

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

БАТАЛЬЦЕВ ЄВГЕН ВОЛОДИМИРОВИЧ



502/504:620.9:621.1/.2(043.3)

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

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2021

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі екології та природозахисних технологій Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Пляцук Леонід Дмитрович,
Сумський державний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри екології
та природозахисних технологій.

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

доктор технічних наук, професор
Вамболь Віола Владиславівна,
Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка» Міністерства освіти і
науки України, професор кафедри прикладної
екології та природокористування, м. Полтава.

Захист дисертації відбудеться 7 травня 2021 року о 13 год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд. 204.

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

Автореферат розісланий 6 квітня 2021 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04



Л. Л. Гурець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 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 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. 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 та шлаку займають великі площі, забруднюють підземні та поверхневі води.

У країнах з 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 рішення проблеми, що виникає. Спалювання вугілля у 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». Напрям, 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 природозахисних 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, які впливають на фільтрацію та інфільтрацію забруднювальних речовин (ЗР) у районах розміщення об'єктів теплоенергетики;
- провести математичне моделювання процесу перенесення ЗР у навколишньому середовищі;
- розробити заходи щодо зниження впливу золошлаконакопичувача на гідросферу;
- 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 проведено 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 шляхом, 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 і їх аналізі. 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. Пляцук. 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 роботи. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні завдання, описані наукова новизна та практична цінність одержаних результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведені дані про структуру й обсяг роботи.

У **першому розділі** проаналізовано вплив теплоенергетичних об'єктів на навколишнє природне середовище, методи оцінювання та моделювання техногенного навантаження.

Стан навколишнього середовища в районах розміщення об'єктів теплоенергетики був досліджений відомими вітчизняними та закордонними науковцями, серед них О. Р. Кулиненко, Л. А. Ріхтер, Е. Р. Барієва, М. М. Миленька, А. І. Горова, Л. Т. Крупська, В. П. Зверєва, В. О. Кутовий та інші. Аналіз літературних джерел підтвердив актуальність прогнозування та розроблення заходів, спрямованих на попередження забруднення навколишнього середовища під час експлуатації об'єктів теплоенергетики. Проведений огляд методів оцінювання стану територій, прилеглих до теплоенергетичних об'єктів. Установлено, що теплові електростанції комплексно впливають на навколишнє середовище, а потенційним джерелом забруднення є зона аерації підприємства.

На перенесення розчинних забруднювальних речовин під час фільтрації впливає багато факторів навколишнього середовища та процеси, які в ньому відбуваються. При цьому ступінь негативного впливу техногенних процесів відрізняється для різних забруднювальних речовин. Це свідчить про складність опису процесів техногенного забруднення, тому виникає потреба в їх моделюванні.

Математичним моделюванням атмосферного забруднення та гідроекологічних досліджень займалися такі відомі науковці: П. Я. Полубаринова-Кочина, С. П. Кундас, В. І. Лаврик, А. П. Олійник, В. М. Шестаков та інші. Одержано аналітичні рішення, які дозволяють визначати швидкість фільтрації та концентрації забруднювальних речовин та використовують ряд спрощень і припущень. Моделі, що були розроблені, адаптовані до конкретних випадків, але не дозволяють прогнозувати стан об'єктів гідросфери за нестационарних умов повною мірою. Вирішити проблему прогнозного оцінювання впливу теплоенергетичних об'єктів при врахуванні нестационарності потоку та фізичних властивостей фаз можна за допомогою чисельних методів математичного моделювання.

Другий розділ присвячений опису об'єкта та методів дослідження, методики проведення експериментів.

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. Описана методика розрахунку викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря від Чернігівської ТЕЦ.

Третій розділ присвячений моделюванню впливу теплоенергетичних об'єктів на навколишнє природне середовище.

Описаний процес деструкції палива в енергетичних котлах. Запропоновані рівняння збереження, в яких використовували гідродинаміку багатозафазового потоку, аналіз горіння і викидів NO_x .

Рівняння безперервності:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q v_q) = 0, \quad (1)$$

$$\alpha_q + \alpha_s = 1. \quad (2)$$

Рівняння характеристик:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q X_q^t) + \nabla(\alpha_q \rho_q X_q^t v_q) = \nabla(\alpha_q \rho_q D_k^t \nabla X_q^t) + S_q. \quad (3)$$

Рівняння імпульсу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q v_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q v_q) = \nabla \cdot \bar{\tau}_q - \alpha_q \nabla p + \alpha_q \rho_q g + F_q. \quad (4)$$

Рівняння газової фази:

$$F_q = K_{qs}(v_s - v_q), \quad (5)$$

$$\bar{\tau}_q = \alpha_g \mu_{g,eff} (\nabla v_g + \nabla_{v_g}^T) + \alpha_g (\lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g) \nabla v_q \bar{I}, \quad (6)$$

$$\mu_{g,eff} = \mu_g + \mu_{g,t}. \quad (7)$$

Рівняння твердої фази:

$$F_q = K_{sq}(v_q - v_s), \quad (8)$$

$$\bar{\tau}_s = -P_s \bar{I} + \alpha_s \mu_s (\nabla v_s + \nabla_{v_s}^T) + \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla v_s \bar{I}, \quad (9)$$

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2}. \quad (10)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q h_q) = -\alpha_q \frac{\partial P_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla v_q - \nabla \cdot q_q + Q_{PQ} + S_Q, \quad (11)$$

$$Q_{gs} = \frac{6k_g \alpha_g \alpha_s N_{u_g}}{d_s^2} (T_g - T_s). \quad (12)$$

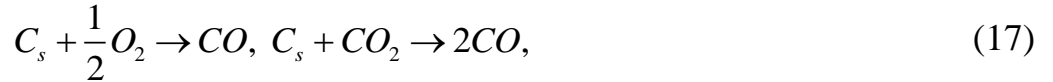
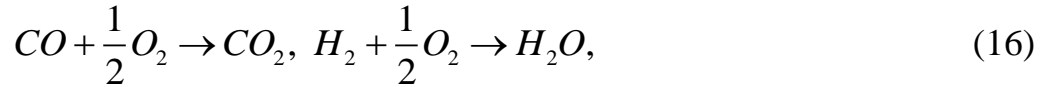
Дискретно-фазова модель:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x. \quad (13)$$

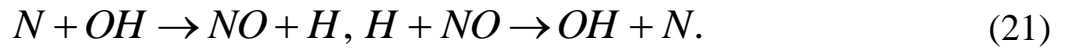
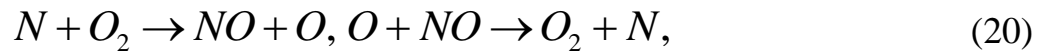
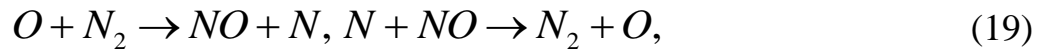
Модель спалювання вуглецю з видаленням летких речовин:

$$R' = T^\beta A e^{-E/RT} \left(P_n - \frac{R'}{D'} \right)^N. \quad (14)$$

Рівняння реакції горіння:



Моделювання утворення NO_x, утворення термічних оксидів азоту:



Описана модель руху паливної складової в зоні горіння котла ЦКШ. Для цього використовували систему диференціальних рівнянь (22–25), що складається із закону збереження маси, імпульсу, енергії та закону збереження компонентів речовин:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}, \quad (22)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u_i u_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial t_{i,j}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i, \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho h) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) \frac{\partial Q_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_q, \quad (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_\beta) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho C_\beta u_i) - \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + R_\beta, \quad (25)$$

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, NO₂, CO, CO₂ та SO₂) під час горіння полідисперсної вугільної маси.

Використовуючи програмний комплекс «Barracuda VR», у дослідженні застосували модель моделювання багатофазних частинок в осередках (MP-PIC), 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 1.

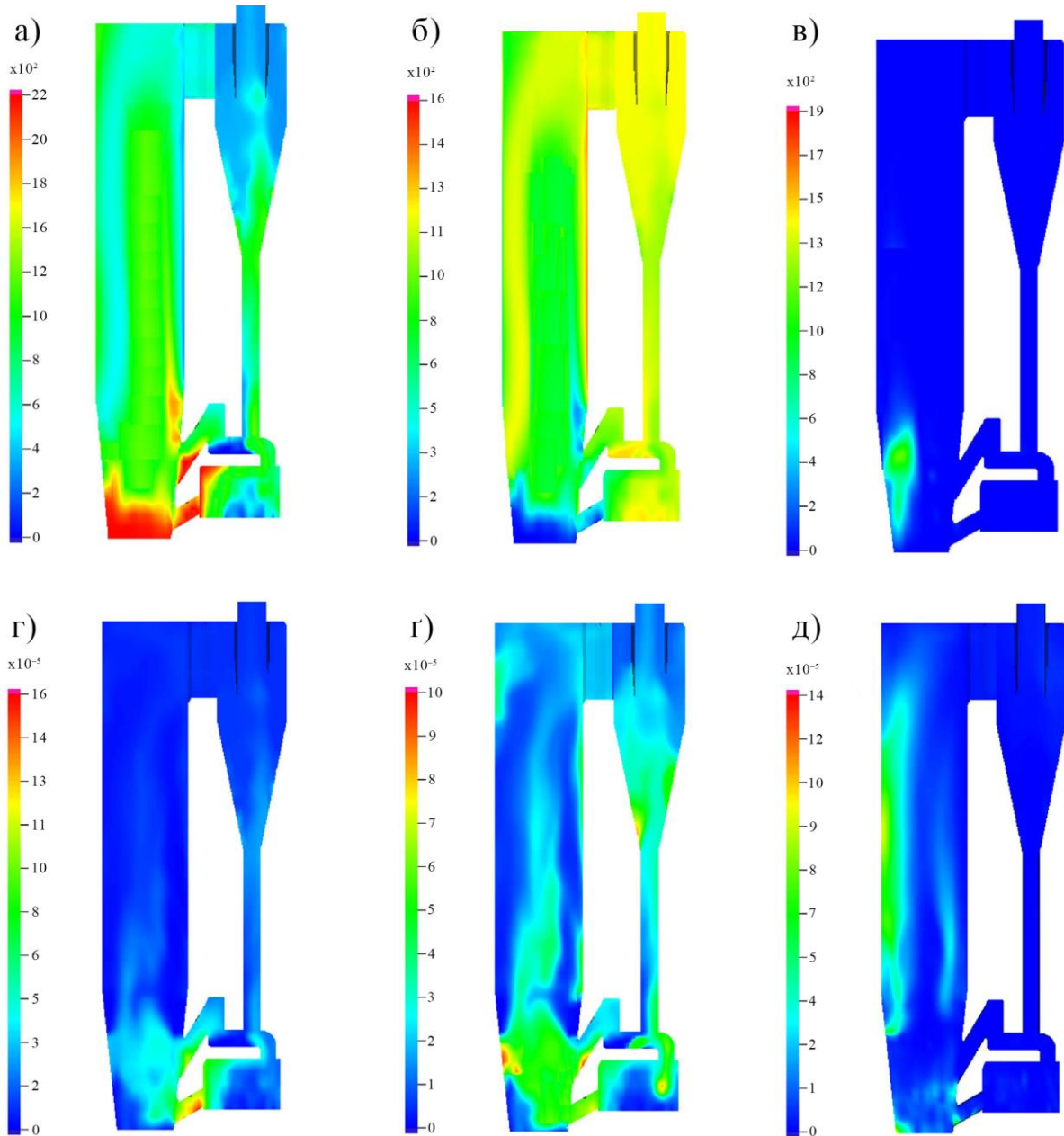


Рисунок 1 – Профілі концентрацій основних газів котла ЦКШ:
а) O_2 ; б) CO_2 ; в) CO ; г) SO_2 ; Г) NO ; д) NO_2

Розроблена математична модель перенесення забруднювальних речовин у приземному шарі атмосфери. Розглянемо приземний шар атмосфери, обмежувачись мезомасштабними процесами, для яких товщина шару D і горизонтальний масштаб руху L задовольняють співвідношення

$$\delta_1 = \frac{D}{L} \ll 1. \quad (26)$$

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

Рівняння Нав'є – Стокса:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + lv + A_M \Delta u + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (27)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} + lu + A_M \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \beta \theta + A_M \Delta w + \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (29)$$

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (30)$$

Рівняння температури:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = A_T \Delta \theta + \frac{\partial}{\partial z} k_T \frac{\partial \theta}{\partial z}. \quad (31)$$

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 в результаті додавання в зону горіння вапняку.

У рівняннях (27)–(31) прийняті позначення: t – час; вісь O_x направлена на схід, вісь O_y – на північ, а вісь O_z – вертикально вгору; $\vec{v} = (u, v, w)$ – вектор швидкості

руху повітря; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – двовимірний оператор Лапласа; $\Phi = RT_{\text{сер}} p' / \rho$ –

флуктуації геопотенціалу (R – питома газова стала; $T_{\text{сер}}$ – 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.

У результаті розрахування обчислені поля концентрацій забруднювальних речовин, температури повітря, а також максимальне значення концентрації оксиду вуглецю.

Було розроблено математичні моделі масоперенесення й профільної фільтрації з описом алгоритмів для їх чисельного розв'язання. 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. Водночас швидкість перенесення забруднювальних речовин залежить від кількості опадів і кліматичних умов, що впливають на випаровування вологи з поверхні ґрунту.

Через велику складність аналізу просторових потоків та умови, що потребують просторового уявлення потоку, але порівняно рідко трапляються в прогнозних задачах, розглянуто задачу профільної фільтрації.

Для моделювання поширення забруднювальних речовин розглянемо систему рівнянь, що містить рівняння руху фільтраційного потоку й конвективної дифузії. Диференціальне рівняння, що описує нестационарний плосковертикальний фільтраційний потік:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial H}{\partial z} \right) - Q = \eta \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (32)$$

де $H = \frac{P}{\gamma_w} + z$ – напір, м; Q – питома інтенсивність джерела або стоку, 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.

Граничні умови першого роду задають значення напорів на межі ґрунт – вода

$$H = H^*(t), \quad (33)$$

де $H^*(t)$ – задана функція часу.

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

$$k_f \left(\frac{\partial H}{\partial x} n_x + \frac{\partial H}{\partial z} n_z \right) = -V_n, \quad (34)$$

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

Процес масоперенесення плосковертикальним потоком опишемо диференціальним рівнянням

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \vec{V} \left(\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial z} \right) = \frac{\partial(\theta c)}{\partial t} - qc^*, \quad (35)$$

де c – концентрація забруднювальної речовини, мг/дм³; θ – пористість, м³/м³; q – продуктивність джерела забруднення, м³/добу; c^* – концентрація забруднюючої речовини в джерелі забруднення, мг/дм³.

З урахуванням гідродинамічної дисперсії й водонасичення запишемо рівняння (35) як

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta S_w \tilde{D}_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta S_w \tilde{D}_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta S_w \tilde{D}_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta S_w \tilde{D}_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} (V_x c) - \frac{\partial}{\partial z} (V_z c) = \frac{\partial}{\partial t} [\theta S_w c + (1 - \theta) c_s] - qc^*, \end{aligned} \quad (36)$$

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; $\theta S_w \tilde{D}_{xx} = \alpha_T |V| + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_x^2}{|V|} + \theta S_w \tau D^*$; $\theta S_w \tilde{D}_{zz} = \alpha_T |V| + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_z^2}{|V|} + \theta S_w \tau D^*$; $\theta S_w \tilde{D}_{xz} = \theta S_w \tilde{D}_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_x \cdot V_z}{|V|}$; τ – коефіцієнт звивистості; S_w – водонасичення, м³/м³; $|V|$ – модуль вектора швидкості фільтрації; α_T, α_L – коефіцієнти поперечної та поздовжньої дисперсії; c_s – концентрація адсорбованої на поверхні твердих частинок забруднювальної речовини, мг/дм³.

Припускаємо, що концентрації c і c_s пов'язані лінійною рівноважною ізотермою. Одержимо такі рівняння

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - V_x \frac{\partial c}{\partial x} - V_z \frac{\partial c}{\partial z} = \\ & = \theta S_w k \frac{\partial c}{\partial t} + q(c - c^*). \end{aligned} \quad (37)$$

Граничні умови першого роду задають значення концентрацій на межі ґрунт – рідина

$$c = c^*(t) \quad (38)$$

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

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

$$D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} n_x + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} n_z = -q_c^D, \quad (39)$$

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

Початкові умови є заданими значеннями концентрацій в усій розрахунковій області.

Під час розгляду нестационарних процесів упродовж інфільтрації в рівнянні (37) врахована зміна водонасичення з часом. Виразимо залежність водонасичення від часу після опадів t_d у вигляді

$$S_w = f(t_d) = \begin{cases} S_w = 1 \text{ за } t_d = 0; \\ 1 - \frac{0,1Q(1 + W_n)}{V_{zp}} \\ S_w = \frac{V_{zp}}{W_0} \text{ за } t_d > 0, \end{cases} \quad (40)$$

де W_n – початкова вологість ґрунту, %; Q – маса води, видалена в результаті випаровування, кг/год; W_0 – вологість за повного водонасичення, %; V_{zp} – об'єм

грунту, m^3 ; $W_0 = \alpha W_T$; α – коефіцієнт, що для глин дорівнює 0,5–0,45; суглинків – 0,6–0,55; для пісків і супісків – 0,75–0,7; W_T – вологість на межі текучості, %.

Для розв'язання задач застосовували метод скінченних елементів.

Під час розв'язування нестационарної задачі профільної фільтрації додержувалися кроково-ітераційної процедури інтегрування за часом. Часовий інтервал поділяли на проміжки інтегрування Δt . Під час інтегрування на кожному кроці просторову дискретизацію невідомої функції $H(x, z, t)$ здійснювали на сітці трикутних скінченних елементів. Метод додаткових потоків використовували для рішення системи скінченних елементів.

Під час розв'язування нестационарної задачі масоперенесення розрахунковий інтервал часу поділяли на проміжки інтегрування Δt . На кожному кроці за часом застосовували неявну різницеву схему. Просторова дискретизація невідомої функції концентрації $c(x, z, t)$ здійснювалася на сітці трикутних елементів. Для конвективних членів апроксимацію проводили за допомогою зважуваних функцій. За інших умов використовують стандартні функції форми. Під час уведення зважуваних функцій основну увагу приділяли концентраціям у вузлах, розміщених угорі за потоком. Отже, у разі переважання конвекції в процесі масоперенесення враховували, що впродовж розрахункового інтервалу часу концентрація в будь-якому елементі залежить від конвективного припливу речовини із суміжного елемента, розміщеного вище за потоком.

Алгоритм розв'язання задач реалізовано за допомогою програмного продукту «COMSOL Multiphysics». Наведені алгоритми застосовували для розв'язання задач моделювання забруднення гідросфери в зоні розміщення ТЕЦ. Для моделювання фільтрації забруднювальних речовин розраховували одомірну задачу перенесення речовини за течії забруднених вод із постійною швидкістю V .

Нестисливу рідину ($\rho = \text{const}$, $\mu = \text{const}$) розглядаємо в однорідному ґрунті ($k_f = \text{const}$). Вважаємо, що забруднені води течуть уздовж осі z , направленої від поверхні вертикально вниз. 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: $D = 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$; $\tau = 0,7$; $\theta = 0,35$; $\alpha_L = 0,005 \text{ м}$; $k_f = 0,1 \text{ м/добу}$.

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 дозволило одержати профілі концентрацій забруднювальних речовин під час фільтрації в різні моменти часу (рис. 2).

Перевірку адекватності математичної моделі фільтрації забруднювальних речовин проводили експериментально з використанням фільтраційної установки в стаціонарних умовах. Наповнену ґрунтом колонку насичували дистильованою водою. Потім у неї починали подавати розчин KCl . При фільтрації розчину періодично визначали концентрацію іонів Cl^- на виході з колонки й фіксували час проходження забруднювальних речовин.

Порівнюючи результати моделювання з даними, отриманими експериментально (рис. 3), одержали похибку розрахунку меншу за 5%. Математична модель адекватно описує фільтраційні процеси.



Рисунок 2 – Зміна концентрації забруднювальних речовин по товщині ґрунту в результаті фільтрації за різний час:
1 – 1 рік; 2 – 2 роки; 3 – 4 роки;
4 – 6 років

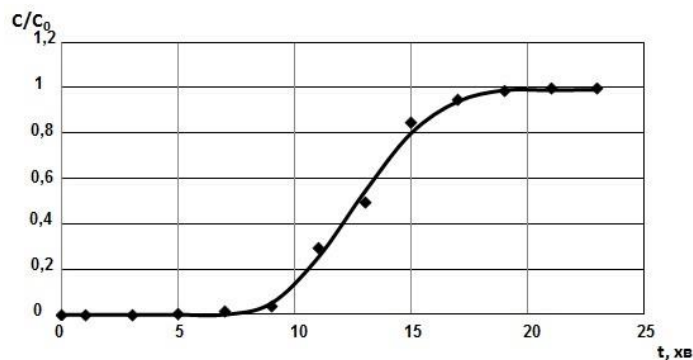


Рисунок 3 – Залежність концентрації забруднювальних речовин від часу фільтрації за математичною моделлю (лінія) та експериментальними даними (точки)

Під час моделювання процесу міграції забруднювальних речовин у зоні аерації теплоенергетичних об'єктів враховували перенесення забруднювальних речовин з опадами способом інфільтрації. Розглянута нестационарна задача профільної фільтрації. На основі її результатів була розв'язана задача перенесення забруднювальних речовин. Водночас бралася до уваги зміна водонасичення з часом.

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. У першому наближенні розглядали насичення ґрунту лише повітрям, водночас тиск приземного шару дорівнює тиску атмосферному. В результаті розв'язання цієї задачі одержали залежність концентрації ЗР по глибині ґрунту в певний час після випадання опадів (рис. 4). Отримали, що максимальна концентрація ЗР у зоні інфільтрації спостерігається на глибині 25–35 см від ґрунтової поверхні. Адекватність математичної моделі перенесення забруднювальних речовин під час інфільтрації перевіряли способом порівняння результатів математичного моделювання та експериментальних даних за вмістом іонів нікелю (2+) у ґрунтах зони аерації теплоенергетичного об'єкта (рис. 5). Аналіз даних свідчить про похибку розрахунку 5–7 %.

Математична модель, що була розроблена, використана для розв'язання двовірної задачі моделювання процесу фільтрації забруднювальних речовин із золошлаконакопичувача.

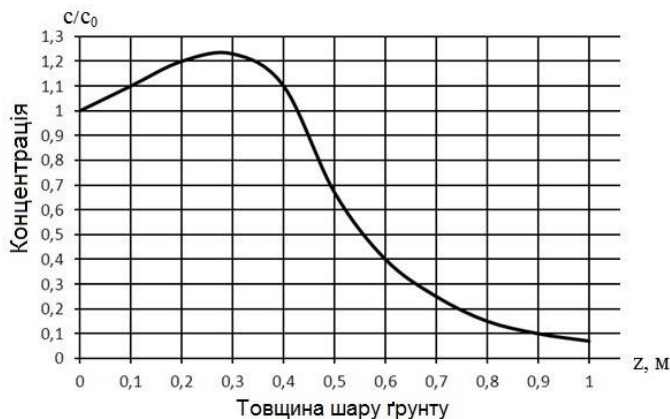


Рисунок 4 – Зміна концентрації забруднювальних речовин під час інфільтрації на 5-ту добу

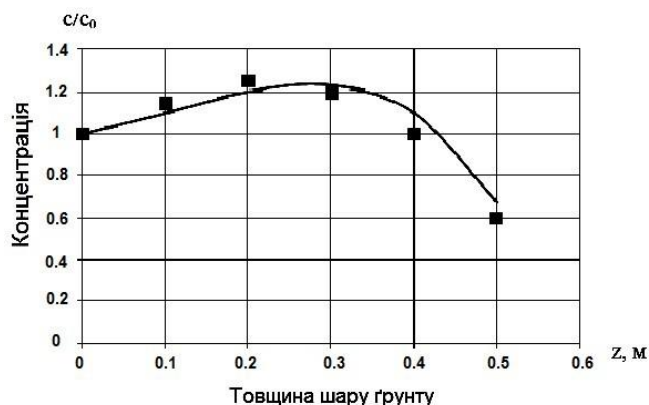


Рисунок 5 – Результати моделювання та експерименту: лінія – розрахункові дані, точки – експериментальні дані

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

Четвертий розділ присвячений дослідженню утилізації відхідних газів під час деструкції палива на об'єктах теплоенергетики. Розроблений механізм зв'язування азотних і сірчистих сполук у зоні деструкції палива. Запропонований режим роботи пристроїв об'єктів теплоенергетики з повною утилізацією техногенних газів.

Механізм утворення NO з вугілля зображений на рис. 6. Обвуглений азот окислюється до оксиду азоту в результаті ряду реакцій. Леткий азот бере участь у паралельно-послідовній реакції, у якій NO утворюється в результаті окиснення леткого азоту. Частина оксиду азоту, утвореного раніше, також відновлюється до азоту. Велику 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) та вугіллям.

На рисунку 6 наведений список можливих реакцій. Внесок кожної реакції в утворення NO або в його подальше руйнування неоднаковий. Наприклад, 77 % азоту в паливі окиснюється до NO в результаті вищезазначених реакцій, а інша частина являє собою NH₃, який частково перетворюється на азот.

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

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

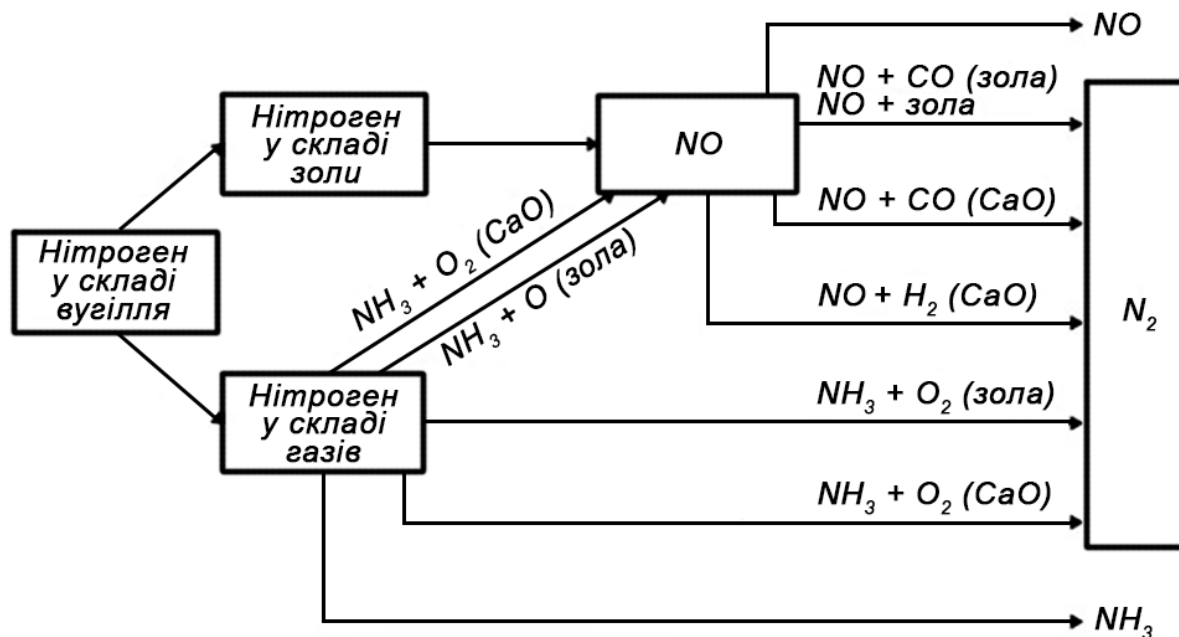


Рисунок 6 – Відносне значення (у відсотках від загальної кількості азоту в паливі) різних шляхів реакції в утворенні та відновленні оксиду азоту. Зола та оксид кальцію каталізують деякі реакції (зазначені в дужках)

Перетворення вугільного азоту на закис азоту залежить від процесу видалення летких речовин. Було відзначено, що якщо вугілля нагрівається з помірною швидкістю до 900 °С, то лише невелика частина вугільного азоту з'являється у вигляді HCN, який є основним джерелом закису азоту.

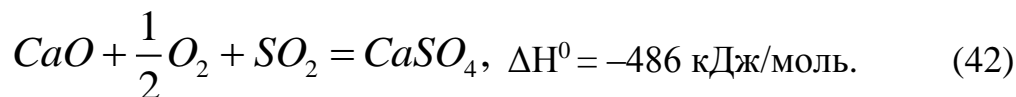
Під час горіння вугілля сірка окиснюється в основному до діоксиду сірки в такій екзотермічній реакції:



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 (млн^{-1} або ppm) димового газу. Оскільки теплотвірна здатність вугілля змінюється, сірка, що виділяється установкою із заданим тепловкладенням, також буде змінюватися. Таким чином, викиди SO_2 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 надходить в атмосферу. Деяка частина діоксиду сірки може бути перетворена на триоксид сірки:



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

Реакції (43) сприяють висока температура та тиск. Оскільки реакція проходить повільно, лише невелика частина діоксиду сірки встигає перетворитися на триоксид сірки. 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 викидаються через димохід у вигляді кислотного смогу.

Вапняк ($CaCO_3$) та доломіт ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) – 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:

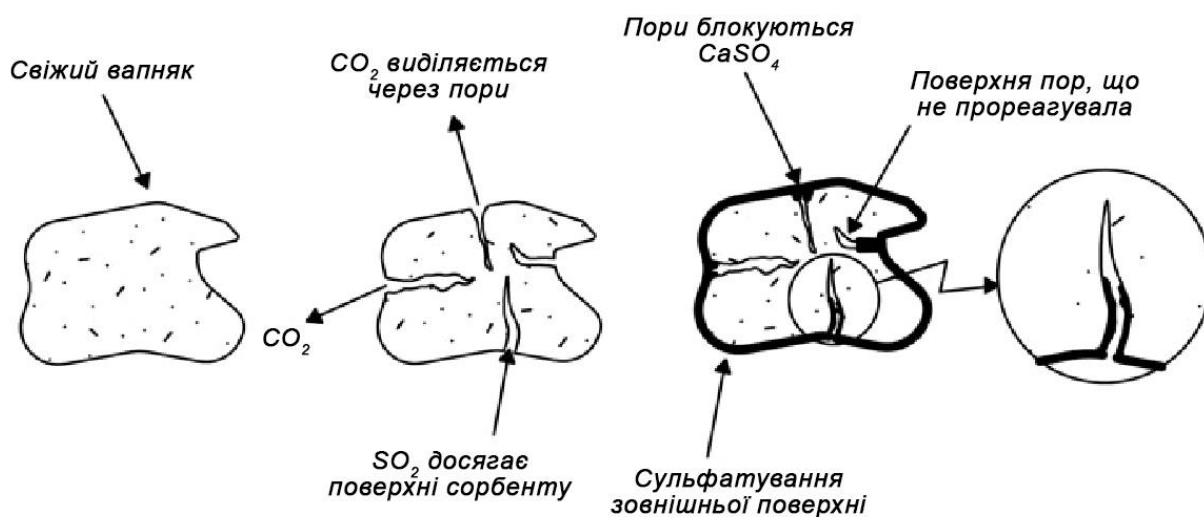
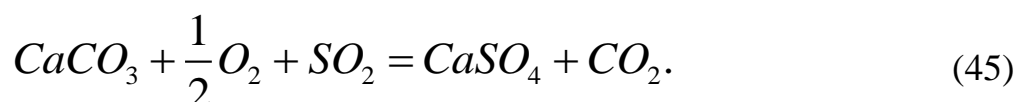


Рисунок 7 – Поглинання діоксиду сірки сорбентами (вапняком)

Вуглекислий газ, що виділяється під час прожарювання, створює і збільшує безліч пор у частинці вапняку (рис. 7), що відкриває додаткові площі поверхні для подальших реакцій сульфатування.

У п'ятому розділі проведені дослідження з оцінювання впливу Чернігівської ТЕЦ на атмосферу, гідросферу та розроблені заходи щодо його зниження.

Встановлено, що золошлаконакопичувач є джерелом негативного впливу на підземні води, а викиди відхідних газів – на атмосферне повітря.

Було виконане екологічне оцінювання стану атмосферного повітря в районі розміщення Чернігівської ТЕЦ, для чого були враховані викиди як самої теплоелектроцентрالی, так і підприємств, що аналогічно впливають на цей район. Урахування забруднення атмосфери джерелами підприємств наведено величинами фонових концентрацій ЗР в атмосферному повітрі, за даними спостережень на стаціонарному посту, розміщеному в місті Чернігів, 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) з програмного комплексу «ЕОЛ 2000» v4.0, розробленого ТОВ «Софт Фонд» і погодженого Міністерством охорони навколишнього природного середовища України. Розрахунок розсіювання забруднювальних речовин проведений для літнього, найбільш несприятливого для розсіювання періоду. Результати розрахунку для Чернігівської ТЕЦ до реконструкції наведені на рисунках 8, 9 та 10.

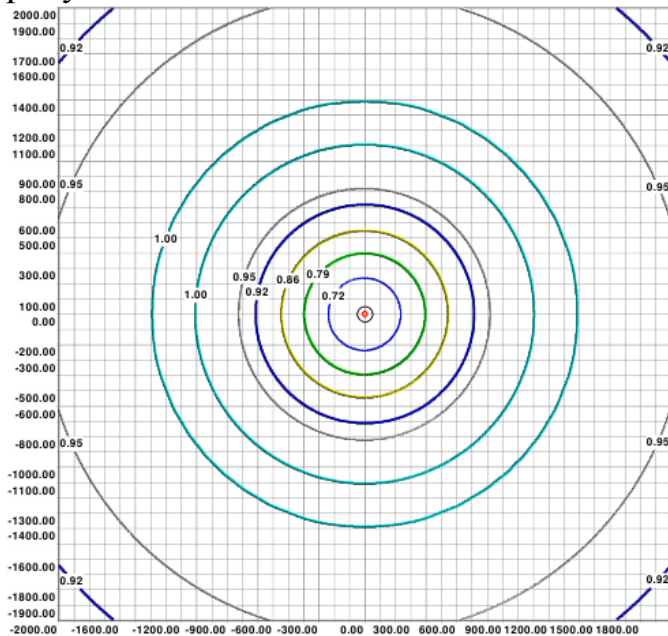


Рисунок 8 – Карта розсіювання діоксиду азоту (у долях ГДК) від Чернігівської ТЕЦ до реконструкції

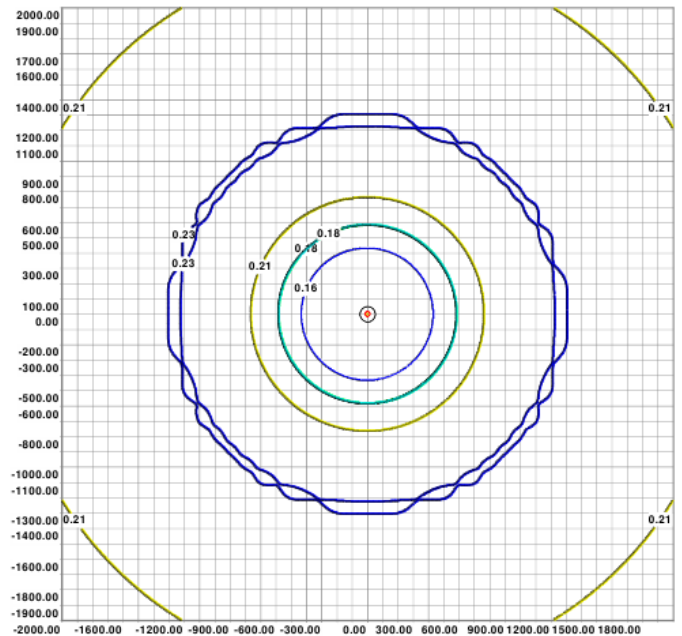


Рисунок 9 – Карта розсіювання сірчистого ангідриду (у долях ГДК) від Чернігівської ТЕЦ до реконструкції

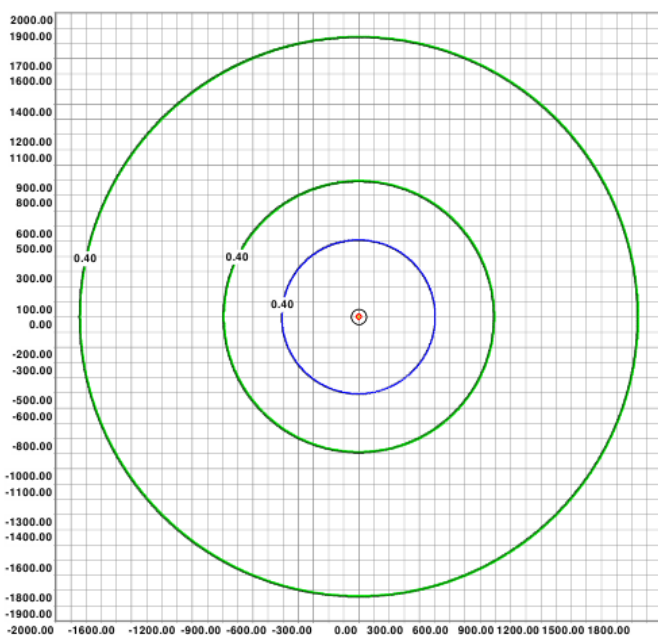


Рисунок 10 – Карта розсіювання оксиду вуглецю (у долях ГДК) від Чернігівської ТЕЦ до реконструкції

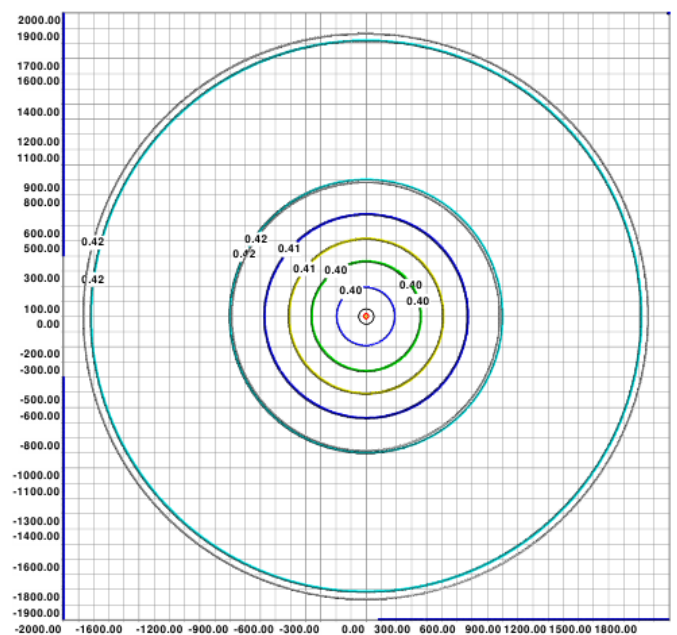


Рисунок 11 – Карта розсіювання оксиду вуглецю (у долях ГДК) від Чернігівської ТЕЦ після реконструкції

Результат розрахунку приземної концентрації оксиду вуглецю після впровадження запропонованих технічних рішень наведено на рисунку 11. Прогнозована концентрація оксиду вуглецю в зоні впливу Чернігівської ТЕЦ після реконструкції збільшилася, але не перевищує рівень ГДК.

Прийняття державних стандартів екологічного управління та керування є важливим і необхідним стимулом інноваційних процесів. Орієнтація виробництва на дотримання вимог стандартів стабілізує та оптимізує роботу технологічного обладнання, сприяє технічному переоснащенню, удосконаленню природоохоронного обладнання, завдяки чому додержуються екологічні нормативи. Ураховуючи вищенаведене, технічні методи щодо запобігання негативного впливу золошлакових відходів на об'єкти гідросфери ми можемо поділити на дві основні групи: активні та пасивні. Активними передбачено зменшення утворення відходів, пасивні – зменшують вплив існуючих місць складування ЗШВ (рис. 12).



Рисунок 12 – Методи зниження техногенного навантаження від ЗШВ

Пасивні методи будуть спрямовані на попередження забруднення під час проектування або розширення площі існуючих місць складування ЗШВ шляхом улаштування захисних екранів та зменшення обсягів відходів у вже існуючих золошлаконакопичувачах у процесі перероблення ЗШВ.

Для очищення димових газів котлів використовують мокрі зололовлювачі типу МВ-ВТИ 3100 з вертикальними коагуляторами Вентурі. Ефективність очищення становить 96–96,2 %.

Запропоновано створення протифільтраційного екрана з місцевих глинистих матеріалів для попередження міграції забруднювальних речовин із золошлаконакопичувача. Було встановлено механізм адсорбції іонів нікелю (2+) на глинистих мінералах, розраховано коефіцієнти в рівнянні Фрейндліха. 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 свідчать про надійне затримання іонів нікелю в структурі мінералів, що дозволяє використовувати їх як протифільтраційні екрани.

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 золівідвалу.

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 умістом вугілля, що не згоріло, водночас інші відходи можуть використовуватися як заповнювачі в будівництві.

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, 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 Всеукраїнської науково-технічної конференції (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.

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.

Дисертація 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.

У результаті проведених досліджень були розроблені математична модель процесу горіння в котлах із циркулюючим киплячим шаром та модель перенесення забруднювальних речовин за профілем ґрунту в зоні розміщення ТЕЦ. Враховуючи 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.

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

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 має золошлаконакопичувач.

Запропоноване влаштування захисного екрану 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.

АННОТАЦИЯ

Батальцев Е. В. Моделирование техногенного воздействия на окружающую природную среду объектами теплоэнергетики. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность. – Сумский государственный университет, Сумы, 2021.

Диссертация посвящена решению актуального научно-практического вопроса моделирования техногенного воздействия объектов теплоэнергетики на атмосферу и гидросферу и разработки мероприятий по повышению уровня экологической безопасности в районах их расположения.

В результате проведенных исследований были разработаны математическая модель процесса горения в котлах с циркулирующим кипящим слоем и модель переноса загрязняющих веществ по почвенному профилю в зоне расположения тепловых электростанций. Учитывая изменения напора и водонасыщения, зависящие от количества осадков, климата в целом, проведено прогнозное оценивание состояния подземных вод в зоне аэрации исследуемого объекта теплоэнергетики, а также при фильтрации воды из золошлаконакопителя. Разработаны алгоритмы численного решения задач профильной фильтрации, массопереноса загрязняющих веществ на базе метода конечных элементов.

Проведено исследование утилизации отходящих газов при деструкции топлива на объектах теплоэнергетики. Сформирован механизм связывания азотных и сернистых соединений в зоне деструкции топлива. Предложен режим работы устройств объектов теплоэнергетики с полной утилизацией техногенных газов.

С целью оценки влияния на состояние окружающей среды работающих на угле теплоэнергетических объектов и для выявления путей миграции загрязняющих веществ исследовали почву, растительность, а также снежный покров на содержание тяжелых металлов в районе расположения ТЭЦ. Результаты исследований подтвердили, что предприятие негативно влияет на прилегающие территории. При этом самый высокий уровень опасности для водных объектов представляет золошлаконакопитель.

Предложено устройство защитного экрана в золошлаконакопителе, уменьшающего техногенную нагрузку мест складирования золошлаковых отходов на объекты гидросферы. Проведенные исследования подтвердили, что местные

глинистые сорбенты могут эффективно использоваться в качестве сорбентов. Перспективным направлением также является переработка золошлаков. Обследование золошлаковых отходов ТЭЦ подтвердило возможность их использования в сфере строительства.

Ключевые слова: техногенная нагрузка, экологическая безопасность, объект теплоэнергетики, загрязнение, гидросфера, атмосфера, атмосферный воздух, загрязнение почв.

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 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.

As a result of the research, a mathematical model of the combustion process in boilers with a circulating fluidized bed and a model of the transfer of pollutants along the soil profile in the area of thermal power plants were developed. Taking into account the changes in the pressure and water saturation, that are depended on the amount of precipitation and the climate as a whole, the forecast of the state of groundwater in the aeration zone of the investigated heat-power facility, as well as in the filtration of water from the ash-and-slag dump, was carried out. Algorithms for the numerical solution of the problems of profile filtration and pollutants' mass transfer were developed based on of the finite element method.

A study of the utilization of waste gases during the destruction of fuel at thermal power facilities was carried out. A mechanism for binding nitrogen and sulfur compounds in the zone of fuel destruction has been formed. The operation mode of devices of thermal power facilities with full utilization of technogenic gases is proposed.

In order to assess the impact on the environment of coal-fired thermal power facilities and to identify migration paths of pollutants, soil, vegetation, and snow cover were studied for the content of heavy metals in the area of the CHPP. The research results confirmed that the enterprise has a negative impact on the nearby territories. At the same time, the highest level of danger for water bodies is posed by an ash-and-slag dump.

A protective screen in the ash-and-slag dump is proposed, it will reduce the technogenic load of the ash-and-slag waste storage sites on the hydrosphere. Studies have confirmed that local clay sorbents can be effectively used as sorbents. Ash-and-slag waste processing is also a perspective area. Inspection of that wastes on CHPP confirmed the possibility of their use in the construction industry.

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

Підписано до друку 24.03.2021.
Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,2. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №

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