ґрунтових вод. На перенесення розчинених речовин впливають дисперсія, конвекція, дифузія, фізико-хімічні (сорбція, іонний обмін, радіоактивний розпад) та біологічні процеси (розкладання бактеріями) тощо.

За відсутності потоку ґрунтових вод перенесення речовин визначається механізмом дифузії. Якщо для ґрунту характерна низька провідність, то дифузія впливає на транспортування розчинених речовин більше, ніж конвекція. Для пористих середовищ притаманне сповільнення дифузії через те, що шлях молекул та іонів у рідкій фазі збільшується внаслідок їх руху навколо окремих частинок звивистими каналами у порах. Крім того, наявність зацемленого повітря та тупикові пори також впливають на зниження швидкості дифузійних процесів. З метою врахування впливу зазначених факторів вводиться ефективний коефіцієнт дифузії:

$$D^* = \gamma_i \cdot D_M \quad (3.37)$$

де γ_i – емпіричний коефіцієнт, об'єднуючий фактори, внаслідок яких зменшується коефіцієнт дифузії; D_M – коефіцієнт молекулярної дифузії, м²/с.

В деяких випадках ефективний коефіцієнт дифузії можна визначати як добуток пористості ґрунту та коефіцієнта молекулярної дифузії:

$$D^* = \theta \cdot D_M, \quad (3.38)$$

де θ – пористість, %.

Під час конвекції перенесення забруднювальних речовин відбувається за рахунок потоку рідини за швидкості, що дорівнює швидкості фільтраційного процесу, яка визначається за законом Дарсі.

Забруднені води перемішуються з чистими ґрунтовими, коли просочуються через пористе середовище. При цьому завдяки дисперсії у зоні фільтрації відбувається розведення забруднених вод, а для поширення забруднювальних речовин у середовищі характерна нерівномірність. Дисперсію буває поздовжня та поперечна. Перша проходить в напрямку фільтраційного потоку, а друга – перпендикулярно йому. Є дві причини, що викликали розширення ділянки забруднення в ґрунті. По-перше, іони або молекули розчиненої речовини через будову структури порового простору проходять різну відстань у пористому середовищі. Це так звана механічна дисперсія. По-друге, молекулярна дифузія проходить в напрямку зменшення концентрації речовини, що розчинена. Ці два процеси складають гідродинамічну дисперсію.

Фактори, що спричиняють дисперсію:

а) через сили тертя у порових каналах швидкість течії рідини в середині вища, ніж біля стінок капілярів;

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

в) локальні потоки можуть відхилитися від напрямку потоку ґрунтових вод на кут до 180° внаслідок перетинів і поворотів у порових каналах;

г) іони та молекули розчиненої речовини проходять різну відстань у поровому просторі.

Встановлено, що контур забруднення при віддаленні від джерела забруднення збільшується, а концентрація, навпаки, зменшується, внаслідок гідродинамічної дисперсії. Разом з цим поздовжня дисперсія більша за поперечну. Це призводить до більшого розтягування контуру забруднення в напрямку потоку ґрунтових вод ніж перпендикулярно.

Величина кроку гідродинамічної дисперсії залежить від Гранулометричний склад ґрунту впливає на величину кроку гідродинамічної дисперсії, яка становить 0,01–10 м.

Відношення поздовжньої α_L і поперечної α_T дисперсії складає від 1:10 до 1:5.

У забруднених водах можуть міститися як консервативні, так і неконсервативні речовини. Для перших характерне те, що вони реагують з водомісткими породами та розчиненими речовинами, не піддаються радіоактивному розпаду чи біологічному розкладанню. Інші беруть участь у фізико-хімічних реакціях, біологічних чи радіоактивних процесах, через що концентрація речовин у просочуваних водах здатна змінюватися. Під час перенесення в ґрунтах можуть відбуватись іонний обмін, окисно-відновні реакції, процеси розчинення та осадження, радіоактивний розпад, біологічне розкладання.

Сорбційно-десорбційні процеси між твердою та рідкою фазами ґрунту мають велике значення для багатьох речовин, розчинених у ґрунтових водах. Унаслідок сорбції сповільнюється та знижується поширення забруднювальних речовин у підземних водах. Справа в тому, що в системі «рідина – тверда фаза» є сорбційна рівновага. Тобто час дисперсійного й конвекційного масоперенесення більший за час, що необхідний для процесу сорбції. Варто відзначити, що у водоносному горизонті виникає локальна рівновага між розчиненою та сорбованою формами речовини. Концентрація речовини в сорбованому стані c_s виражається як функція концентрації речовини c в розчиненому вигляді:

$$c_s = f(c). \quad (3.39)$$

Аналіз засвідчив, під час моделювання складно враховувати цілу низку факторів, які впливають на процес перенесення у ґрунтах забруднювальних речовин. Тому допускаються припущення при моделюванні. Для математичного опису фільтраційних процесів реальний потік рідини можна замінити деяким фіктивним фільтраційним потоком, який заповнює всі перерізи пористого середовища без зупинок. Разом з цим, приймаємо витрати, що зумовлені кількістю рідини, яка у фіктивному потоці протікає через будь-яку одиничну площину розглянутого перерізу за одиницю часу, такими, що дорівнюють витратам реального фільтраційного потоку. Тиск на обраний майданчик для фіктивного потоку приймаємо тиском реального потоку на таку ж саму площину. Для фіктивного потоку сили опору, які розглядаємо як об'ємні (масові), у виділеному обсязі дорівнюють реальним силам такого ж обсягу. Отже, реальний фільтраційний потік розглядається заміщується деякою фізичною моделлю, але основні характеристики цього фіктивного потоку можуть або збігатися з відповідними характеристиками реального, або характеристики реального потоку можливо визначити за характеристиками фіктивного. Тому вводиться поняття швидкості фільтрації з метою визначення середньої швидкості руху частинок рідини в пористому середовищі.

Вищезазначені припущення були враховані під час математичного моделювання перенесення ЗР в зоні розміщення об'єктів теплоенергетики.

3.4 Математичне моделювання перенесення забруднювальних речовин у ґрунтах

Для моделювання поширення забруднювальних речовин розглядаємо систему рівнянь, яка складається з рівняння руху фільтраційного потоку та рівняння конвективної дифузії:

$$\eta \frac{\partial H}{\partial t} = \operatorname{div}(k_f \operatorname{grad} H) - Q, \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} c) - \operatorname{div}(\vec{V}c) + \Phi(x, y, z, t, c), \quad (3.41)$$

де Q – питома інтенсивність джерела, 1/добу; H – величина напору, м; η – коефіцієнт пружної ємності пласта, 1/м; D – гідродинамічна дисперсія, м²/с; t – час, с; k_f – коефіцієнт фільтрації, м/добу; c – концентрація забруднювальної речовини, мг/м³; Φ – питома інтенсивність джерела забруднення, мг/(м³·с).

Швидкість фільтрації знаходимо за законом Дарсі

$$\vec{V} = -k_f \operatorname{grad} H. \quad (3.42)$$

Запишемо початкові умови для рівняння (3.40)

$$H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z); \quad (3.43)$$

граничні умови першого роду

$$H|_{\Gamma_1} = H_\Gamma(x, y, z);$$

другого роду

$$-K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_\Gamma(x, y, z, t).$$

Початкові умови для рівняння (3.41)

$$c(x, y, z, 0) = c_0(x, y, z); \quad (3.44)$$

граничні умови першого роду

$$c(x, y, z, t) \cdot \Gamma_1 = c_\Gamma(x, y, z, t);$$

другого роду

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

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

Компоненти тензора гідродинамічної дисперсії можна визначити як суму молекулярної дифузії та механічної дисперсії

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

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

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

де α_t, α_l – коефіцієнти поперечної та поздовжньої дисперсій, м;

V_x, V_y, V_z – складові швидкості, м/добу.

Внаслідок великої складності аналізу просторових потоків, а також через те, що у прогнозних задачах рідко трапляються умови, які потребують просторового уявлення потоку, часто просторову задачу зводять до плоскої. Плоскі потоки бувають профільні та планові. У перших деформації ліній струму відбуваються у вертикальній площині, в той час як у других потік плоскопаралельний.

Через те, що в зоні впливу об'єктів теплоенергетики має місце фільтрація та інфільтрація забруднювальних речовин, то під час моделювання їх поширення обов'язково враховують водонасичення ґрунту, яке в разі інфільтрації розглядається як змінна за глибиною ґрунтового шару і залежатиме від властивостей ґрунту, кліматичних умов, а в разі фільтрації забруднювальних речовин з тіла золошлаконакопичувача вологонасичення беремо постійним.

Аналіз літературних джерел засвідчив, що для вирішення завдань прогнозування впливу теплоенергетичних об'єктів та місць складування золошлакових відходів використовують метод чисельного математичного моделювання, що найбільш гнучкий і обґрунтований в умовах невизначеності та багатофакторності процесів, як техногенних, так і природних. Для розв'язування рівнянь (3.40), (3.41) чисельним методом використали метод скінченних елементів.

3.4.1 Профільна задача фільтрації

Диференціальне рівняння, що описує нестационарний плосковертикальний фільтраційний потік (3.40), запишемо так

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial H}{\partial z} \right) - Q = \eta \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3.45)$$

де $H = \frac{P}{\gamma_w} + z$ – величина напору, м; Q – питома інтенсивність джерела, 1/добу;

t – час, с; γ_w – питома вага води, Н/м³; k_f – коефіцієнт фільтрації, м/добу; η – коефіцієнт пружної ємності пласта, 1/м.

Граничними умовами першого роду задаються значення напорів на межі «грунт – вода»:

$$H = H^*(t), \quad (3.46)$$

де $H^*(t)$ – задана функція часу.

Граничними умовами другого роду задається витрата через межу «грунт – вода», рівняння набуває такого вигляду:

$$k_f \left(\frac{\partial H}{\partial x} n_x + \frac{\partial H}{\partial z} n_z \right) = -V_n, \quad (3.47)$$

де V_n – задана витрата через межу області забруднення, м³/с; n_x та n_z – складові зовнішньої нормалі до межі.

За нестационарної фільтрації враховують залежність напору від водонасичення та вологості $H = f(W, S_w)$.

$$H = f(W, S_w) = \begin{cases} W = W_H + S_w (W_0 - W_H), & \text{при } H < 0; \\ W = W_0, & \text{при } H \geq 0; \end{cases} \quad (3.48)$$

де S_w – водонасичення, %; W – вологість ґрунту, %; W_0 – вологість за умови повного водонасичення, %; W_H – вологість ненасиченого ґрунту, %.

Залежність водонасичення від часу після опадів t_d виразимо так

$$S_w = f(t_D) = \begin{cases} S_w = 1 \text{ за } t_D = 0, \\ 1 - \frac{0,1Q(1+W_n)}{V_{zp}} \\ S_w = \frac{V_{zp}}{W_0} \text{ за } t_D > 0, \end{cases} \quad (3.49)$$

де W_n – початкова вологість ґрунту, %; W_T – вологість на межі текучості, %; W_0 – вологість за повного водонасичення, %, $W_0 = \alpha W_T$; Q – маса води, видалена в результаті випаровування, кг/год; V_{zp} – об’єм ґрунту, м³; α – коефіцієнт, що для глин дорівнює 0,5–0,45; суглинків – 0,6–0,55; для пісків і супісків – 0,75–0,7 [144].

3.4.1.1 Алгоритм розв’язування задачі профільної фільтрації методом скінченних елементів

Під час розв’язування нестационарної задачі профільної фільтрації додержувалися кроково-ітераційної процедури інтегрування за часом. Часовий інтервал поділяли на проміжки інтегрування Δt . На кожному кроці під час інтегрування на сітці трикутних скінченних елементів здійснювали просторову дискретизацію невідомої функції $H(x, z, t)$.

Розглядаємо довільний кінцевий елемент. Апроксимацію напорів у будь-якій точці здійснюють наступним чином:

$$H(x, z, t) = \{N^e\}^T \cdot \{h^e\}, \quad (3.50)$$

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

$\{N^e\} = \begin{Bmatrix} N_1^e \\ N_2^e \\ N_3^e \end{Bmatrix}$; T – знак транспонування; N_i – i -та функція форми;

Послідовно помножимо рівняння (3.45) на функції форми елемента та інтегруємо за його площею Ω_e . Використовуючи рівняння (3.50), одержуємо:

$$\int_{\Omega_e} N_i^e \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial N_j^e}{\partial x} H_j^e \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial N_j^e}{\partial z} H_j^e \right) \right] d\Omega_e + \int_{\Omega_e} Q N_i^e d\Omega_e = \int_{\Omega_e} \eta N_i^e N_j^e H_j^e d\Omega_e \quad (3.51)$$

Перетворюємо рівняння шляхом інтегрування першого члена частинами (l_e – границя елемента):

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega_e} k_f \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) H_j^e d\Omega_e + \int_{l_e} N_i k_f \left(\frac{\partial N_j^e}{\partial x} n_x = \frac{\partial N_j^e}{\partial z} n_z \right) dl_e + \\ & + \int_{\Omega_e} F N_i^e d\Omega_e = \int_{\Omega_e} \eta N_i^e N_j^e H_j^e d\Omega_e \end{aligned} \quad (3.52)$$

Введемо матричні позначення та перепишемо рівняння (3.14) у такому вигляді

$$\left[K_s^e \right] \{ h^e \} - \left[K_{us}^e \right] \{ h^e \} + \left[P^e \right] \{ h^e \} = \{ F^e \}, \quad (3.53)$$

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

B^e – матриця похідних функцій форми;

$\left[K_{us}^e \right] = \int_{\Omega_e} \left(k_e - f(\{ h^e \}) \right) \left[B^e \right]^T \left[B^e \right] d\Omega_e$ – поправкова матриця, що враховує

неповне водонасичення;

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

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

потоків елемента.

Припускаємо, що за часом в межах кроку напори лінійно змінюються. Замінюємо похідну за часом кінцевою різницею, одержуємо для довільного моменту часу $t + \Delta t$:

$$\left[K_s^e \right] \{ h^e \}_{t+\Delta t} - \left[K_{us}^e \right] \{ h^e \}_{t+\Delta t} + \left[P^e \right] \frac{\{ h^e \}_{t+\Delta t} - \{ h^e \}_t}{\Delta t} = \{ F^e \}_{t+\Delta t}, \quad (3.54)$$

Переходимо до сукупності елементів, що становлять розрахункову область. Систему рівнянь для визначення вектора напорів усіх вузлів області $\{ h \}$ можна записати у такому вигляді:

$$\left[K_s \right] \{h\}_{t+\Delta t} - \left[K_{us} \right] \{h\}_{t+\Delta t} + \left[P \right] \frac{\{h\}_{t+\Delta t} - \{h\}_t}{\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t}, \quad (3.55)$$

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

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

Перепишемо рівняння (3.53) таким чином

$$\left(\left[K_s \right] + \frac{1}{\Delta t} \left[P \right] \right) \{h\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} + \left[K_{us} \right] \{h\}_{t+\Delta t} \left[P \right] \{h\}_t \quad (3.56)$$

$\left[K_{us} \right] \{h\}_{t+\Delta t} \left[P \right] \{h\}_t$ у рівнянні (3.54) розглядається як вектор додаткових потоків до заданого вектору $\{F\}$.

Для розв'язування рівняння (3.54) використовуємо ітераційну схему:

$$\left(\left[K_s \right] + \frac{1}{\Delta t} \left[P \right] \right) \{h\}_{t+\Delta t}^k = \{F\}_{t+\Delta t} + \{R\}^{k-1}, \quad (3.57)$$

де k – номер ітерації; $\{R\}^{k-1} = \left[K_{us} \right] \{h\}_{t+\Delta t}^{k-1} + \frac{1}{\Delta t} \left[P \right] \{h\}_t$.

Вектор додаткових потоків на першій ітерації задається рівним нулю. В якості критерію збіжності використовуємо співвідношення:

$$\left| \{h\}^k - \{h\}^{k-1} \right| \leq \varepsilon, \quad (3.58)$$

де ε – мала невід'ємна величина.

У процесі програмної реалізації вищенаведений алгоритм доповнено автоматичним вибором кроку за часом. Швидкість збіжності ітераційного процесу була обрана як критерій зміни кроку.

3.4.2 Профільна задача масоперенесення забруднювальних речовин

З урахуванням водонасичення рівняння (3.41) для плосковертикального потоку запишемо в такому вигляді:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta S_w \tilde{D}_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta S_w \tilde{D}_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta S_w \tilde{D}_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta S_w \tilde{D}_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} (V_x c) - \frac{\partial}{\partial z} (V_z c) = \frac{\partial}{\partial t} [\theta S_w c + (1 - \theta) c_s] - qc^*, \end{aligned} \quad (3.59)$$

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

V_x, V_z – компоненти вектора швидкості фільтрації;

$$\theta S_w \tilde{D}_{xx} = \alpha_T |V| + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_x^2}{|V|} + \theta S_w \tau D^*;$$

$$\theta S_w \tilde{D}_{zz} = \alpha_T |V| + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_z^2}{|V|} + \theta S_w \tau D^*;$$

$$\theta S_w \tilde{D}_{xz} = \theta S_w \tilde{D}_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_x \cdot V_z}{|V|}; \quad (3.60)$$

де S_w – водонасичення, м³/м³;

τ – коефіцієнт звивистості;

$|V|$ – модуль вектора швидкості процесу фільтрації; α_L, α_T – коефіцієнти поздовжньої та поперечної дисперсії; q – продуктивність джерела, дм³/добу; c^* – концентрація забруднювальної речовини у джерелі забруднення, мг/л; c_s – концентрація забруднювальної речовини, адсорбованої на поверхні твердих частинок, мг/дм³.

Робимо припущення, що c і c_s лінійною пов'язані рівноважною ізотермою.

Рівняння (3.59) виразимо так:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{zz} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xz} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x c) - \\ & - \frac{\partial}{\partial z} (V_z c) = \frac{\partial}{\partial t} (\theta S_w k c) - qc^*, \end{aligned} \quad (3.61)$$

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_d – коефіцієнт

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

Використовуємо рівняння безперервності потоку

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

перепишемо рівняння (3.61) у такому вигляді

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - V_x \frac{\partial}{\partial x} - V_z \frac{\partial}{\partial z} + \\ & + c \frac{\partial}{\partial t} (\theta S_w) - qc = \theta S_w k \frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial}{\partial t} (\theta S_w) + c \frac{\partial}{\partial t} [(1-\theta) \rho_s k_d] - qc^*. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Складовою $c \frac{\partial}{\partial t} [(1-\theta) \rho_s k_d]$ через її малозначність можливо знехтувати,

тоді рівняння масоперенесення забруднювальної речовини виразимо так

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - V_x \frac{\partial c}{\partial x} - V_z \frac{\partial c}{\partial z} = \\ & = \theta S_w k \frac{\partial c}{\partial t} + q(c - c^*). \end{aligned} \quad (3.63)$$

Запишемо граничні умови першого роду

$$c = c^*(t), \quad (3.64)$$

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

Дисперсійні витрати речовини задаються граничними умовами другого роду:

$$D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} n_x + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} n_z = -q_c^D, \quad (3.65)$$

де q_c^D – витрата забруднювальної речовини, мг/добу; n_x, n_z – складові одиничного вектора нормалі до межі.

Значення концентрацій у всій розрахунковій області задаються початковими умовами.

3.4.2.1 Розв'язування профільної задачі масоперенесення забруднювальних речовин методом скінченних елементів

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

Уведемо апроксимацію розв'язку:

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

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

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

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

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

Оскільки під час перенесення розчиненої забруднювальної речовини конвекція відіграє велику роль, то застосовують метод зважування вгору за потоком [145].

Інтегруємо рівняння (3.63) за площею трикутного елемента за допомогою методу зважених нев'язок, та одержуємо таке рівняння:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} N_l^e \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} c_j^e \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zz} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} c_j^e \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zx} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} c_j^e \right) \right] d\Omega_e - \\ & - \int_{\Omega_e} N_l^e \left(V_x \frac{\partial W_j^e}{\partial x} c_j^e + V_z \frac{\partial W_j^e}{\partial z} c_j^e \right) d\Omega_e = \int_{\Omega_e} N_l^e N_j^e \left[\theta S_w k c_j^e + q (c_j^e - c_j^{*e}) \right] d\Omega_e \end{aligned} \quad (3.66)$$

Інтегруємо перший член в (3.63) за частинами, одержуємо таке рівняння

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega_e} \left(D_{xx} \frac{\partial N_l^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + D_{zz} \frac{\partial N_l^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} + D_{xz} \frac{\partial N_l^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} \right) c_j^e d\Omega_e + \\ & + \int_{l_e} N_l^e \left(D_{xx} \frac{\partial N_l^e}{\partial x} n_x + D_{zz} \frac{\partial N_l^e}{\partial z} n_z \right) c_j^e dl_e - \int_{\Omega_e} N_l^e \left(V_x \frac{\partial W_j^e}{\partial x} c_j^e + V_z \frac{\partial W_j^e}{\partial z} c_j^e \right) d\Omega_e = \\ & \int_{\Omega_e} N_l^e N_j^e \left[\theta S_w k c_j^e + q (c_j^e - c^*) \right] d\Omega_e, \end{aligned} \quad (3.67)$$

де $I, J = 1, 2, 3$, l_e – границя елемента.

Перепишемо рівняння (3.67) у матричному вигляді та введемо позначення:

$$\left[E_D^e \right] \cdot \{c^e\} + \left[E_v^e \right] \{c^e\} + \left[P^e \right] \{c^e\} = \{F^e\} \quad (3.68)$$

де $\left[E_D^e \right] = \int_{\Omega_e} \{N_e\} \{V^e\} \left[G^e \right] d\Omega_e$ – матриця конвекції;

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

$\left[D^e \right]$ – тензор гідродинамічної дисперсії;

$\{V^e\}$ – вектор швидкості;

$\left[G^e \right]$ – матриця похідних зважувальних функцій;

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

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

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

вузлових потоків елемента.

Зважувальні функції W виберемо так, щоб їх похідні мали такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_1}{\partial \xi} &= 1 + 6\alpha\xi; \quad \frac{\partial W_1}{\partial \eta} = 0; \\ \frac{\partial W_2}{\partial \xi} &= 2; \quad \frac{\partial W_2}{\partial \eta} = 1 + 6\beta\eta; \\ \frac{\partial W_3}{\partial \xi} &= -1 = 6\alpha\xi; \quad \frac{\partial W_3}{\partial \eta} = -1 - 6\beta\eta. \end{aligned} \quad (3.69)$$

У рівнянні (3.68) α і β – вагові коефіцієнти в напрямку осей координат ξ і η відповідно. Знаки α і β визначають залежно від знака відповідної складової вектора швидкості. Матрицю конвекції перепишемо наступним чином

$$\left[E_v^e \right] = \frac{\Delta}{3} \left(\begin{bmatrix} 1+\alpha & 0 & -1-\alpha \\ 1-\frac{\alpha}{2} & 0 & -1+\frac{\alpha}{2} \\ 1-\frac{\alpha}{2} & 0 & -1+\frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} + V_z \begin{bmatrix} 0 & 1-\frac{\beta}{2} & -1+\frac{\beta}{2} \\ 0 & 1+\beta & -1-\beta \\ 0 & 1-\frac{\beta}{2} & -1+\frac{\beta}{2} \end{bmatrix} \right), \quad (3.70)$$

де Δ – площа елемента.

Під час введення даних зважувальних функцій основну вагу приділяли значенням концентрацій у вузлах, що розміщені вгору за потоком. Якщо в процесі масоперенесення ЗР переважає конвекція, то враховуємо, що на величину концентрації речовини в будь-якому елементі впродовж певного часу значно впливає конвективний приплив речовини з розміщеного вище за потоком суміжного елемента. Під час розв'язування нестационарної задачі масоперенесення забруднювальної речовини розрахунковий інтервал часу розбивали на проміжки інтегрування Δt . Потім на кожному кроці за часом застосовували неявну різницеву схему.

Використаємо різницеву схему Пікара для чисельного інтегрування рівняння (3.67):

$$\omega \left(([E_D^e] + [E_v^e]) + \frac{[p^e]}{\Delta t} \right) \{c^e\}_{t+\Delta t} = (\omega - 1) ([E_D^e] + [E_v^e]) \{c^e\}_i + \omega \{F^e\}_{t+\Delta t} + (1 - \omega) \{F^e\}_t, \quad (3.71)$$

де Δt – крок за часом, $t + \Delta$ і t – значення функцій у поточний та попередній моменти часу; ω – ваговий тимчасової коефіцієнт, до дорівнює 0,5.

Додаємо (3.69) за всіма елементами за правилом ансамблю, тоді одержуємо таке рівняння:

$$0,5 \left(([E_D^e] + [E_v^e]) + \frac{[p]}{\Delta t} \right) c_{t+\Delta t} = 0,5 ([E_D] + [E_v]) c_t + \frac{[p]}{\Delta t} c_t + 0,5 F_{t+\Delta t} + 0,5 F_t, \quad (3.72)$$

Алгоритм розв'язування задач було виконано за допомогою програмного продукту COMSOL Multiphysics.

Вищезазначені алгоритми використовували для розв'язування як одновимірних, так і двовимірних задач моделювання забруднення водних об'єктів в зоні розміщення об'єкта теплоенергетики.

3.5 Моделювання фільтрації забруднювальних речовин із місць складування золошлакових відходів

3.5.1 Одновимірна задача фільтрації

Під час моделювання фільтрації забруднювальних речовин розраховували одновимірну задачу перенесення речовини за течії забруднених вод із сталою швидкістю V :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - V \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (3.73)$$

Нестислива рідина ($\rho = \text{const}$, $\mu = \text{const}$) розглядається в однорідному ґрунті ($k_f = \text{const}$). Вважаємо, що забруднені води течуть уздовж осі z , направленої вертикально вниз від поверхні. Бокові межі області розповсюдження забруднювальних речовин на процес фільтрації не впливають.

Моделювання проводили за умови постійного вологонасичення $S_w = \text{const}$. Як забруднювальну речовину взяли KCl . Для розрахунку брали такі дані: $D = 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$; $\tau = 0,7$; $\theta = 0,35$; $k_f = 0,1 \text{ м/добу}$; $a_L = 0,005 \text{ м}$.

Запишемо початкові умови: $c(z; 0) = 0$.

Граничні умови: за $z = 0 \text{ м}$ $c(0; t) = c_0$; при $z = L$ $c(L; t) = c$.

За наведених початкових і граничних умов розв'язання рівняння (3.72) дозволило одержати профілі концентрацій забруднювальних речовин під час фільтрації в різний момент часу (рис. 3.10).

Візуалізація розрахунків за 1 рік, подана на рисунку 3.11, показала, що зміна концентрації забруднювальної речовини відповідає зміні гідростатичного тиску по профілю ґрунту.



Рисунок 3.10 – Зміна концентрації забруднювальної речовини за товщиною ґрунту під час фільтрації в різний момент часу:

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

3.5.2 Перевірка адекватності математичної моделі

Колонку з матеріалом насичували дистильованою водою. Фільтрація проводилася в стаціонарних умовах. Вимірювали час, який тривало проходження певного обсягу дистильованої води, з метою визначення щільності водного потоку в матеріалі. На підставі одержаних експериментальних результатів розраховували водонасичення та швидкість руху: $S_w = 0,32 \text{ м}^3/\text{м}^3$ і $w = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$.

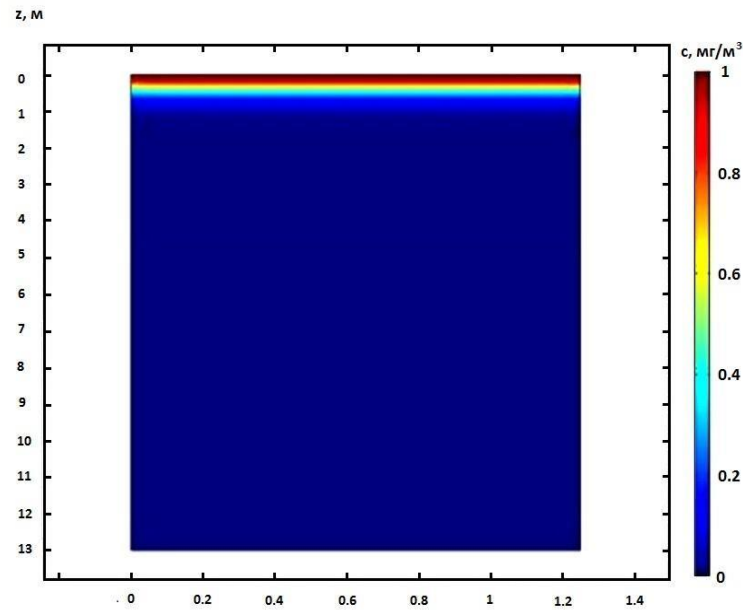


Рисунок 3.11 – Концентрація забруднювальної речовини за глибиною ґрунту за 1 рік

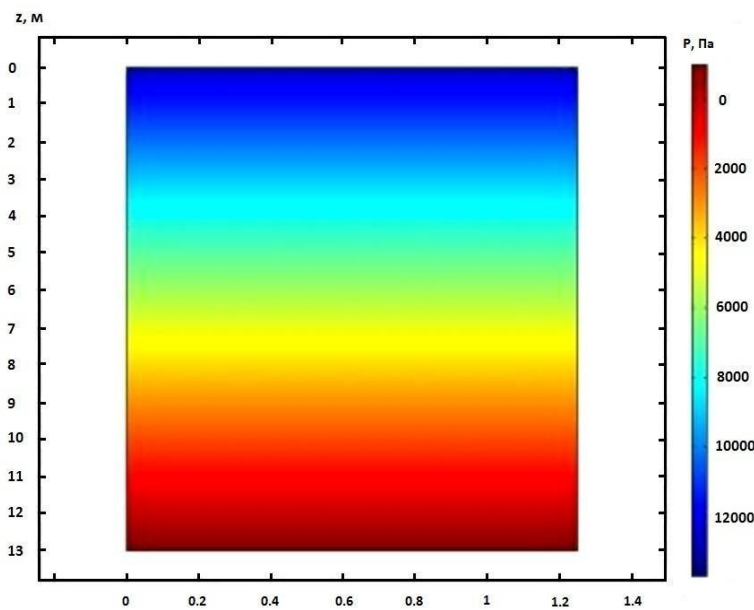


Рисунок 3.12 – Гідростатичний тиск у шарах ґрунту за 1 рік

Потім подавали в колонку досліджувану забруднювальну речовину з певною концентрацією. Через те, що в розрахунках сорбційні процеси, які проходять під час перенесення забруднювальної речовини, не були враховані, то у процесі проведення експерименту використовували розчин KCl з концентрацією 0,5 н. Періодично вимірювали концентрацію в розчині іонів Cl^- на виході з установки під час фільтрації та фіксували час проходження

забруднювальної речовини. За допомогою одержаних результатів побудували графік вихідної кривої (рисунок 3.13).

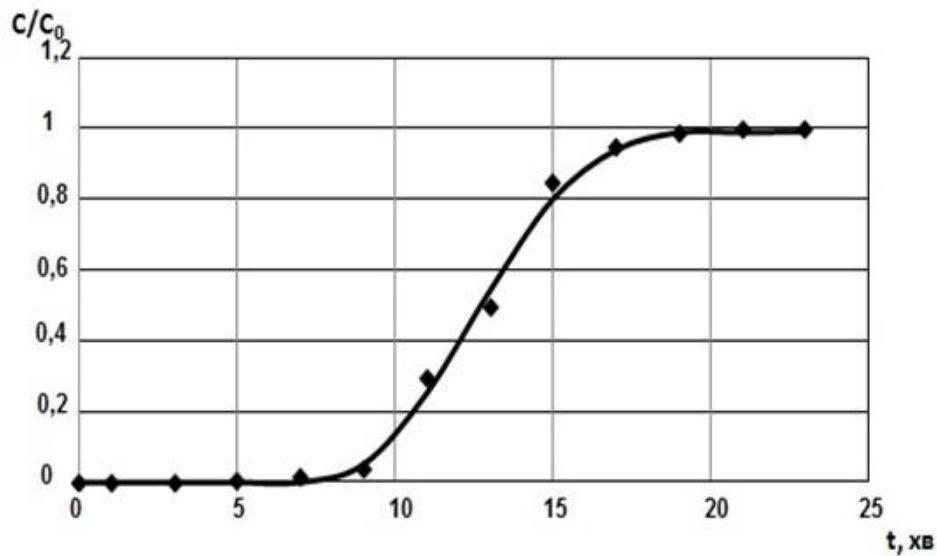


Рисунок 3.13 – Залежність концентрації забруднювальних речовин від часу фільтрації за математичною моделлю (лінія) та експериментальними даними (точки)

Розв'язування математичної моделі здійснювали за таких початкових та граничних умов.

Початкові умови: $c(z; 0) = 0$.

Граничні умови: за $z = 0$ м $c(0; t) = c_0$; за $z = 0,3$ м $c(0,3; t) = c$.

Порівнюючи результати моделювання з даними, отриманими експериментально (рис. 3.4), одержали похибку розрахунку меншу за 5%. Отже, математична модель адекватно описує фільтраційні процеси.

3.5.3 Двовимірна задача фільтрації

Математичну модель використали для задачі моделювання фільтрації забруднювальних речовин із золошлаконакопичувача.

Під час розрахунків брали умови золошлаконакопичувача об'єкта теплоенергетики. Джерелом забруднення був золошлаконакопичувач розміром 180×300 м. Ґрунт взяли однорідний. Коефіцієнт фільтрації $k_f = 0,1$ м/добу,

пористість $\theta = 0,35$, товщина ґрунтового шару $L = 7$ м, коефіцієнти поперечної та поздовжньої дисперсії $\alpha_T = 0,005$ м та $\alpha_L = 0,05$ м відповідно, коефіцієнт молекулярної дифузії $D = 0,04$ м²/рік. Інтенсивність дощових опадів $q = 0,6$ м/рік. Із золошлаконакопичувача надходять забруднювальні речовини з концентрацією $c^* = 1$ мг/м³. Вважаємо непроникною нижню межу ґрунтового шару.

На рисунку 3.14 наведена розрахункова схема задачі.

Зону забруднення розділили на 10 шарів, у кожному по 240 елементів. Унаслідок цього отримали сітку з 2 400 елементів та 1 560 вузлів. Крок у часі бравли 0,1–0,2 роки.

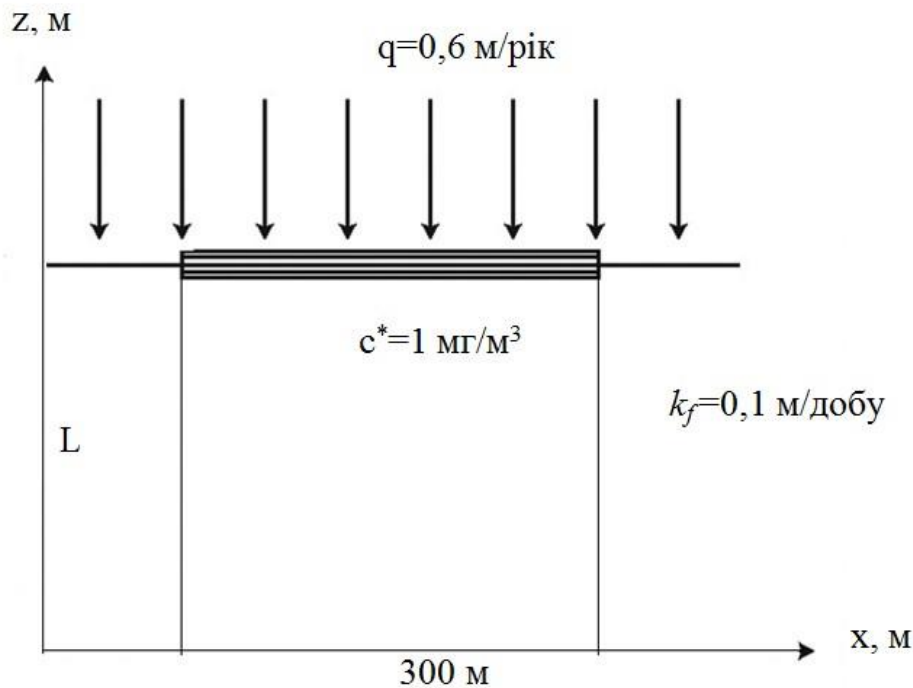


Рисунок 3.14 – Розрахункова схема двовимірної задачі перенесення забруднювальної речовини

Одержали ізолінії концентрації забруднювальної речовини, що характеризують надходження забруднення за період 5 (рис. 3.15) та 10 років (рис. 3.16) [146].

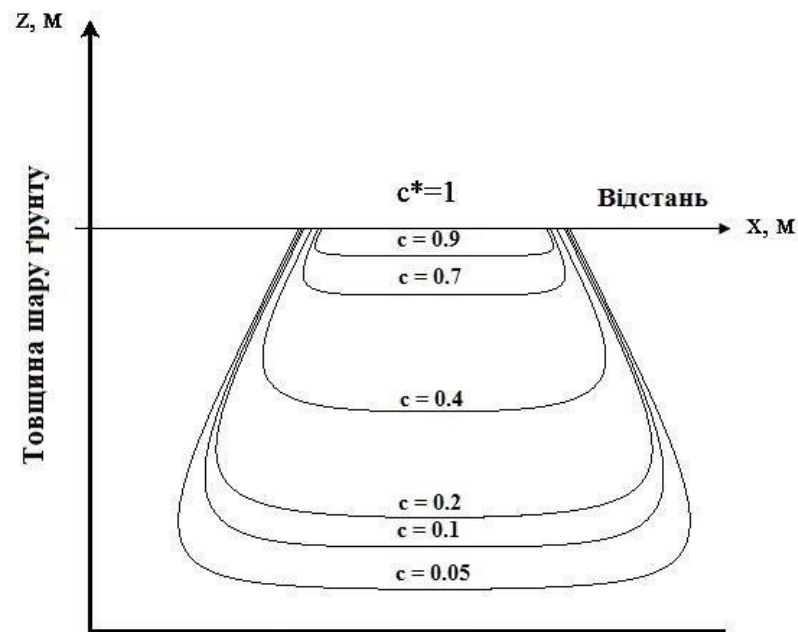


Рисунок 3.15 – Ізолінії концентрації забруднювальної речовини за 5 років

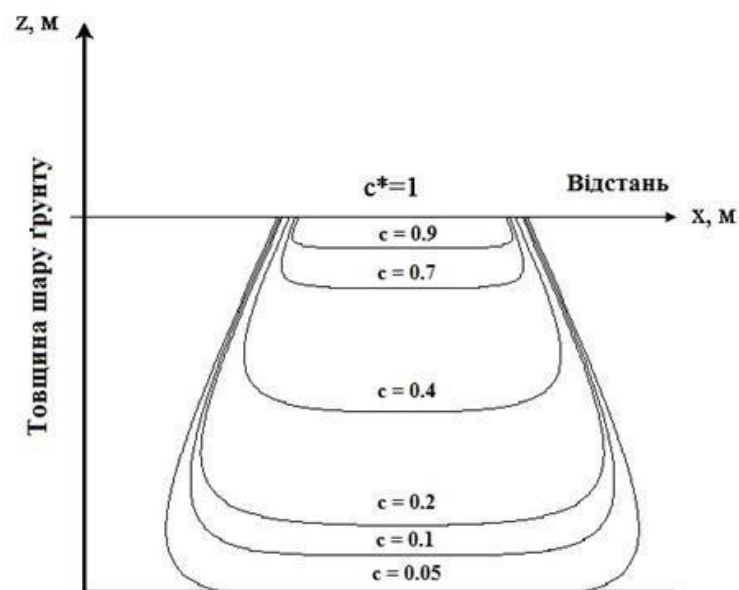


Рисунок 3.16 – Ізолінії концентрації забруднювальної речовини за 10 років

Як бачимо з одержаних результатів, більш швидке поширення забруднювальних речовин відбувається вниз за профілем, що пояснюється тим, що поздовжня дисперсія переважає над поперечною. Все це вимагає розроблення заходів щодо попередження фільтрації забруднювальних речовин із золошлаконакопичувача.

3.6 Моделювання перенесення забруднювальних речовин у зоні аерації об'єктів теплоенергетики

Під час моделювання процесу міграції забруднювальних речовин у зоні аерації теплоенергетичних об'єктів враховують перенесення їх з опадами через інфільтрацію. Потік рідини в цьому разі спрямований перпендикулярно до поверхні ґрунту.

У реальних умовах перерозподіл розчиненої речовини на ґрунтовій поверхні за вертикальним напрямком за рахунок порушення структури ґрунту, ерозії та інших процесів протікає більш швидко, ніж у горизонтальному напрямку. Ось чому під час моделювання перенесення забруднювальних речовин у зоні аерації повністю виправдано використання одновимірних моделей.

Була розглянута нестационарна задачу профільної фільтрації. На основі її результатів була розв'язана задача перенесення забруднювальних речовин. Водночас бралася до уваги зміна водонасичення з часом з рівняння (3.63).

Під час моделювання перенесення ЗР під час інфільтрації вибрали такі умови: середня температура повітря – 19,2 °С; відносна вологість – 70 %; інтенсивність опадів – 77 мм/міс;,, що характерно для метеорологічних умов в липні. При цьому вважали, що температура й відносна вологість приповерхневого шару повітря дорівнюють цим же параметрам ґрунтової поверхні. Усі інші умови відповідали задачі фільтрації забруднювальних речовин.

У першому наближенні розглядали насичення ґрунту лише повітрям, водночас тиск приземного шару дорівнює тиску атмосферному.

В результаті розв'язання цієї задачі одержали залежність концентрації забруднювальної речовини за глибиною ґрунту в певний час (5 дію) після випадання опадів (рис. 3.17).

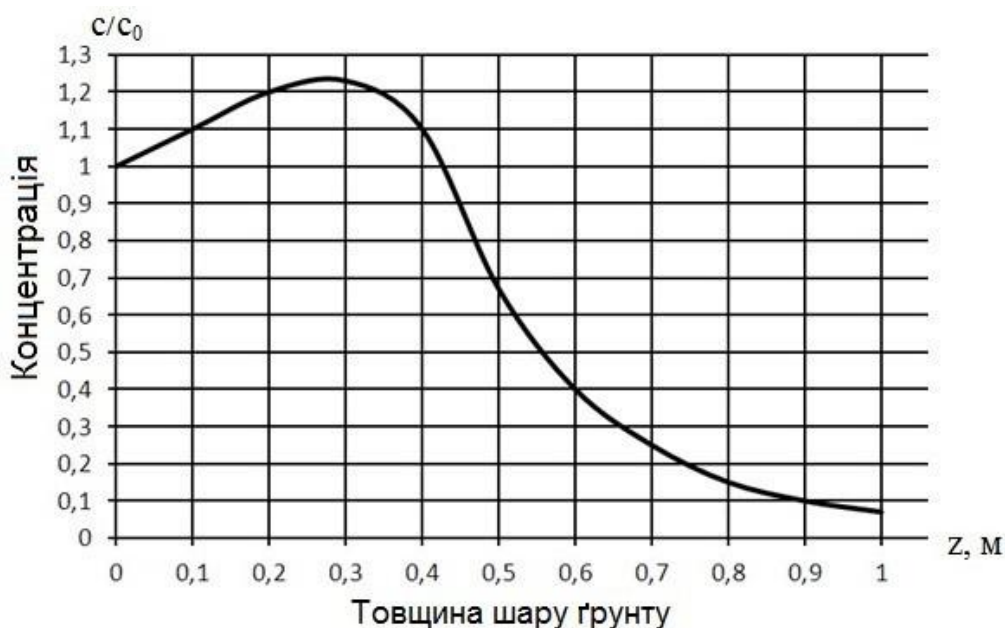


Рисунок 3.17 – Зміна концентрації забруднювальної речовини під час інфільтрації на 5-ту добу

Отримали, що на глибині 25–35 см від ґрунтової поверхні у зоні інфільтрації спостерігається максимальна концентрація забруднювальної речовини, далі концентрація поступово знижується та на глибині 1 м наближається до початкової. Це свідчить про те, що аераційне перенесення забруднювальної речовини призводить до забруднення орного ґрунтового шару та потенційного забруднення рослинного покриву у разі транслокаційного перенесення токсичних речовин, що ставить завдання з розроблення природоохоронних заходів.

Отже, математична модель враховує інтенсивність опадів та їх вплив на перенесення забруднювальних речовин вниз за ґрунтовим профілем та водонасичення, дає змогу прогнозувати поширення забруднювальних речовин під час фільтрації та інфільтрації. На підставі одержаних даних можливо розробляти природоохоронні заходи з метою підвищення рівня екологічної безпеки територій, прилеглих до об'єктів теплоенергетики.

Висновки до розділу 3

У розділі розглянуто та систематизовано фактори, що впливають на навколишнє природне середовище, техногенні речовини у зоні розміщення об'єктів теплоенергетики.

Розроблено математичні моделі забруднення навколишнього природного середовища, враховуючи техногенний вплив у зоні розміщення теплових електростанцій.

На базі методу кінцевих елементів були розроблені алгоритми чисельного розв'язування задач профільної фільтрації та перенесення забруднювальних речовин.

Проведено експериментальні дослідження міграції забруднювальних речовин в золошлаконакопичувачі та забруднення атмосферного повітря.

Аналіз адекватності розробленої математичної моделі щодо експериментальних даних свідчить про її адекватність, при цьому відхилення моделі та експерименту не перевищує похибки 5 %.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [119].

РОЗДІЛ 4

ДООЧИЩЕННЯ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ПІД ЧАС ДЕСТРУКЦІЇ ПАЛИВА

4.1 Зменшення оксидів азоту у відхідних газах

Механізм утворення NO з вугілля показаний на рисунку 4.1. Обвуглений азот окиснюється до оксиду азоту в результаті низки реакцій. Леткий азот бере участь у паралельно-послідовній реакції, в якій NO утворюється в результаті окиснення леткого азоту [147]. Частина оксиду азоту, що утворився вище, також відновлюється до азоту. Велика кількість складних хімічних реакцій залучено до утворення та руйнування оксиду азоту як із напівкоксу, так і з летких речовин вугілля. Деякі з цих реакцій каталізуються кальцинованим вапняком (CaO), відпрацьованим вапняком (CaSO₄) і вугіллям.

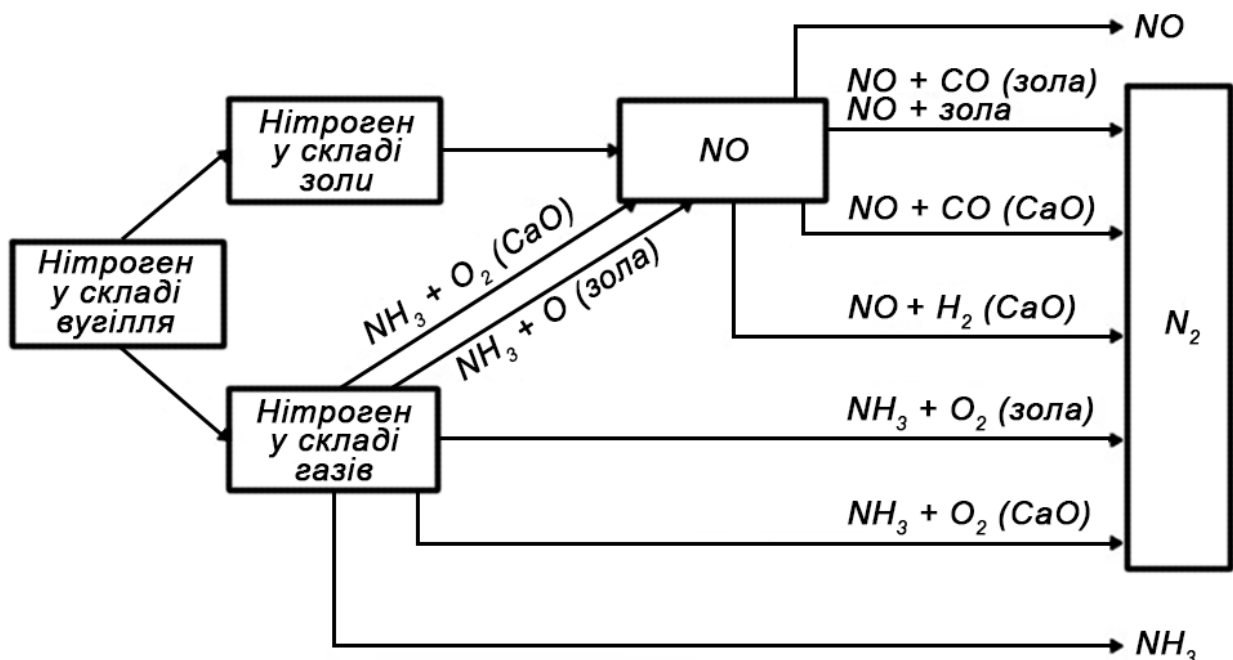


Рисунок 4.1 – Відносне значення (у відсотках від загальної кількості азоту в паливі) різних шляхів реакції в утворенні та відновленні оксиду азоту. Зола та оксид кальцію каталізують деякі реакції, наведені в дужках [148]

Дж. Джонсон [148] подав список можливих реакцій і їх констант швидкості. Внесок кожної реакції в утворення NO або в його подальше руйнування неоднаковий. Наприклад, 77 % азоту в паливі окиснюється до NO внаслідок вищезазначених реакцій, а інша частина – NH_3 , який, в свою чергу, частково перетворюється на азот (рис. 4.1).

Утворення NO_x в системі згоряння може бути до певної міри знижене за рахунок відповідних модифікацій системи згоряння. Модифікації передбачають таке:

Зниження температури згоряння

Низька температура горіння перешкоджає окисненню азоту в повітрі до термічних NO_x . Таким чином, утворення термічних NO_x незначне в діапазоні температур 800–900 °С. NO_x утворюється переважно з паливного азоту, який знову зменшується з температурою.

Ступінчасте подання повітря

Замість того, щоб подавати все повітря для горіння через нижню частину зони горіння в нижній топці ЦКШ, його частина може бути додана до секції вище в печі. Таке ступінчасте подання повітря для горіння має значний позитивний вплив на зниження викидів NO_x , особливо для вугілля з високою леткістю. Недостатня кількість повітря для горіння, що проходить через нижню частину печі, сприяє відновленню оксиду азоту за допомогою напівкоксу і СО в нижній зоні. Типовий пальник з низьким викидом NO_x в котлі також працює за тим самим принципом, що й повітря для горіння, і знижує NO_x на 40–50 %.

Оскільки повітря для горіння в котлі ЦКШ повинно подаватися поетапно, він, звісно, матиме нижчу емісію NO_x , ніж котел із барботажним псевдозрідженим шаром, який також працює в діапазоні низьких температур 800–900 °С.

Уприскування аміаку

Відповідне вприскування аміаку (NH_3) у верхню частину топки або в циклон котла ЦКШ може додатково знизити викиди NO_x . Однак існує певна

небезпека потрапляння NH_3 до твердих відходів або димового газу, що створює додаткові ризики. Під час спалювання вугілля, що містить хлор, через димову трубу може виділятися хлорид амонію. Отже, за додаванням NH_3 потрібно уважно стежити.

Зменшення надлишку повітря

Викиди NO_x з котла ЦКШ збільшуються з надлишком повітря, як показано на рисунку 4.2. Таким чином, викид NO_x може бути до певної міри знижений за рахунок зменшення кількості надлишкового повітря. Зменшуючи надлишок повітря з 30 % до 10 %, в деяких випадках викиди можуть бути зменшені з 150 ppm до 80 ppm [149].

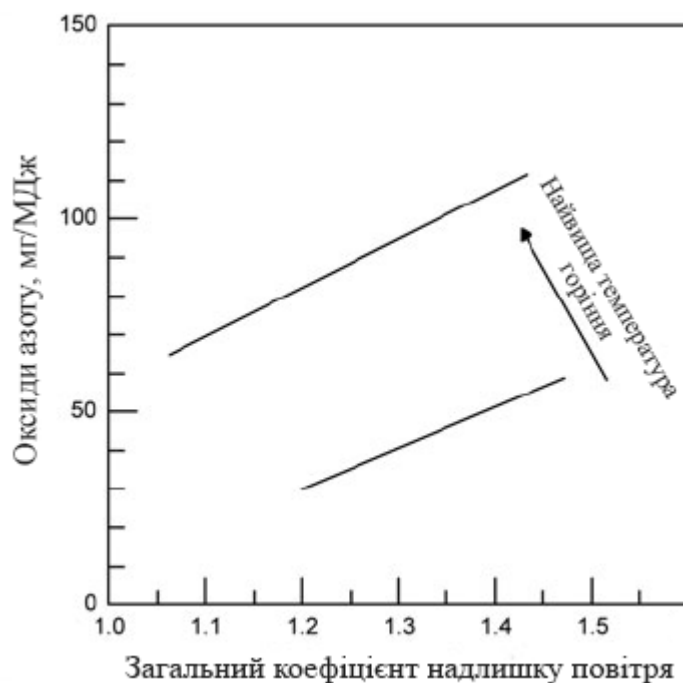


Рисунок 4.2 – Викиди NO_x порівняно з надлишком повітря [150]

4.1.1 Механізм утворення N_2O в циркулюючому киплячому шарі

Механізм утворення N_2O у вугільному котлі з ЦКШ менш вивчений, ніж у газоподібному полум'ї. У газоподібному полум'ї проміжна горюча сполука HCN є важливим джерелом N_2O , але закис утвореного азоту негайно руйнується в результаті реакції з водневими радикалами [151]. У разі спалювання вугілля HCN утворюється з летких компонентів вугілля, що

залишає можливість утворення N_2O . Однак ступінь руйнування N_2O збільшується з підвищенням температури реакції.

N_2O може також вироблятися за рахунок:

- відновлення оксиду азоту вуглецем у вугіллі;
- прямого окиснення напівкоксів азоту під час горіння.

У діапазоні 800–900 °C швидкість утворення закису азоту з напівкоксів азоту пропорційна швидкості горіння [152]. Однак експерименти за більш високих температур (> 900 °C) у вугільних пластах виявили незначне окиснення напівкоксів азоту або відновлення NO напівкоксів вуглецем у загальні викиди закису азоту.

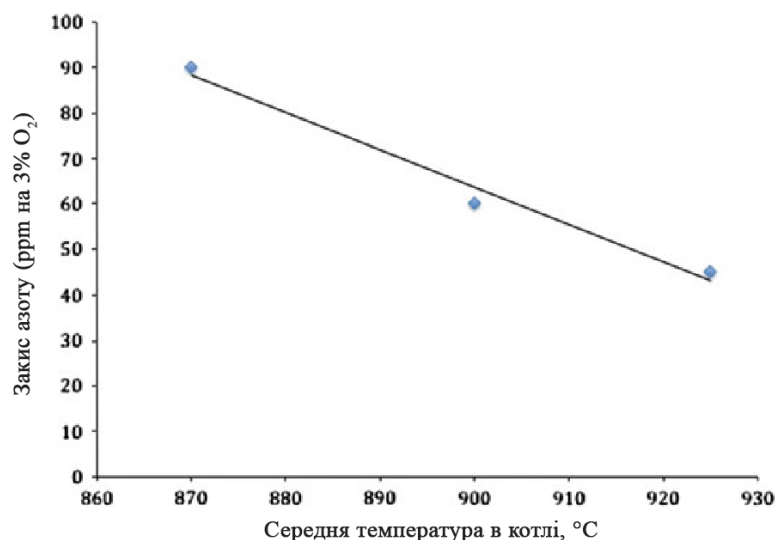


Рисунок 4.3 – Викиди закису азоту зменшуються зі збільшенням температури шару. Дані взяті для котла ЦКШ потужністю 110 МВт, що працює за різних навантажень [153]

На рисунку 4.3 показана зміна викидів N_2O за різних температур комерційного котла з ЦКШ. Викиди закису азоту з котлів із ЦКШ зазвичай містяться в діапазоні 50–200 ppm [154], збільшуючись від низької до високої температури згоряння. У котлах, що працюють на пиловугільному паливі, викиди N_2O перебувають у діапазоні 3–4 частин на 1 мільйон [155].

Зменшення викидів N₂O

Лише невелика частина азоту напівкоксу (5 %) перетворюється на закис азоту, але її відновлення на поверхні напівкоксу відбувається швидше, ніж відновлення NO [152]. На відміну від відновлення NO це зниження не залежить від концентрації CO.

Перетворення вугільного азоту на закис азоту залежить від процесу видалення летких речовин. Було відзначено [156], що коли вугілля нагрівається з помірною швидкістю до 900 °С, лише невелика частина вугільного азоту з'являється у вигляді HCN, який є основним джерелом закису азоту. Таким чином, контроль швидкості видалення летких речовин із вугілля може дати ключ до розгадки процесу зниження вмісту закису азоту в котлах із ЦКШ.

Подання вугілля в ділянці контуру ЦКШ з використанням більш низької швидкості теплопередачі може сповільнити процес видалення летких речовин.

4.2 Зменшення діоксидів сірки у відхідних газах

Наступні хімічні реакції відіграють важливу роль в утворенні і захопленні діоксиду сірки в псевдозріджених шарах.

Утворення діоксиду сірки

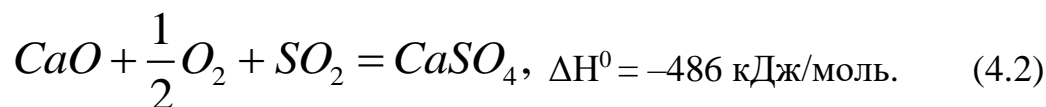
Коли вугілля горить, сірка окиснюється переважно до діоксиду сірки за наступною екзотермічною реакцією.



де ΔH^0 – ентальпія утворення за стандартних умов (1 атм, 25 °С).

Викиди діоксиду сірки зазвичай виражаються в об'ємних частинах на мільйон об'ємних частин (ppm) димового газу. Оскільки теплотворна здатність вугілля змінюється, сірка, що виділяється установкою із заданим тепловкладенням, також буде змінюватися. Таким чином, викиди SO₂ іноді також виражаються у вигляді викидів забруднювальних речовин на одиницю виділеної енергії (г/МДж).

Мінеральні речовини у вугіллі можуть містити деяку кількість CaO, яке поглинає частину діоксиду сірки у вигляді сульфату кальцію:



Інша частина діоксиду сірки виділяється в атмосферу. Деяка частина діоксиду сірки може бути перетворена на триоксид сірки:



Утворення триоксиду сірки залежить від часу перебування газу, температури, надлишку повітря та наявності каталітичних поверхонь у печі.

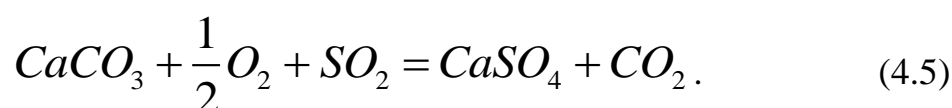
Реакції (4.3) сприяють висока температура й тиск. Оскільки реакція проходить повільно, лише невелика частина діоксиду сірки встигає перетворитися на триоксид сірки [157, 158]. Однак триоксид сірки може контактувати з вологою в димовому газі, легко утворюючи сірчану кислоту, яка потім конденсується на холодних поверхнях:



Конденсація вологи в димовому газі нижче від точки роси призводить до її накопичення на вуглецевих матеріалах з утворенням агломератів, які вибухають і виходять через димохід у вигляді кислотного смогу.

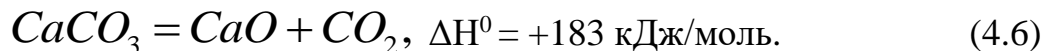
Утримання SO₂

Вапняк (CaCO₃) та доломіт (CaCO₃ · MgCO₃) – два основні сорбенти, які можна використовувати для поглинання діоксиду сірки в камерах згоряння з псевдозрідженим шаром. На додаток до цього, деякі синтетичні сорбенти також розробляють, але їх використання все ще обмежене. Хоча реальна реакція проходить поетапно, загальну хімічну реакцію вловлювання сірки можна записати так:



Кальцинування

Рівняння (4.5), за яким поглинається SO_2 , не виконується за один крок. Першим етапом є кальцинування, коли вапняк розкладається на CaO і CO_2 внаслідок ендотермічної реакції:



Пряма реакція карбонату кальцію з діоксидом сірки (рівняння (4.5)) за температур псевдозрідженого горіння (800–900 °С) настільки повільна, що діоксид сірки, абсорбований унаслідок прямої реакції (рівняння (4.5)) з карбонатом кальцію, незначний. Реакція в рівнянні (4.5) має відбуватися в результаті розкладання (прожарювання) $CaCO_3$ до оксиду кальцію і діоксиду вуглецю (рівняння (4.6)).

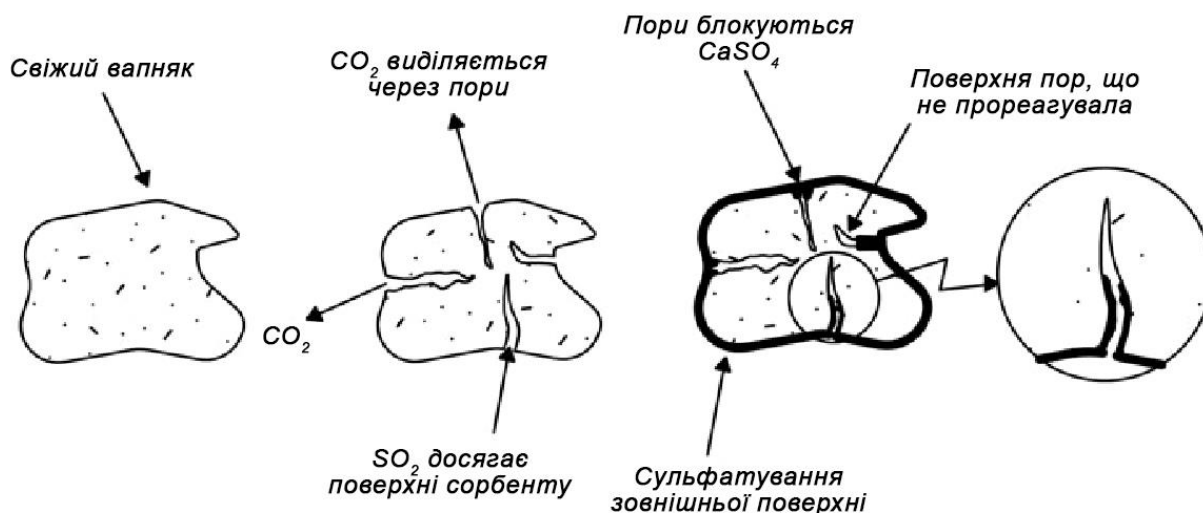


Рисунок 4.4 – Поглинання діоксиду сірки сорбентами (вапняком)

Вуглекислий газ, що виділяється під час прожарювання, створює і збільшує безліч пор у частинці вапняку (рис. 4.4), що відкриває додаткові площі поверхні для подальших реакцій сульфатування (рівняння (4.9) і (4.10)).

Половинне кальцинування

Крім вапняку ($CaCO_3$), доломіт ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) є іншим сорбентом, який можна використовувати для вловлювання сірки. Ця сполука складається з карбонату кальцію і карбонату магнію. Під час нагрівання вона легко

розкладається на суміш двох типів карбонатів за температури близько 620 °С.

Реакція ендотермічна:



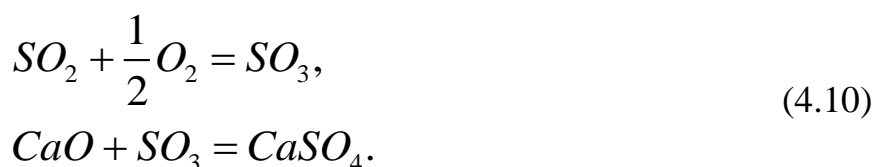
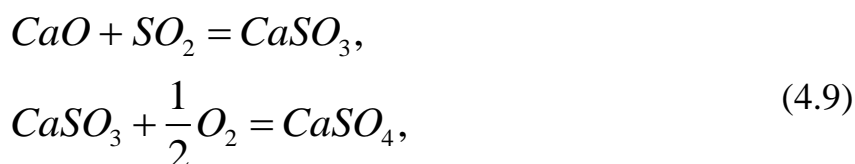
Карбонат магнію легко прожарюється за будь-яких температур і тисків горіння:



Оксид магнію настільки повільно реагує з SO₂ за температури від 540 °С до 980 °С, що його можна розглядати як інертний. Однак вуглекислий газ, що виділяється зсередини сорбенту за формулою (4.8), створює пори в частинках сорбенту. Це дозволяє діоксиду сірки проникати всередину сорбенту і реагувати з кальцієм до утворення CaSO₄ за допомогою реакції сульфатування, як описано в рівняннях (4.9) і (4.10) нижче.

Сульфатування

Другий етап уловлювання сірки під час спалювання в псевдозрідженому шарі – сульфатування, коли оксид кальцію поглинає діоксид сірки, утворюючи сульфат кальцію. Оскільки сульфат кальцію є відносно інертною і стабільною твердою речовиною, його легко утилізувати:



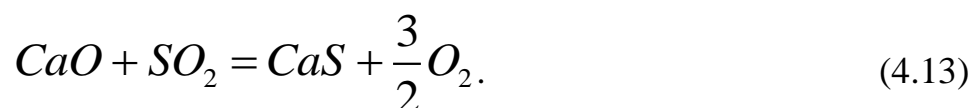
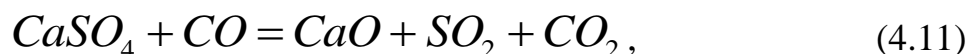
Другий шлях реакції через SO₃ можливий лише тоді, коли йому допомагають каталізатори на основі солей важких металів [159]. Оксид кальцію, одержаний прожарюванням, рівняння (4.6), не може бути повністю перетворений на сульфат кальцію за допомогою наведених вище рівнянь.

Реакції сульфатування включають збільшення обсягу твердої фази. Наприклад, один моль CaCO₃ дає 1 моль CaSO₄, а один моль CaO займає

16,9 см³. Один моль CaCO₃ займає 36,9 см³, а один моль CaSO₄ має об'єм 52,2 см³. Таким чином, пори і входи в пори цього сорбенту закупорені через великий об'єм продукту реакції – CaSO₄. Це показано на рисунку 5.3. Таким чином, лише частина сорбенту може бути використана для сульфатування.

Зворотне сульфатування

За певних умов сульфат кальцію може бути відновлений CaO, вивільняючи SO₂ [160, 161]:



Нижня частина камери згоряння ЦКШ працює в субстехіометричних умовах через поетапне додавання повітря для горіння, і вона багата СО. Реакція (4.11), хоча й проходить за дуже високих температур, все ж може проходити за відносно низьких температур, якщо є достатня кількість СО. Поетапне додавання повітря для горіння, яке є характеристикою камери згоряння ЦКШ, не обов'язково сприяє ефективному вловлюванню сірки.

Висновки до розділу 4

Проведено дослідження утилізації відхідних газів за деструкції палива на об'єктах теплоенергетики. Сформовано механізм зв'язування азотних та сірчистих сполук у зоні деструкції палива. Запропоновано режим роботи пристроїв об'єктів теплоенергетики з повною утилізацією техногенних газів.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [119]

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Проведене у роботі оцінювання впливу Чернігівської ТЕЦ на атмосферне повітря та об'єкти гідросфери свідчить, що золошлаконакопичувач негативно впливає на підземні води, а газові викиди є джерелом впливу на атмосферу. Це вимагає поставлення завдання з розроблення природоохоронних заходів для попередження забруднення підземних горизонтів та атмосферного повітря з метою підвищення рівня екологічної безпеки територій, прилеглих до об'єктів теплоенергетики.

За останні роки комплексний підхід до управління екологічною безпекою набув значного розвитку. Цей підхід включає всебічне вивчення та аналізування умов формування небезпеки та домінування різних технічних методів для регулювання її станів. Згідно директиви «Про інтегроване попередження забруднення й контролю над ним», що була опублікована ЄС у 1996 році, на основі екологічного аудиту ухвалюється рішення про можливість одержання інтегрованого дозволу на викиди забруднювальних речовин у атмосферне повітря, скидання їх у об'єкти гідросфери, розміщення відходів. Під час аудиту складається баланс забруднювальних речовин для кожного виду виробництва, вираховуються всі викиди, скиди й відходи. Потім екологічні показники порівнюють з базовими показниками так званих «найкращих доступних методів», виконують оцінювання енергоефективності, ймовірності виникнення аварій, розробляють заходи з усунення їх наслідків та план реабілітації території. Як «найкращі доступні методи» прийняті найбільш ефективні методи керування, що дають змогу попереджати викиди та скиди забруднювальних речовин у навколишнє середовище та обмежувати інші негативні впливи на нього. Якщо це неможливо, то принаймні зменшити такий негативний вплив.

Прийняття державних стандартів екологічного управління є важливим і необхідним стимулом інноваційних процесів [162, 163]. Орієнтація виробництва на дотримання вимог екологічних стандартів, вимог стабілізує та оптимізує роботу обладнання, сприяє його удосконаленню, технічному переоснащенню. Саме завдяки цьому екологічні нормативи можуть додержуватися максимально. Ураховуючи вищезазначене, технічні методи щодо попередження негативного впливу золошлакових відходів на об'єкти гідросфери можна поділити на дві основні групи: активні та пасивні. Активними передбачено зменшення утворення відходів, пасивні – зменшують вплив існуючих місць складування ЗШВ (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Методи зниження техногенного навантаження від ЗШВ

Активні методи включають оптимізацію технологічних процесів та природоохоронних заходів. Разом з цим оптимізацію технологічних процесів спрямовують на вибір режимів згоряння палива, що дає змогу зменшити обсяг утворених золошлакових відходів.

Мета оптимізації природоохоронного процесу – вилучення найбільшої маси забруднювальних речовин за певний проміжок часу [164]. На теплоенергетичних об'єктах доцільно реалізувати принцип оптимізації цих процесів застосуванням високоефективних очисних пристроїв. У цьому разі оптимізацію природоохоронного процесу необхідно розглядати як вирішення оптимізаційного завдання. Інтенсивність очисних пристроїв при цьому приймають як параметр оптимізації.

Пасивні методи зниження техногенного навантаження спрямовані на попередження забруднення під час проектування або розширення площі місць складування золошлакових відходів шляхом улаштування захисних екранів, а також на зменшення відходів у вже існуючих золошлакозакладах під час перероблення відходів.

5.1 Техногенне навантаження на довкілля

Характеристика палива, яке використовується:

– основним паливом є антрацитовий штиб Донецького вугільного басейну з калорійністю $Q_{н}^p = 5\ 089$ ккал/кг;

– як резервне та розпалювальне паливо використовують природний газ із нижчою теплотворною здатністю $Q_{н}^p = 8\ 276$ ккал/м³.

Склад природного газу: метан – 90,01 %, етан – 5,02 %, пропан – 1,16 %, ізобутан – 0,14 %, бутан – 0,2 %, ізопентан – 0,05 %, неопентан – 0,04 %, пентан – 0,04 %, гексан – 0,04 %, азот – 1,58 %, діоксид вуглецю – 1,77 %, кисень – 0,004 %.

Період	Природний газ, тис. м ³	Вугілля, тонн
2010	139 396	459 967
2011	124 438,016	546 484
2012	99 242,26	

Подають тверде паливо на територію станції залізницею, природний газ – газопроводом.

Максимальні запаси вугілля, що зберігаються на складах Чернігівської ТЕЦ і використовуються за 1 рік, становить 134 000 тонн.

Продуктивність подання палива складає 200 т/год. Ширина конвеєрних стрічок становить 800 мм. Максимальні запаси топкового мазуту, що зберігається, становить 2 резервуари по 10 000 м³.

Теплопостачання

Установлена теплова потужність ТЕЦ становить 450 Гкал/год. Теплове навантаження в максимальному теплофікаційному режимі (зимовому) становить близько 170,0 Гкал/год.

Реконструкція Чернігівської ТЕЦ передбачає збільшення теплової й електричної потужності.

Забезпечення ТЕЦ водою

Основним джерелом технічного водопостачання ТЕЦ є річка Десна. Система технічного водопостачання – прямотечійно-зворотною.

Подання циркуляційної води в головний корпус, на конденсатори турбін і допоміжне обладнання здійснюється береговою насосною станцією.

Промливнева каналізація від охолодження технологічного обладнання, дощові і талі води з покрівлі головного корпусу і території проммайданчика, пройшовши нафтовловлювач, скидаються в систему ГЗУ.

5.2 Промислові відходи ТЕЦ

Чернігівська теплова електроцентраль є потужним підприємством, на якому утворюється та накопичується золошлак та побічні відходи різних класів токсичності. Мінеральна частина золошлаків представлена переважно силікатами, алюмінатами, феритами, алюмоферитами, містяться також оксиди кальцію, заліза, магнію, хлориди і сульфати.

Схема золошлаковидалення, що існує на сьогодні, – роздільна, гідравлічна. Складування золи здійснюють по золопроводам на золовідвал. Шлаки шлакопроводами скидаються в шлакову секцію і вивозяться для власних потреб

після зневоднення. Золонакопичувач № 2 ТЕЦ заповнений і законсервований.

Інші види відходів утворюються в менших обсягах:

- відпрацьовані мастила – за складом і фізико-хімічними властивостями це забруднені, пожежонебезпечні відходи;
- масляні фільтри, промаслене ганчір'я – нерозчинні, забруднені, пожежонебезпечні відходи;
- шлам хімічного водоочищення – нерозчинний у воді та негорючий;
- відпрацьовані автомобільні шини – гума, металокард, текстиль, пожежонебезпечні, не є розчинними у воді;
- акумуляторні батареї – містять у своєму складі свинець;
- люмінесцентні лампи – можуть містити ртуть, алюміній, скло; це тверді та непожежонебезпечні відходи;
- ртутні термометри – містять ртуть, скло, тверді відходи, непожежонебезпечні;
- абразивні матеріали та вироби з них можуть містити кремній та його сполуки, це малонебезпечні відходи;
- тара, упаковки – нерозчинні у воді відходи, тверді, горючі;
- тирса та відходи деревини – пожежонебезпечні, тверді відходи;
- лом чорних, кольорових металів – нерозчинні, тверді, непожежонебезпечні відходи;
- ТПВ – тверді, нерозчинні у воді, горючі відходи.

5.3 Джерела викидів забруднювальних речовин в атмосферу

Згідно з Інвентаризацією джерел викидів забруднювальних речовин в атмосферу, на Чернігівській ТЕЦ налічується понад 51 джерело викидів: 41 організоване і 10 неорганізованих.

Під час спалювання вугілля в атмосферне повітря надходять оксиди сірки та азоту, зола, двоокис вуглецю, оксид вуглецю, оксиди важких металів (свинцю, ртуті, нікелю, хрому, міді), миш'як, парникові гази, метан.

Під час спалювання природного газу в атмосферне повітря надходять оксид вуглецю та діоксид азоту, ртуть, парникові гази: двоокис вуглецю та метан.

З метою очищення димових газів застосовують мокрі золоуловлювачі МВ-ВТИ 3100 з вертикальними коагуляторами Вентурі з ефективністю очищення на рівні 96–96,2 %.

З метою очищення димових газів від леткої золи застосовують мокрі золоуловлювачі МВ-ВТИ 3100 з вертикальними коагуляторами Вентурі з тією ж самою ефективністю очищення.

Екологічні проблеми з попередження забруднення атмосферного повітря оксидами сірки та азоту залишається актуальним. В період будівництва ТЕЦ не передбачалося спорудження установок з очищення відхідних газів від оксидів цих сполук.

5.4 Джерела впливу на гідросферу

Як межі зони впливу ТЕЦ на водні об'єкти розглядається межа впливу на атмосферне повітря (з урахуванням фактора перенесення забруднювальних речовин з атмосферними опадами). До того ж у кожному конкретному разі, особливо по великих природних водотоках, зона впливу може бути розширена з урахуванням динаміки техногенних процесів і внеску ТЕЦ до зміни стану водних об'єктів (поверхневих і підземних вод).

Основними джерелами впливу Чернігівської ТЕЦ на водні об'єкти в зоні впливу є:

- обсяг частини стоку з існуючих водойм і водотоків;
- осадження на поверхню водойм і водотоків твердих частинок, аерозолів (зола, важкі метали, радіонукліди), що утворюються під час спалювання палива і виносяться з димовими газами в атмосферу;
- випадання на акваторію водних об'єктів забруднювальних речовин (кислот HNO_3 , H_2SO_4 , HCl) з атмосферними опадами.

5.5 Джерела впливу на літосферу

Основні надходження забруднювальних речовин безпосередньо на поверхню літосфери – це складування твердих відходів енергетичного виробництва (відвал) і твердого палива з попередніми вилученням та реконструкцією великих територій.

Ґрунтовий шар суші і водойми є основним кінцевим акумулятором антропогенних токсичних речовин в атмосфері в результаті осадження їх на поверхню. Значна частина речовин з атмосфери безпосередньо осідає на рослинність.

Прямий вплив діючої ТЕЦ на літосферу характеризується такими показниками: площа території, що вилучається, зокрема під санітарно-захисну зону; характер території, що вилучається; проектна місткість і тип золовідвалу; кількість і вид забруднювальних речовин, що осідають на поверхню.

Ступінь впливу ТЕЦ на літосферу значно залежить від характеру літосфери в зоні впливу – рельєфу місцевості, складу ґрунтів, наявності і характеру рослинності. Ускладнення рельєфу за рахунок природних і рослинних об'єктів підсилює вплив ТЕЦ, локалізує його в обмеженій зоні.

5.6 Обґрунтування необхідності реконструкції Чернігівської ТЕЦ

В Україні перспективи розвитку теплоенергетики пов'язані з використанням вугілля через те, що запаси його в країні досить великі.

Основні завдання та вимоги щодо реконструкції та модернізації об'єктів теплоенергетики є такі:

- заміна морально застарілого та зношеного обладнання на більш ефективне та сучасне;
- підвищення надійності роботи обладнання об'єктів теплоенергетики;
- удосконалення техніко-економічних показників обладнання;

- поліпшення екологічної обстановки району розміщення ТЕЦ шляхом запобігання викидів в атмосферне повітря і скидів стічних вод у водойми;
- збільшення виробництва тепло- та електроенергії, отримання додаткового прибутку.

Під час вибору варіантів для реконструкції теплоенергетичних об'єктів важливо дотримуватися таких умови: намагатися мінімізувати вартість реконструкції при досягненні максимального ефекту; за можливістю розміщувати нове обладнання в межах існуючої земельної ділянки.

Під час спалювання викопного вугілля на об'єктах теплоенергетики дуже важливо застосовувати технології з ефективного виробництва теплової та електричної енергії з мінімальними витратами, але ж суворо жорстким додержанням усіх екологічних стандартів, норм і вимог.

В багатьох енергетичних котлах на сьогодні традиційно реалізується та отримав найбільше поширення у теплоенергетиці факельний спосіб спалювання твердого палива. Однак основним його недоліком є необхідність оснащення теплоенергетичних об'єктів складними і дорого вартісними системами очищення відхідних димових газів від шкідливих компонентів, зокрема, оксидів сірки та азоту.

Як сучасна та «чиста» технологія спалювання низькосортного вугілля набула широкого значення та широко використовується технологія циркулюючого киплячого шару.

Технологія спалювання вугілля у циркулюючому киплячому шарі передбачає спалювання в псевдозрідженому шарі, тобто киплячому шарі, що являє собою сукупність полідисперсних частинок, через які продувається зріджувальне повітря. При цьому швидкість дуття не повинна перевищувати швидкість винесення паливних частинок з топкового пристрою та бути достатньою для зрідження. Завдяки тому, що паливні частинки інтенсивно перемішуються у підвішеному стані за обсягом топки, поліпшується надходження повітря до всіх частинок, таким чином процес горіння добре інтенсифікується.

Горіння твердого палива здійснюється у двома етапи: спочатку безпосередньо в киплячий шар подається паливо та первинне повітря, у ньому утворюється зона газифікації та піролізу палива; потім у надшаровому просторі камери згорання подається вторинне повітря, відбувається допалювання утворених продуктів газифікації та дрібних паливних фракцій.

Киплячий шар у камері згорання формується на рухомий решітці, що зібрана з чавунних колосників. Сам шар формується з паливних частинок, золи та шлаку. Для утворення киплячого шару не потрібні спеціальні інертні матеріали, наприклад, пісок та інші. Робоча висота киплячого шару складає 300–350 мм.

Циркуляція матеріалу у киплячому шару забезпечується багатоступінчастим осадженням, а потім поверненням основної маси винесення золи назад у топковий пристрій. Основна частина легкої золи може вивантажуватися з решітки зі шлаком завдяки застосуванню потужної системи повернення винесених часток та ефекту агломерації золових частинок у циркулюючому киплячому шарі.

Технологія циркулюючого киплячого шару має беззаперечні переваги, порівняно з традиційним факельним способом спалювання:

- зменшення експлуатаційних витрат на ремонт, обслуговування устаткування, на електроенергію тощо;
- зменшення обсягу викидів оксидів азоту NO_x за рахунок низькотемпературного режиму горіння та багатоступінчастого спалювання палива;
- зменшення обсягу викидів діоксиду сірки SO_2 за рахунок подання сорбентів, зокрема, вапняку.

Техніко-економічне обґрунтування реконструкції Чернігівської ТЕЦ передбачає спорудження нового котла з циркулюючим киплячим шаром на існуючій території промайданчика з урахуванням вже наявної інфраструктури. Новий котел з ЦКШ зможе функціонувати 11 місяців на 1 рік

та забезпечувати місто Чернігів гарячою водою цілий рік, у зимовий час – теплом, використовуючи існуючі теплові мережі.

Новий сучасний котел, робота якого базується на екологічній технології спалювання твердого палива, спільно з існуючими дасть змогу стабільно постачати тепло в місто Чернігів одночасно з досягненням основного завдання – це вирішення екологічної проблеми забруднення атмосферного повітря та об'єктів гідросфери у зоні впливу ТЕЦ. Уведення в експлуатацію нового котла значно скоротить обсяг викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря, крім того буде вирішена проблема утилізації золошлакових відходів.

5.7 Екологічне оцінювання стану атмосферного повітря в районі розміщення Чернігівської ТЕЦ

Було виконане екологічне оцінювання стану атмосферного повітря в районі розміщення Чернігівської ТЕЦ, для чого були враховані викиди як самої теплоелектроцентралі, так і підприємств, що аналогічно впливають на цей район. Урахування забруднення атмосфери джерелами підприємств наведене величинами фонових концентрацій ЗР в атмосферному повітрі, за даними спостережень на стаціонарному посту, розміщеному в місті Чернігів, для таких основних забруднювальних речовин: діоксидів азоту та сірки, оксиду вуглецю. Водночас розрахункові величини приземних концентрацій відповідають найбільш несприятливим метеорологічним умовам (небезпечні напрямки та швидкості вітру). Розрахунки виконані відповідно до Методики розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин (ОНД-86) з програмного комплексу «ЕОЛ 2000» v4.0, розробленого ТОВ «Софт Фонд» і погодженого Міністерством охорони навколишнього природного середовища України. Розрахунок розсіювання забруднювальних речовин проводили для літнього періоду, найбільш несприятливого для розсіювання. Результати розрахунку для Чернігівської ТЕЦ до реконструкції наведені на рисунках 5.2, 5.3 та 5.4.

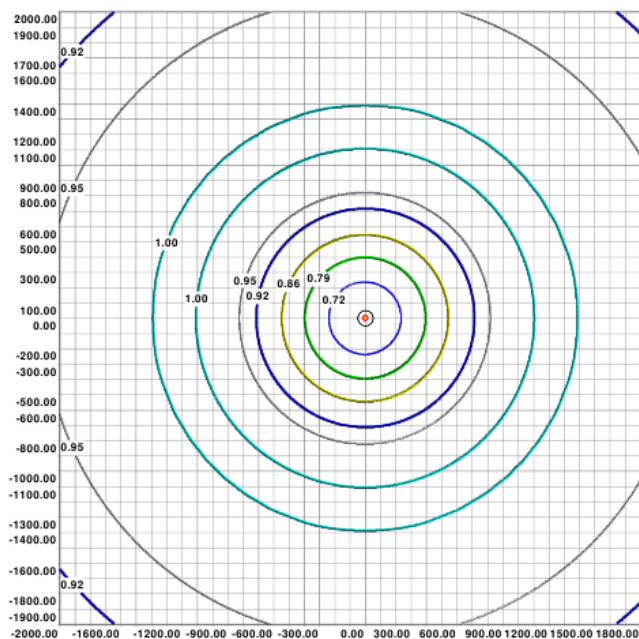


Рисунок 5.2 – Карта розсіювання
діоксиду азоту (у долях ГДК)
від Чернігівської ТЕЦ
до реконструкції

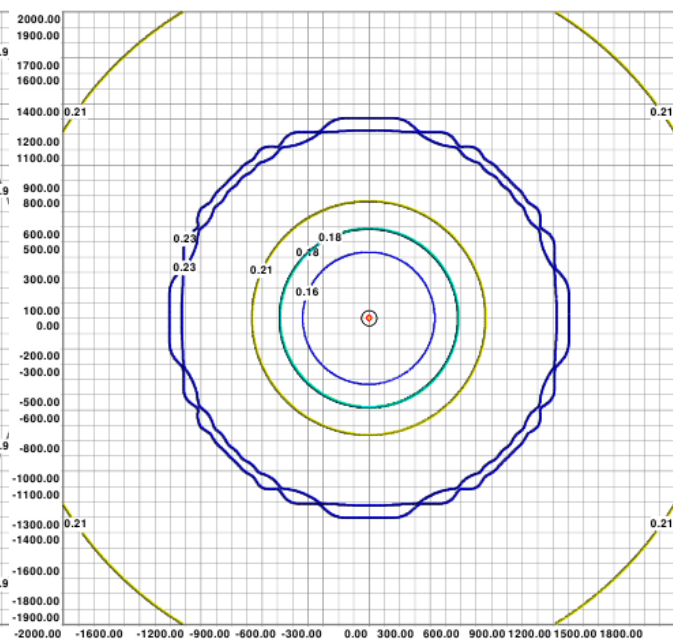


Рисунок 5.3 – Карта розсіювання
сірчистого ангідриду (у долях ГДК)
від Чернігівської ТЕЦ
до реконструкції

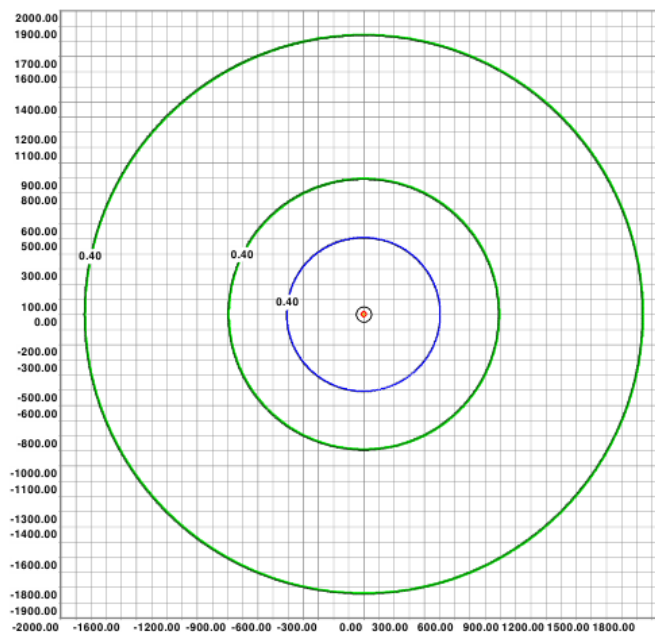


Рисунок 5.4 – Карта розсіювання
оксиду вуглецю (у долях ГДК)
від Чернігівської ТЕЦ
до реконструкції

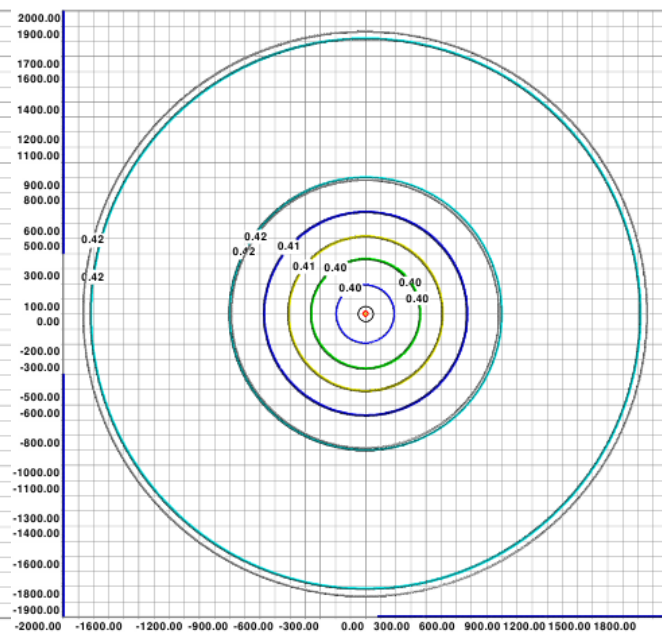


Рисунок 5.5 – Карта розсіювання
оксиду вуглецю (у долях ГДК)
від Чернігівської ТЕЦ
після реконструкції

Результат розрахунку приземної концентрації оксиду вуглецю після впровадження запропонованих технічних рішень наведено на рисунку 5.5. Прогнозована концентрація оксиду вуглецю в зоні впливу Чернігівської ТЕЦ після реконструкції збільшилася, але не перевищує рівень ГДК.

Висновки до розділу 5

Обґрунтована та практично підтверджена можливість використання режимів деструкції палива на об'єктах теплоенергетики для захисту атмосфери, а для захисту гідросфери як матеріал улаштування захисних екранів в місцях складування ЗШВ запропоновано використовувати місцеві глинисті матеріали, завдяки їх високій сорбційній здатності стосовно важких металів.

Експериментальним шляхом були підібрані оптимальні параметри процесу сорбції з модельних розчинів глинистими матеріалами іонів Ni^{2+} . Аналіз ізотерм сорбції іонів нікелю на місцевих глинистих мінералах, із використанням розчинів $NiSO_4 \cdot 7H_2O$, що містили іони нікелю на рівні 0,025–0,4 моль-екв./л, засвідчив, що максимальні показники адсорбції на 1 г адсорбенту не перевищували 10–11 мг іонів Ni^{2+} .

Опис одержаних експериментальних результатів виконували із застосуванням рівняння ізотерми Фрейндліха.

Для вивчення ефективності процесів поглинання іонів нікелю та встановлення ступеня їх входження до структури місцевих глинистих мінералів проведені дослідження з десорбції сорбентів після їх відпрацювання. Результати досліджень дозволяють стверджувати, що Ni^{2+} іони надійно затримуються у структурі місцевих глинистих мінералів. Завдяки здатності глини поглинати та утримувати іони важких металів дозволяю використовувати її для влаштування протифільтраційного екрану.

Проведене обстеження золошлакових сумішей з метою розроблення пропозицій щодо їх використання у будівництві. Для брикетування із

попереднім збагаченням органічним паливним матеріалом запропоновано використовувати золошлакову суміш із високим умістом вугілля, що не згоріло, водночас інші відходи можуть використовуватися як заповнювачі в будівництві

Результати розрахунків приземних концентрації основних шкідливих компонентів газових викидів після впровадження запропонованих технічних рішень підтвердив їх екологічну ефективність зі зменшення викидів оксидів азоту та сірки.

Основні результати дослідження опубліковані в наукових працях: [23, 119].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-практичне питання моделювання впливу теплоенергетичних об'єктів на навколишнє природне середовище та розроблення природоохоронних заходів, що підвищують рівень екологічної безпеки в районах їх розміщення.

1. Розроблена математична модель перенесення та дифузії домішок від точкового джерела викидів техногенного забруднення в приземних шарах атмосфери.

2. Удосконалена математична модель деструкції палива в циркуляційному киплячому шарі енергетичного котла.

3. Розроблений механізм формування техногенних викидів в атмосферу.

4. З метою прогнозування техногенного навантаження було розглянуто та систематизовано фактори, від яких залежить інфільтрація та фільтрація забруднювальних речовин у зоні розміщення ТЕЦ.

5. Удосконалено математичні моделі масоперенесення та профільної фільтрації шляхом урахування водонасичення ґрунту.

6. Розроблені алгоритми чисельного розв'язання задач профільної фільтрації на основі методу скінченних елементів. Це дозволило проводити розрахунки для великого діапазону значень параметрів математичної моделі, водночас враховувати зміну граничних умов з часом, довільну конфігурацію меж поширення забруднювальних речовин та неоднорідність розрахункової області.

7. Адекватність математичної моделі підтверджено шляхом порівняння результатів розв'язування задачі фільтрації, які були одержані в результаті моделювання, з експериментальними даними. Відхилення становить 5 %.

8. Розрахунок концентрації забруднювальних речовин за змінного вологовмісту в умовах інфільтрації засвідчив, що найбільша концентрація забруднювальних речовин у зоні аерації ТЕЦ спостерігається на глибині 25–35 см. Адекватність математичної моделі перенесення забруднювальних

речовин під час інфільтрації перевірено порівнянням результатів математичного моделювання та експериментів за вмістом іонів нікелю (2+). Аналіз даних свідчить про те, що похибка розрахунку становить 5–7 %.

9. Для визначення основних шляхів міграції забруднювальних речовин у об'єкти гідросфери проведені експериментальні дослідження ґрунтів та снігового покриву у районі розміщення ТЕЦ, які працюють на твердому паливі. В сніговому покриві в зоні аерації виявлені перевищення фонових значень концентрацій важких металів. Оцінювання забруднення ґрунтів показало, що в зоні аерації рівень забруднення припустимий, у верхньому горизонті золовідвалу – середній, у нижньому – низький.

10. Дослідження підземних вод на ділянці золошлаконакопичувача засвідчили підвищений вміст у воді спостережуваних свердловин хлоридів, сульфатів, заліза, натрію, тобто має місце вплив фільтрації із золовідвалу.

11. Для попередження міграції забруднювальних речовин із золошлаконакопичувача запропоновано влаштування протифільтраційного екрана з місцевих глинистих матеріалів. Проведені дослідження з десорбції відпрацьованих сорбентів з метою вивчення ефективності поглинання іонів нікелю та встановлення ступеня входження іонів до структури місцевих глинистих мінералів. Результати досліджень засвідчили надійне затримання іонів нікелю в структурі мінералів. Це дозволяє використовувати їх як протифільтраційні екрани.

12. Проведене обстеження золошлакових відходів ТЕЦ з метою розроблення пропозицій щодо їх використання у будівництві. Для брикетування із попереднім збагаченням органічним паливним матеріалом запропоновано використовувати золошлакову суміш із високим вмістом вугілля, що не згоріло, водночас інші відходи можуть використовуватися як заповнювачі в будівництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пляцук Л. Д., Батальцев Є. В. Підвищення екологічної безпеки теплових електростанцій за рахунок технології газифікації вугілля. *Екологічна безпека*. 2012. № 2 (14). С. 90–92.
2. Partitioning behavior of natural radionuclides during combustion of coal in thermal power plants / S. K. Sahu et al. *Environmental Forensics*. 2017. № 18 (1). P. 36–43. DOI: 10.1080/15275922.2016.1230910.
3. Yadav S., Prakash R. Status and Environmental Impact of Emissions from Thermal Power Plants in India. *Environmental Forensics*. 2014. № 15 (3). P. 219–224. DOI: 10.1080/15275922.2014.930937.
4. Enrichment of naturally occurring radionuclides and trace elements in Yatagan and Yenikoy coal-fired thermal power plants, Turkey / B. Ozden et al. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.016>.
5. Study of radon, thoron exhalation and natural radioactivity in coal and fly ash samples of Kota Super Thermal Power Plant, Rajasthan, India / S. Mohan et al. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016. Vol. 171, Issue 2. P. 196–199. DOI: 10.1093/rpd/nw057.
6. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Ленинград : Недра, 1988. 312 с.
7. Serafin E. Methods for the reduction of harmful substances in the process of energy generation. *Autobusy. Bezpieczeństwo i ekologia*. 2016. № 12. P. 409–413.
8. Shahzad Baig K., Yousaf M. Coal Fired Power Plants: Emission Problems and Controlling Techniques. *J. Earth. Sci. Clim.* 2017. Change 8. P. 404. DOI: 10.4172/2157-7617.1000404.
9. Cyclone as a precleaner to ESP – a need for Indian coal based thermal power plants / K. V. George, S. Manjunath, C. V. Chalapati, A. M. Bopche.

Environmental Technology. 2003. № 24 (11). P. 1425–1430.
DOI: 10.1080/09593330309385686.

10. Integrated assessment of the environmental and economic effects of an ultra-clean flue gas treatment process in coal-fired power plant / Lin Cuia et al. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 199. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.174>.

11. SO₃ Emissions and Removal by Ash in Coal-Fired Oxy-Fuel Combustion / R. Spörl et al. *Energy & Fuels*. 2014. № 28 (8). P. 5296–5306. DOI: 10.1021/ef500806p.

12. Jayasinghe K. T. Performance Comparisons on Post Combustion Flue Gas Control Systems in Locally Available Power Plants. *Engineer : Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*. 2018. № 51 (4). P. 47–56. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v51i4.7313>.

13. Джигирей В. С., Сторожук В. М., Яцюк Р. А. Основы екології та охорона навколишнього природного середовища (Екологія та охорона природи). Львів : Афіша, 2000. 272 с.

14. Беспалов В. И., Беспалова С. У., Вагнер М. А. Природоохранные технологии на ТЭС : учебное пособие / Томский политехнический университет. 2-е изд. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 240 с.

15. Федоров С. А. Экология энергетики : учеб. пособие. Дубна : Междунар. ун-т природы, о-ва и человека «Дубна», 2003. 127 с.

16. Budzianowski W. M., Miller R. Towards Improvements in Thermal Efficiency and Reduced Harmful Emissions of Combustion Processes by Using Recirculation of Heat and Mass: A Review. *Recent Patents on Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 2, No. 3. P. 228–239.

17. Петряков М. В., Гейст А. О. Воздействие теплоэнергетики на окружающую среду. *Материалы IV Российской молодежной научной школы-*

конференции : в 2 томах. Томск : Томский политехнический университет, 2016.

18. Батальцев Є. В., Пляцук Л. Д. Проблеми забруднення атмосфери викидами ТЕЦ та газифікація як перспективний напрямок її вирішення. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали Науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 23–26 квітня 2013 р. Суми : СумДУ, 2013. Ч. 2. С. 213.

19. Батальцев Е. В., Пляцук Л. Д. Экологические аспекты газификации угля. *Сучасні технології в промисловому виробництві* : матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 17–20 квітня 2012 р. Суми : СумДУ, 2012. Ч. 2. С. 94.

20. Батальцев Е. В., Пляцук Л. Д. Газификация как метод уменьшения техногенной нагрузки на окружающую природную среду. *Проблемы безопасности и защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций* : сборник научных статей II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Уфа : ФГБОУ ВПО УГАТУ – Главное Управление МЧС России по Республике Башкортостан, 2012. Т. I. С. 182–184.

21. Батальцев Є. В., Рой І. О., Петрушанко А. С. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря при спалюванні біомаси в твердопаливних котлах. *Сучасні технології в промисловому виробництві* : матеріали IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 19–22 квітня 2016 р. Суми : СумДУ, 2016. Ч. 2. С. 69–70.

22. Тупов В. Б. Факторы физического воздействия ТЭС на окружающую среду : монография. Москва, 2012. 284 с.

23. Батальцев Є. В. Напрями зменшення викидів ТЕС у навколишнє середовище. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції

(м. Суми, 17–20 квітня 2018 р.) / редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. Суми : СумДУ, 2018. С. 206.

24. Звягинцева А. В., Сазонова С. А., Кульнева В. В. Моделирование техногенного воздействия ТЭЦ на окружающую среду и разработка инженерно-технических природоохранных мероприятий. *Моделирование систем и процессов*. 2019. Т. 12, вып. 3. С. 27–34.

25. Ревич Б. А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения. *Проблемы прогнозирования*. 2010. № 4. С. 87–99.

26. Няшина Г. С. Исследование способов снижения влияния тепловых электрических станций на окружающую среду при сжигании суспензионных топлив из отходов углеобогащения и биомассы : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.14.14. Томск, 2018.

27. Крылов Д. А. Пути снижения экологического воздействия на окружающую среду угольных ТЭС России. *Горный информационно-аналитический бюллетень* : научно-технический журнал. 2015. № 11. С. 277–285.

28. Исаева Л. К., Спиридонов В. П. Влияние свойств углей на эффективность и безопасность генерации электрической энергии. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. № 11. С. 125–143.

29. Майсюк Е. П., Иванова И. Ю. Анализ существующих методов оценки воздействия энергетических объектов на окружающую среду. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2018. № 4 (12). С. 113–127. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-12.

30. Щигельски Т., Хыцнар Я. Влияние новых технологий сжигания угля на типы и свойства золошлаков. *Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование* : материалы III Международного научно-практического семинара. Москва, 2010. С. 33–37.

31. Пермякова Д. К., Пермякова Н. К. Влияние угольных ТЭС на экологию окружающей среды. *Аллея науки*. 2019. № 1 (28). С. 341–346.
32. Крылов Д. А. Негативное влияние элементов-примесей от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей. *Горный информационно-аналитический бюллетень* : научно-технический журнал. 2017. № 12. С. 77–87.
33. Алияров Б. К., Мергалимова А. К. Технология сжигания углей со сниженным воздействием на окружающую среду. *Угольная теплоэнергетика в Казахстане: проблемы, решения и перспективы развития* : научно-практическая конференция. 2020. С. 8–12.
34. Чистые угольные технологии: теория и практика / Б. Т. Ермагамбет и др. Караганда : TENGRI Ltd, 2013. 276 с.
35. Порівняння різних варіантів очищення димових газів від оксидів сірки для Ладижинської ТЕС / І. І. Безвозюк, О. В. Гурко, О. Ю. Левченко, В. С. Гончарук. *Екологічна безпека та природокористування* : зб. наук. пр. Київ, 2012. Вип. 9. С. 123–129.
36. Коваленко Т. Аналіз та оцінка впливу шкідливих викидів ТЕС України на навколишнє середовище. *Енергетика та системи керування* : матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2013, 21–23 листопада 2013 року, Україна, Львів / Національний університет «Львівська політехніка». Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. С. 36–39.
37. Дударчук Д. Спосіб зменшення викидів шкідливих речовин тепловими електричними станціями. *Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки* : збірник матеріалів Сімнадцятої всеукраїнської науково-методичної конференції (за участі студентів), м. Київ, 15–16 листопада 2017 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 261 с.
38. СОУ-Н МПЕ 40.1.02.307: 2005. Установки спалювання на теплових електростанціях та в котельнях. Організація контролю за викидами в атмосферу. Київ : НД, 2005. 32 с.

39. Контроль та прогнозування забруднення атмосфери оксидами азоту / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський, А. В. Ковтонюк. *Екологія/Ecology-2013* : IV Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (25–27 вересня 2013) : збірник наукових статей. Вінниця : Видавництво-друкарня «Діло», 2013. С. 508–509.

40. Очистка дымовых газов ТЭС от оксидов серы и азота / Д. В. Сталинский и др. *Казантин ЭКО-2009. Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов* : сб. науч. статей по материалам XVII Междунар. науч.-практ. конф. Харьков : Рейдер, 2009. Т. 2. С. 73–76.

41. Жуковський Т. Ф., Проценко, О. Л. Дослідження викидів оксидів азоту в атмосферне повітря від котлоагрегатів ЗАТ «Теплоенергоцентраль-3». *Коммунальное хозяйство городов*. 2010. № 93. С. 290–294.

42. Кулик М. П. Аналіз екологічної небезпеки об'єктів теплової енергетики та методів зменшення шкідливих викидів. *Вісник Інженерної академії України*. 2014. Вип. 2. С. 253–258.

43. Снижение вредных выбросов в атмосферу оксидов азота котлами ТЭС / М. А. Таймаров и др. *Изв. Казан. ГАСУ*. 2017. № 1 (39). С. 180–187.

44. Nitrogen oxides emissions from thermal power plants in China: Current status and future predictions / Hezhong Tian et al. *Environmental science & technology*. 2013. Vol. 47, № 19. P. 11350–11357. URL: <https://doi.org/10.1021/es402202d>.

45. Normann F., Andersson K., Johnsson F. High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxy-fuel combustion. *Fuel*. 2008, December. Vol. 87, Issues 17–18. P. 3579–3585. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.06.013>.

46. Besenic T., Vujanovic M., Duic N. Numerical modelling of emissions of nitrogen oxides in solid fuel combustion. *Journal of Environmental Management*.

2018. 1 June, Vol. 215. P. 177–184. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.014>.

47. Liu X., Tan H., Wang Y. Low NO_x combustion and SCR flow field optimization in a low volatile coal fired boiler. *Journal of Environmental Management*. 2018. 15 August. Vol. 220. P. 30–35. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.009>.

48. Кобзар С. Г., Халатов А. А. Дослідження ефективності зниження оксидів азоту при застосуванні вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля з використанням вугілля в якості палива допалення. *Промышленная теплотехника*. 2017. Т. 39, № 5. С. 91–96.

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

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

51. Азарський К. І. Локалізація екологічної загрози забруднення атмосфери від пилу спалювання вугілля на ТЕС : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01 – екологічна безпека / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2008. 20 с.

52. Вольчин І. А., Гапонич Л. С. Викиди діоксиду вуглецю на українських вугільних теплових електростанціях. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2018. № 6. С. 131–142.

53. Мельник С. О., Гуглич С. І. Аналіз стану викидів ТЕС при роботі на різних видах палива. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : збірник матеріалів 5-го Міжнародного конгресу, 2018. С. 72–72.

54. Кошлак Г. В., Павленко А. М. Зменшення техногенного впливу вугільних ТЕС на довкілля (на прикладі Бурштинської ТЕС). *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2017. № 2 (16). С. 108–118.

55. Роїк В. В., Параняк Р. П. Вплив теплових електростанцій на стан водних екосистем. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького*. 2011. Т. 13, № 2 (48). С. 267–272.

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

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

58. Comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on grey relational analysis and analytic hierarchy process / G. Xu et al. *Energy Policy*. 2011. № 39. P. 2343–2351. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.04.132.

59. Xiaoyu L. Best available techniques and pollution control: a case study on China's thermal power industry. *Journal of Cleaner Production*. 2012. № 23. P. 113–121. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.09.027.

60. Власюк В. С., Прейгер Д. К. Вугілля як стратегічна енергетична перспектива України. *Стратегічні пріоритети*. 2008. № 4 (9). С. 85–95.

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

62. Тайлашева Т. С., Красильникова Л. Г., Воронцова Е. С. Оценка вредных выбросов в атмосферу от котельных Томской области. *Известия Томского политехнического университета*. 2013. Т. 322, № 4. С. 52–55.

63. Черенцова А. А. Оценка влияния золоотвала Хабаровской ТЭЦ-3 на компоненты окружающей среды. *Ученые заметки ТОГУ* : электронное научное издание. 2012. Т. 3, № 1. С. 29–42.

64. Пугач Л. И. Энергетика и экология : учебник. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. 504 с. (Серия «Учебники НГТУ»).

65. Гелетуха Г. Г., Железная Т. А. Анализ основных положений «Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года». *Промышленная теплотехника*. 2006. № 5. С. 82–92.
66. Бурый уголь – добыча и применение в современных условиях / А. Н. Лысенко, Л. А. Кесова, В. В. Литовкин, Н. Г. Николенко. *Энергетика: економіка, технології, екологія*. 2002. № 3. С. 21–24.
67. Братичак М. М., Гайванович В. І., Пишев О. А. Обзор технологий направленных на уменьшения выбросов диоксидов серы при сжигании сернистого та високосернистого вугілля на ТЭС. *Углекислотный журнал*. 2001. № 3–4. С. 53–57.
68. Гастайгер Г., Стамателопулос Г. Н. Угольные электростанции – современный уровень техники и перспективы на будущее. *Черн. металлы*. 2002. № 10. С. 26–35.
69. Корчевой Ю. П., Майстренко А. Ю., Яцкевич С. В. Технология сжигания угля в циркулирующем кипящем слое. Киев, 1994. 64 с. (Препр. / НАН Украины. Отделение высокотемператур. преобразования энергии Ин-та проблем энергосбережения ; Минэнерго Украины).
70. Бурцаев В. И., Демидов И. В., Гольдман Р. Б. Влияние ТЭС на окружающую среду. *Студенческие научные работы землеустроительного факультета* : сб. ст. по материалам Междунар. студ. науч.-практ. конф. / отв. за вып. И. В. Соколова. Краснодар : КубГАУ, 2020. С. 162–167.
71. Сидорова Г. П., Крылов Д. А., Якимов А. А. Экологическое воздействие угольных ТЭС на окружающую среду. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2015. № 9 (124). С. 28–38.
72. Ядутов В. В., Петров Т. И., Зацаринная Ю. Н. Воздействие ТЭС на окружающую среду. *Вестник технологического университета*. 2013. Т. 16, вып. 19. С. 78–79.
73. Носков А. С., Савинкина М. А., Анищенко Л. Я. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба. Новосибирск : Изд-во ГПНТБ, 2005. С. 8–22.

74. Крылов Д. А., Сидорова Г. П. Радионуклиды в углях и золе угольных ТЭС. *Теплоэнергетика*. 2013. № 4. С. 11–15.

75. Кононенко Л. В. Естественные радионуклиды в почвах зоны влияния Трипольской ТЭС. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. 2011. № 3. С. 129–141.

76. Пивоваров Ю. П. Радиационная экология : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Москва : Издательский центр «Академия». 2004. 240 с.

77. Крылов Д. А. Тяжелые металлы в летучей золе ТЭС. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2010. № 4. С. 44–50.

78. Мауричева Т. С., Киселев Г. П. Основные положения количественной оценки радиоактивного воздействия угольных ТЭС на окружающую среду. *Вестник Поморского университета. Сер. «Естественные и точные науки»*. 2006. № 1. С. 110–114.

78. Крылов Д. А. Радиационная опасность для населения и производственного персонала от угольных ТЭС. *Теплоэнергетика*. 2009. № 7. С. 30–32.

79. Pandit G. G., Sahu S. K., Puranik V. D. Natural radionuclides from coal fired thermal power plants – estimation of atmospheric release and inhalation risk. *Radioprotection*. Vol. 46, No. 6: ICRER 2011 – International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity: *Environment & Nuclear Renaissance* (Hamilton, Canada, 19–24 June, 2011) / J. Barescut, D. Lariviere and T. Stocki (eds.). 2011. P. S173–S179. URL: <https://doi.org/10.1051/radiopro/20116982s>.

80. Энергетика: історія, сучасність і майбутнє : в 5 кн. / С. Г. Плачкова та ін. Кн. 3: Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики. 2013. 399 с.

81. Ерофеев В. Л., Семенов П. Д., Пряхин А. С. Теплотехника : учебник для вузов. Москва : Академкнига, 2006. 488 с.

82. Резников М. И., Липов Ю. М. Паровые котлы тепловых электростанций : учебник для вузов. Москва : Энергоиздат, 1981. 240 с.

83. Варламов Г. В., Любчик Г. М., Маляренко В. А. Теплоэнергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. Київ : Політехніка, 2003. 228 с.
84. Петров В. С., Гончаренко В. Г., Погарова Л. С. Проблемы и перспективы развития тепловой энергетики Украины. *Энергетика и электрификация*. 2001. С. 42–44.
85. Корчевой Ю. П., Майстренко А. Ю., Вольчин И. А. Пути модернизации и реконструкции пылеугольных котлоагрегатов тепловых электростанций. *Новини енергетики*. 2000. № 4. С. 38–40.
86. Котлобудування – необхідний елемент розвитку енергетики / Ю. П. Корчевой, О. Ю. Майстренко, Н. І. Дунаєвська, А. А. Потапов. *Энергетика и электрификация*. 2004. № 12. С. 7–9.
87. Липов Ю. М., Третьяков Ю. М. Котельные установки и парогенераторы. Москва ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 592 с.
88. Майстренко А. Ю., Дудник А. Н., Топал А. И. Сравнительный анализ технико-экономических показателей работы ТЭС, использующих чистые угольные технологии. *Энергетика и электрификация*. 1997. № 6. С. 1–3.
89. Тумановский А. Г., Котлер В. Р. О разработке угольного энергоблока с температурой перегрева 700 °С. *Энергохозяйство за рубежом*. 2007, № 3. С. 40–45.
90. Чернявский Н. В. Топливные потери при поставках на ТЭС необогащенного и обогащенного угля. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2000. № 5. С. 3–7.
91. Обеспечение экологических требований при производстве тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях / А. Г. Тумановский и др. *Теплоэнергетика*. 2006. № 7. С. 35–42.
92. Гольдштейн А. Д., Позгалев Г. И., Доброхотов В. И. Состояние развития ПГУ на твердом топливе. *Теплоэнергетика*. 2003. № 2. С. 16–23.

93. Шеберстов А. Н. Состояние тепловых электростанций Украины, перспективы их обновления и модернизации. *Энергетика и электрификация*. 2004. № 12. С. 1–6.
94. Майстренко А. Ю., Чернявский Н. В. Вопросы повышения эффективности использования твердого топлива на ТЭС. *Энергетика и электрификация*. 2004. С. 17–27.
95. Використання технологій циркулюючого киплячого шару для спалювання відходів вуглезбагачення / Ю. П. Корчевой та ін. *Энергетика и электрификация*. 2002. № 1. С. 8–11.
96. Тауд Р. Перспективы развития тепловых электростанций на органическом топливе. *Теплоэнергетика*. 2000. № 2. С. 68–72.
97. Энергетические установки и окружающая среда / В. А. Маляренко и др. ; под ред. В. А. Маляренко. Харьков : ХГФГХ, 2002. 397 с.
98. Partitioning of trace elements, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn and Pb, in a 2.5 MWth pilot-scale circulating fluidised bed combustor burning an anthracite and a bituminous coal / D. Lunbo et al. *Fuel Processing Technology*. 2016. 1 June. Vol. 146. P. 1–8.
99. Thermal analysis of the products of alkali activation of fly ash from CFB boilers / A. Grela et al. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016. Vol. 124. P. 1609–1621. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5257-5>.
100. Relationship between CO, NO, and Hg in a 6 kWth Circulating Fluidized Bed Combustor under an O₂/CO₂ Atmosphere / Hui Wang et al. *Energy Fuels*. 2016. Vol. 30 (5). P. 4221–4228. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00119>.
101. Dubinin A. M., Mavrin S. P. Optimum parameters of the air gasification of coals in a circulating fluidized-bed gas generator with a stagnant layer. *Solid Fuel Chem.* 2016. № 50. P. 177–183. URL: <https://doi.org/10.3103/S0361521916030046>.

102. Co-combustion of coal and oil shale blends in circulating fluidized bed boilers / A. Konist et al. 2019. *Oil Shale*. 2019. Vol. 36, No. 2S. P. 114–127. DOI: 10.3176/oil.2019.2S.03.

103. Experimental study on NO_x emissions of pulverized bituminous coal combustion preheated by a circulating fluidized bed / Z. Shujun, L. Qinggang, Z. Jianguo, L. Chen. *Journal of the Energy Institute*. 2019. Vol. 92, Issue 2. P. 247–256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.011>.

104. Kijo-Kleczkowska A. Analysis of coal suspensions evolution during combustion process. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2019. Vol. 30, No. 5. P. 2551–2561. URL: <https://doi.org/10.1108/HFF-03-2019-0200>.

105. Fundamental study on fuel-staged oxy-fuel fluidized bed combustion / D. Lunbo, L. Lin, L. Daoyin, Z. Changsui. *Combustion and Flame*. 2019. Vol. 206. P. 227–238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.05.008>.

106. Simulation on coal-fired supercritical CO₂ circulating fluidized bed boiler: Coupled combustion with heat transfer / C. Ying, Z. Wenqi, X. Jun, L. Guoyao. *Advanced Powder Technology*. 2019. Vol. 30, Issue 12. P. 3028–3039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.09.010>.

107. Wichliński M., Wielgosz G., Kobyłecki R. The effect of circulating fluidized bed boiler load on the emission of mercury. *Journal of the Energy Institute*. 2019. Vol. 92, Issue 6. P. 1800–1806. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.12.002>.

108. Influence of feeding position and post-combustion air arrangement on NO_x emission from circulating fluidized bed combustion with post-combustion / Yuan Xiao et al. *Fuel*. 2020. Vol. 269. P. 117394. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117394>.

109. Gaseous emissions during oxy-fuel combustion of sewage sludge in a circulating fluidized bed / M. Kosowska-Golachowska et al. *Powder Technology*.

2020. Vol. 371. P. 209–216. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.099>.

110. Experimental Study on Combustion Characteristics of Pulverized Coal Based on Partial Gasification of Circulating Fluidized Bed / Yi Zhang, J. Zhu, Q. Lyu, F. Pan. *Energy Fuels*. 2020. № 34 (1). P. 989–995. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03733>.

111. Стерман Л. С., Лавыгин В. М., Тишин С. Г. Тепловые и атомные электростанции : учебник для вузов. 2-е изд. Москва : Изд-во МЭИ, 2004. 424 с.

112. Мисак Й., Янко П., Близнюк В. Проблеми спалювання низькосортного палива в котельних установках. *Коммунальное хозяйство городов*. Киев : Техніка, 2003. Вып. 49. Сер.: Техн. науки и архитектура. С. 47–51.

113. Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах / А. А. Мадоян и др. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 200 с.

114. Парогазовые установки с внутрицикловой газификацией топлива и экологические проблемы энергетики / В. М. Масленников и др. Москва : Наука, 1983. 264 с.

115. Екологічний паспорт Чернігівської області 2019 року. Департамент екології та природних ресурсів Чернігівської обласної державної адміністрації. Чернігів, 2019. 256 с.

116. 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.

117. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Чернігівській області за 2019 рік / Департамент екології та природних ресурсів Чернігівської обласної державної адміністрації. URL: <https://eco.cg.gov.ua/index.php?id=15801&tp=1&pg>.

118. Программный пакет Crystallographica Search–Match. Oxford Cryosystems. Software for research, teaching and powder pattern analysis. URL: <http://www.oxcryo.com/-software/crystallographica/>.

119. Environmental efficiency of managing the combustion process in boilers with circulating fluidized bed / Y. Bataltsev et al. *Technogenic and ecological safety*. 2019. № 5 (1). P. 55–61. DOI: 10.5281/zenodo.2602559.

120. Eskin N., Hepbasli A. Development and Applications of Clean Coal Fluidized Bed Technology. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2006. Vol. 28 (12). P. 1085–1097. DOI: 10.1080/10407780600622778.

121. Cetin B., Abacioglu M. Economic Analysis for Rebuilding of an Aged Pulverized Coal-Fired Boiler with a New Boiler in an Aged Thermal Power Plant. *Advances in Mechanical Engineering*. 2013. URL: <https://doi.org/10.1155/2013/270159>.

122. Aliyarov B., Mergalimova A., Zhalmagambetova U. Application of Coal Thermal Treatment Technology for Oil-Free Firing of Boilers. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2018. № 55. P. 45–55. DOI: 10.2478/lpts-2018-0012.

123. Eskin N., Hepbasli A. Development and Applications of Clean Coal Fluidized Bed Technology. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2006. № 28 (12). P. 1085–1097. DOI: 10.1080/10407780600622778.

124. Nabeel A., Khan T. A., Sharma D. K. Studies on the Production of Ultra-clean Coal by Alkali-acid Leaching of Low-grade Coals. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2009. № 31 (7). P. 594–601. DOI: 10.1080/15567030701743684.

125. Sulfur and Nitrogen Dioxide Exposure and the Incidence of Health Endpoints in Ahvaz, Iran / S. Geravandi et al. *Health Scope*. 2015. № 4. DOI: 10.17795/jhealthscope-24318.

126. Naman S., Shubham B., Siddharth J. Review of emissions control and NO_x reduction techniques in coal fired thermal steam generators. *ResearchGate*. 2016, August. Vol. 1.

127. Serafin E. Methods for the reduction of harmful substances in the process of energy generation. *Autobusy. Bezpieczeństwo i ekologia*. 2016. № 12. P. 409–413.
128. Бе́лявский Г. А., Варламов Г. Б. Оценка воздействия объектов энергетики на окружающую среду. Харьков : ХГАГХ, 2002. 359 с.
129. Assessing the impact of Sumy CHP on soil / L. Pliatsuk, L. Hurets, H. Miakaieva, O. Miakaiev. *Environmental Problems*. Lviv : Lviv Politechnic Publishing House, 2017. Vol. 2, No. 2. P. 59–64.
130. Shahzad Baig K., Yousaf M. Coal Fired Power Plants: Emission Problems and Controlling Techniques. *J. Earth. Sci. Clim.* 2017. Change 8. P. 404. DOI: 10.4172/2157-7617.1000404.
131. Статистичний збірник «Довкілля України 2017». Київ, 2018. С. 29–30.
132. İpek O., Gürel B., Kan M. Numerical Investigation on Hydrodynamic Combustion and NO_x Emission Behavior in 8 MW Circulating Fluidized Bed. *Acta Physica Polonica A*. 2017. Vol. 132 (3). P. 553–557. DOI: 10.12693/APhysPolA.132.553.
133. Atomized Air of Oxygen-Enriched Combustion for a 450 000 kcal/h Industrial Furnace / Y. Chang, K. Wu, Y. Chen, C. Chen. *Energy Fuels*. 2015. № 29. P. 3476. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00233>.
134. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants / S. Belosevic et al. *Appl. Therm. Eng.* 2015. № 74. P. 102 URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.019>.
135. De Soete G. G. Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen. *Proc. Combust. Inst.* 1975. № 15. P. 1093. URL: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(75\)80374-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(75)80374-2).
136. Raithby G. D., Chui E. H. A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media. *J. Heat Transfer*.

1990. № 112. P. 415. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2910394>.

137. Co-firing of pine chips with Turkish lignites in 750 kWth circulating fluidized bed combustion system / A. E. Atumtay et al. *Biores. Techn.* 2011. № 224 (C). P. 601. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.065>.

138. Varol M., Atimtay A. T., Olgun H. Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high-sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 2. Effect of secondary air and its location. *ResearchGate*. 2014. *Fuel* 130. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.002>.

139. Nihalani S. A., Mishra Y., Juremalani J. Emission Control Technologies for Thermal Power Plants. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 330, Issue 1. P. 012122.

140. Алоян А. Е. Динамика и кинематика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере : курс лекций. Москва : ИВМ РАН, 2002. 201 с.

141. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.

142. Schwarz K. G. Mesa-scale flows over large city. *Progress in fluid flow research: turbulence and applied MHD* / eds.: H. Branover, Y. Unger. Progress in Astronautic and Aeronautic. 1998. Vol. 182. P. 271–279.

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

144. Бирюков Н. С., Казарновский В. Д., Мотылев Ю. Л. Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов. Москва : Недра, 1975. 176 с.

145. Kinzelbach W. Groudwater modelling. An introduction with sample programs in basic. *Developments in water science*. Amsterdam, 1986. P. 333.

146. 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.

147. Sarofim A. F., Beer J. M. Modeling of fluidized bed combustion. *17th Symposium (International) on Combustion*. 1979. P. 189–204.

148. Johnsson J. E. A kinetic model for NO_x formation in fluidized bed combustion. *Proceedings of 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion* / A. Manaker (ed.). New York : ASME, 1989. P. 1112.

149. Hirama T., Takeuchi H., Horio M. Nitric oxide emission form circulating fluidized bed coal combustion. *Proceedings of 9th International Conference on Fluidized Bed Combustion* / J. Mustonen (ed.). New York : ASME, 1987. Vol. 1. P. 898–903.

150. Leckner B., Amand L. E. Emission from a circulating and a stationery fluidized bed boiler a comparison. *Proceedings of 9th International Conference on Fluidized Bed Combustion* / J. Mustonen (ed.). New York : ASME, 1987. P 891–897).

151. Amand L. E., Andersson S. Emissions of nitrous oxide from fluidized bed boilers. *Proceedings of 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion* / A. Manaker (ed.). New York : ASME, 1989. P. 49–56.

152. De Soete G. G. Heterogeneous NO and N₂O formation from bound nitrogen during char combustion. A paper presented at the joint meeting of the British and French Section of Combustion Institute. Rouen, 1989, April. P. 18–21.

153. Brown R. A., Muzio L. N₂O emissions from fluidized bed combustion. *Proceedings of 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion*. New York : ASME, 1991. Vol. 2. P. 719–724.

154. NO_x emission and reduction from circulating fluidized bed combustor / H. Moritomi, Y. Suzuki, N. Kido, Y. Ogisu. *Circulating fluidized bed technology*

III / P. Basu, M. Hasatani, M. Horio (eds.). Oxford : Pergamon Press. (1990). P. 339–404.

155. Oka S., Anthony E J. Fluidized bed combustion. *Harmful matter emission from FBC boilers*. New York : CRC Press, Marcel Dekker, Inc., 2004. Chap. 7, Vol. 162. P. 505–580.

156. Freihaut J. D., Seery D. J. Evolution of fuel nitrogen during the vacuum thermal devolatilization of coal. Presented at American Chemical Society Division of Fuel Chemistry. New York, 1981. August 23–28.

157. SO₃ in coal-fired fluidized bed combustors / N. A. Burdett, B. J. Gliddon, R. S. Hotchkiss, R. T. Squires. *Journal of the Institute of Energy*. 1983. Vol. 56. P. 119–124.

158. Burdett N. A., Longdon W. E., Squires R. T. Rate coefficients for the reaction $\text{SO}_2 + \text{O}_2 = \text{SO}_3 + \text{O}$ in the temperature range 900–1350 K. *Journal of the Institute of Energy*. 1984. Vol. 57. P. 373–376.

159. Yates J. G. Fundamentals of fluidized bed chemical processes, Butterworths. Elsevier Ltd., 1983. P. 188, 183, 185.

160. Ghardashkhani S., Ljungstrom E., Lindquist O. Release of sulfur dioxide from calcium sulfate under reducing atmosphere. *Proceedings of 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion* / A. Manaker (ed.). New York : ASME, 1989. P. 611–615.

161. Basu P. Circulating Fluidized Bed Boilers. Design, Operation and Maintenance. Springer International Publishing, Switzerland, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-06173-3.

162. ДСТУ ISO 14001:2006. Системи екологічного керування. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 23 с.

163. ДСТУ ISO 14004:2006. Системи екологічного управління. Загальні настанови щодо принципів, систем та засобів забезпечення. Київ :

Держспоживстандарт України, 2006. 44 с.

164. 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*. 2017. Vol. 4, Issue 2. P. G12–G16.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Пляцук Л. Д., Батальцев Є. В. Підвищення екологічної безпеки теплових електростанцій за рахунок технології газифікації вугілля. *Екологічна безпека*. 2012. № 2 (14). С. 90–92.

Здобувач проаналізував напрями впливу теплових електростанцій на навколишнє середовище та перспективні методи зменшення їх негативного впливу.

2. Bataltsev Y., Plyatsuk L., Ablieieva I., Hurets L., Miakaiev O. Environmental efficiency of managing the combustion process in boilers with circulating fluidized bed. *Technogenic and ecological safety*, № 5 (1). 2019, P. 55–61. DOI: 10.5281/zenodo.2602559.

Здобувач проаналізував стан та перспективи спалювання вугільного пального в циркулюючому киплячому шарі на теплових електростанціях, акцентуючи на оцінюванні екологічної ефективності процесу з використанням методу комп'ютерного моделювання турбулентного процесу горіння в циркулюючому киплячому шарі.

3. Plyatsuk L. D., Chernysh Y. Y., Ablieieva I. Y., Yakhnenko O. M., Bataltsev Y. V., Balintova M., Hurets L. L. Remediation of soil contaminated with heavy metals. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. Vol. 6, Issue 1. P. H1–H8. DOI: 10.21272/jes.2019.6(1).h1.

Здобувач об'єднав теоретичні та експериментальні принципи в синергетичному аналізі взаємозв'язків у системі «об'єкт – предмет дослідження» під час вивчення динаміки зміни форм знаходження важких металів у ґрунті.

4. Chernysh Y., Plyatsuk L., Ablieieva I., Yakhnenko E., Roubik H., Miakaieva H., Bataltsev Y., Danilov D. Ecologically safe directions of the low rank coal bioconversion. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. Vol. 6, Issue 2. P. H1–H10. DOI: 10.21272/jes.2019.6(2).h1.

Здобувач виконав теоретичне дослідження біохімічних особливостей оброблення вугілля низької якості з урахуванням біохімічних основ розкладання органічних компонентів низькосортного вугілля.

5. Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablieieva I., Bataltsev Y., Vaskin R., Roy I., Yakhnenko E., Roubík H. Modelling and development of technological processes for low-rank coal bio-utilization. *Fuel*. 2020. Vol. 267. P. 117298. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117298.

Здобувач розробив методологічний підхід і сформував принципову схему досліджень процесу перероблення низькоякісного вугілля з метою розвитку екологічно безпечного напрямку виробництва енергії та корисних біопродуктів.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Батальцев Є. В., Пляцук Л. Д. Проблеми забруднення атмосфери викидами ТЕЦ та газифікація як перспективний напрямок її вирішення. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (Суми, 23–26 квітня 2013 р.). Суми : СумДУ, 2013. С. 213.

7. Батальцев Е. В., Пляцук Л. Д. Экологические аспекты газификации угля. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : II Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 17–20 квітня 2012 р.). Суми : СумДУ, 2012. С. 94.

8. Батальцев Е. В., Пляцук Л. Д. Газификация как метод уменьшения техногенной нагрузки на окружающую природную среду. *Проблемы безопасности и защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций* : II Всероссийская научно-практическая конференция с

международным участием. Уфа : ФГБОУ ВПО УГАТУ – Главное Управление МЧС России по Республике Башкортостан, 2012. С. 182–184.

9. Батальцев Є. В., Пляцук Л. Д. Визначення параметрів, що впливають на процес газифікації вугілля. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування* : I Міжнародна науково-практична конференція (Івано-Франківськ, 20–22 вересня 2012 р.). Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. С. 15–16.

10. Пляцук Л. Д., Батальцев Є. В. Огляд методів внутрішньоциклової газифікації вугілля з погляду на їх екологічну ефективність. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства* : I Міжнародна науково-практична конференція (Львів, 29–30 листопада 2012 р.). Львів : ЛДУ БЖД, 2012. С. 239–242.

11. Батальцев Є. В. Визначальні фактори процесу газифікації як перспективного методу зменшення забруднення атмосфери викидами ТЕЦ. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 22–25 квітня 2014 р.). Суми : СумДУ, 2014. С. 32.

12. Батальцев Є. В., Рой І. О., Петрушанко А. С. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря при спалюванні біомаси в твердопаливних котлах. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : IV Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 19–22 квітня 2016 р.). Суми : СумДУ, 2016. С. 69–70.

13. Батальцев Є. В. Напрями зменшення викидів ТЕС у навколишнє середовище. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : V Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція (Суми, 17–20 квітня 2018 р.). Суми : СумДУ, 2018. С. 206.

14. Батальцев Є. В. Управління процесом горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром з позиції екологічної ефективності. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : VI Всеукраїнська міжвузівська

науково-технічна конференція (Суми, 16–19 квітня 2019 р.). Суми : СумДУ, 2019. С. 223.

15. Данилов Д. В., Пляцук Л. Д., Батальцев Є. В. Екологічно безпечне управління процесом горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром теплових електростанцій. *Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі* : I Міжнародна науково-практична інтернет-конференція (Дніпро, 6–7 лютого 2020 р.). Дніпро, 2020. С. 358–362.

16. Батальцев Є. В. Підвищення екологічної безпеки теплових електростанцій шляхом управління процесом горіння. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : VII Всеукраїнська науково-технічна конференція (Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : СумДУ, 2020. С. 243.

17. Потапова Є. О., Черниш Є. Ю., Батальцев Є. В., Пляцук Л. Д. Огляд перспектив застосування та вилучення CO₂. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)* : IX Міжнародна науково-технічна конференція (Київ 19–22 травня 2020 р.). Київ : НУБіП України, 2020. С. 146–148.

ДОДАТОК Б

Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Генеральний директор ТОВ ФІРМА «ТЕХНОВА»
 _____ О.Ю. Щербина
 „ 20 25 _____ 2020 р.



АКТ

впровадження результатів науково-теоретичних досліджень

Робота виконана в Сумському державному університеті.

Науково-теоретичні дослідження виконані в рамках теми: «Моделювання техногенного впливу на навколишнє природне середовище об'єктами теплоенергетики», що була скоординована держзамовленням 0116U006606 «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики».

Напрямок дослідження – зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище методом управління температурним режимом котельного обладнання.

Результати науково-теоретичних досліджень, що передані:

- 1) математичне та комп'ютерне моделювання температурного поля у котлі із циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ);
- 2) методика розрахунку та управління температурним полем в зоні горіння в ЦКШ;
- 3) методика розрахунку камери (зони) горіння в ЦКШ із урахуванням різних видів палива;
- 4) методика розрахунку газових та пилових викидів, зони їх розсіювання;
- 5) науково-технічне рішення повної утилізації відхідних газів (SO_x , NO_x , CO_2) з подальшим впровадженням в проект реконструкції Чернігівської ТЕЦ.


Від КЕП «Чернігівська ТЕЦ» ТОВ фірми «ТехНова»

Генеральний директор

О.Ю. Щербина

Головний інженер

Ю.Г. Алефіренко



Продовження додатку Б

Від Сумського державного університету

Завідувач кафедри екології
та природозахисних технологій,
д.т.н., професор



Л.Д. Пляцук

Виконавець:
Завідувач навчальної
лабораторії кафедри екології
та природозахисних технологій



С.В. Батальцев

Продовження додатку Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з наукових питань
СП «Технополіс»
О. С. Шевченко
05 2020 р.



АКТ

впровадження результатів науково-теоретичних досліджень

Робота виконана в Сумському державному університеті.

Науково-теоретичні дослідження виконані в рамках теми: «Моделювання техногенного впливу на навколишнє природне середовище об'єктами теплоенергетики», що була скоординована держзамовленням 0116U006606 «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики».

Напрямок дослідження – зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище методом управління температурним режимом котельного обладнання.

СП «Технополіс» передані результати науково-теоретичних досліджень, а саме – науково-технічне рішення повної утилізації відхідних газів (SO_x , NO_x , CO_2) з подальшим впровадженням в проект реконструкції енергоблоку малої потужності.

Від СП «Технополіс»

Головний інженер проекту



В. І. Овсяник

Від Сумського державного університету

Науковий керівник, д.т.н., професор

Відповідальний виконавець

Л. Д. Пляцук

Є. В. Батальцев

ДОДАТОК В

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Сумського державного
університету

В. Д. Карпуша

11 2020 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Батальцева Євгена Володимировича
 на тему «Моделювання техногенного впливу на навколишнє природне
 середовище об'єктами теплоенергетики»
 у навчальний процес

Акт складено комісією у складі:

Голова: Декан факультету технічних систем та енергоефективних технологій, кандидат технічних наук, професор Гусак О. Г.

Члени комісії: 1. Завідувач кафедри екології та природозахисних технологій, доктор технічних наук, професор Пляцук Л. Д.
 2. Заступник декану факультету технічних систем та енергоефективних технологій з методичної роботи, кандидат технічних наук, доцент Савченко Є. М.

Комісія провела роботу щодо визначення фактичного впровадження результатів дисертаційного дослідження Батальцева Євгена Володимировича «Моделювання техногенного впливу на навколишнє природне середовище об'єктами теплоенергетики» у навчальний процес факультету технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету.

За результатами розгляду дисертаційної роботи Батальцева Євгена Володимировича на тему «Моделювання техногенного впливу на навколишнє природне середовище об'єктами теплоенергетики» комісією встановлено:

1. Розроблені в дисертаційній роботі науково-методичні підходи до підвищення рівня екологічної безпеки під час функціонування об'єктів теплоенергетики за допомогою моделювання їх впливу, а також розроблення

Продовження додатку В

заходів із зменшення техногенного навантаження на навколишнє природне середовище використовуються у курсі лекцій з таких дисциплін:

– «Основи технологій захисту навколишнього середовища» за темами «Основні процеси та обладнання для захисту від пилогазових викидів в атмосферу», «Процеси очищення газів від сполук сірки»;

– «Техноекологія» за темою «Техногенний вплив на довкілля електроенергетики».

2. При виконанні курсових робіт з дисципліни «Техноекологія» введено тематику курсової роботи «Моделювання впливу теплоенергетичних об'єктів на навколишнє природне середовище».

Голова комісії

Члени комісії:



О. Г. Гусак

Л. Д. Пляцук

Є. М. Савченко