

502.174(043)
К 76

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ

КОШЛАК ГАННА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 504.062; 532.5.072.12

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ТЕПЛОВИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО
НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ**

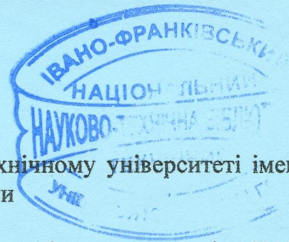
21.06.01 – Екологічна безпека

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2016



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор, академік НАН України
Крижанівський Євстахій Іванович
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу Міністерства освіти і науки України, ректор,
м. Івано-Франківськ

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
Шмандій Володимир Михайлович
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри екологічної безпеки та організації природокористування, м. Кременчук

доктор технічних наук, професор,
Мисак Йосиф Степанович
Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри теплотехніки, теплових і атомних станцій, м. Львів

доктор технічних наук, професор
Яковлева Ірина Геннадіївна
Запорізька державна інженерна академія Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри теплоенергетики, м. Запоріжжя

Захист відбудеться **” 27 ” грудня 2016 року** о **11⁰⁰** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.05 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України за адресою: вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Міністерства освіти і науки України за адресою: вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019

Автореферат розіслано **« 26 » листопада 2016 р.**

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 20.052.05
к.т.н., доцент

К.О. Радловська



an2627

1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Актуальність роботи зумовлена необхідністю зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище тепловими електростанціями, що працюють на вугіллі, шляхом утилізації твердих відходів у теплоенергетичних технологіях. Перспективність використання золи диктується її властивостями та низькою вартістю, економічним та екологічним ефектами. Об'єкти теплоенергетики є одними з основних джерел потенційного, до теперішнього часу практично кількісно не врахованого, ризику техногенного навантаження для населення і навколишнього середовища. Комплексна оцінка процесів енергогенерації і пов'язаних з ними екологічних наслідків вкрай необхідна, оскільки енергетичні об'єкти паливно-енергетичного комплексу найбільш інтенсивно впливають на біосферу.

В останні роки теплові електростанції виробляли приблизно 40 % всієї електроенергії України. Через зростання цін на імпортований природний газ уряд пропонує зменшувати витрати ТЕС шляхом використання вугілля власного видобутку і скорочення об'ємів спалювання газу. Так, до 2030 року планується збільшити частку вугілля в балансі теплової енергетики майже в 1,5 раза (до 70-75 %). Отже, очікується, що на теплових електростанціях України до 2030 року виробництво енергії зросте майже вдвічі – до 282 млрд кВт·год. Однак використання на ТЕС низькоякісних сортів вугілля призведе до збільшення викидів забруднювальних речовин в атмосферу, накопичення великої кількості твердих відходів (золи та шлаку); масштабних забруднень навколишнього середовища та ускладнення екологічної ситуації в країні.

Така ситуація є характерною для усіх теплових електричних станцій України. Масштаби техногенного впливу ТЕС на довкілля розглянемо на прикладі Галицького району, де збудовано потужну Бурштинську теплову електричну станцію. Основними факторами формування несприятливої екологічної ситуації в районі є техногенне забруднення атмосфери викидами Бурштинської ТЕС, що становили в останні роки 75-80 % загальних забруднень. Так, під час спалювання на станції за 1 годину 1000 т газового вугілля з топок котлів видаляється 34,5 т шлаку, з бункерів електрофільтрів, що очищають гази на 99 %, – 193,5 т золи, а через труби в атмосферу викидається 10 млн м³ димових газів. Ці гази, крім азоту і залишків кисню, містять 239 т оксиду вуглецю (CO₂, карбон(IV) оксиду), 255 т водяної пари, 34 т оксидів сірки (SO_x), 9,34 т оксидів азоту (NO_x) і 2 т леткого попелу.

Надзвичайно актуальною проблемою є складування та переробка твердих відходів – паливного шлаку і золи. За статистичними даними у 2015 році було утворено 847 853 т золи і 213 814 т шлаку, які на території понад 200 га землі поблизу Бурштинської ТЕС формують золовідвали.

Бурштинська ТЕС належить до 100 найбільш шкідливих підприємств України, є одним з основних забруднювачів довкілля, які вкрай негативно впливають на здоров'я населення Карпатського регіону. Викиди ТЕС розносяться повітрям на відстань до 100 кілометрів, а за певних погодних умов понад 20 % полотноантів

розповсюджуються за межі не тільки Галицького району, але й України. Часточки золи та вугільного пилу осідають у 30-кілометровому радіусі навколо станції.

Природна здатність самоочищення екосистеми недостатня для стримування розповсюдження меж забруднення. Очевидно, якщо не вирішувати проблему нейтралізації шкідливого впливу відходів ТЕС, то межі забруднень будуть поширюватися і це призведе до дестабілізації стану навколишнього середовища.

Проблеми екології та енергетики, вирішувані в дисертаційній роботі, базуються на результатах досліджень відомих вчених: Шапара А. Г., Адаменка О. М., Шмандія В. М., Мальованого М. С., Приходька М. М., Челядина Л. І., Фоменка Н. В., Долінського А. А., Мисака Й. С., Авраменка А. О., Гуриної І. В., Лукиної Н. В. та ін.

Отже, актуальну проблему енергопостачання виробництва необхідно оцінювати як комплексне народногосподарське науково-технічне завдання екології енергетики, що потребує негайного вирішення.

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, та результати дослідження відповідають Державній програмі України наукового напрямку 04.06 – «Екологічно чиста енергетика і ресурсозберігаючі технології», плану заходів на 2010 – 2030 рр. з реалізації «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», затвердженому розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071-р від 24.07.2013.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до наукової тематики кафедр теплоенергетики ДДТУ; теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики ПолтНТУ. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також відповідні розроблені методики розрахунків автор отримав при виконанні науково-дослідних держбюджетних робіт МОН України за темами: № 202/09-ДБ (№ Д.Р.0109U002254) «Розвиток теоретичних та технологічних основ гідротермічного створення рідких дисперсних середовищ» (ДДТУ); № 202/12-ДБ (№ Д.Р.0112U000344) «Дослідження процесів дискретного введення енергії в рідинні суміші» (ДДТУ); № Д-5-15 Ф "Методологія екологічно безпечного використання відновлювальних джерел енергії у сталому туристично-рекреаційному розвитку Карпатського регіону" (ІФНТУНГ), № ДР No 0113U00857 «Застосування газогідратних технологій при розробці традиційних і газогідратних родовищ газу»; ДР No 0115U002420 «Дослідження впливу термодинамічних параметрів фазових переходів у системах із газовими гідратами на ефективність газогідратних технологій». Результати дисертаційної роботи використовувалися також при виконанні досліджень згідно з угодою 12/15 ДКП «Теплові мережі» «Розробка нового пористою теплоізоляційного матеріалу» м. Дніпродзержинськ; № 01-16 з European academy of education and science: «Створення теоретичних основ формування пористої структури на основі мінералізованої сировини», м. Полтава.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в узагальненні нового вирішення наукової та важливої прикладної проблеми

утилізації промислових відходів теплових електричних станцій для зменшення техногенного навантаження на довкілля на прикладі впливу Бурштинської ТЕС.

Відповідно до зазначеної мети дисертаційна робота містить постановку і вирішення таких основних завдань:

- на основі теоретичних і експериментальних досліджень визначити якісний та кількісний вплив твердих відходів виробництва Бурштинської ТЕС на екологічний стан довкілля; розробити заходи для зменшення шкідливих викидів під час спалювання низькосортного вугілля;

- дослідити фізико-хімічні процеси в золі Бурштинської ТЕС, що відбуваються під час нагрівання, зволоження та її зберігання;

- розробити та обґрунтувати раціональні технології утилізації техногенних відходів шляхом створення нових ефективних пористих теплоізоляційних матеріалів (ПТМ) з прогнозованими теплофізичними властивостями;

- експериментально і теоретично дослідити вплив складу золи на процеси гідратації цементних сумішей, встановити їх кількісні характеристики для обґрунтування нових технологій виробництва ПТМ;

- дослідити закономірності тепломасообмінних та фізико-хімічних процесів у золувмісній сировині при структуроутворенні ПТМ; визначити функціональний взаємозв'язок теплофізичних і структурних характеристик нових пористих матеріалів, знайти їх оптимальні співвідношення; визначити раціональні термодинамічні умови гідротермічного спучування і теплофізичні характеристики нових пористих матеріалів;

- розробити технологію рекультивациі та матеріальні баланси золовідвалів з метою покращення екологічної ситуації Галицького району (земельних ділянок, що перебувають у межах зон забруднення від ТЕС).

Об'єкт дослідження – процеси техногенного впливу відходів ТЕС на довкілля; технології термічної утилізації твердих відходів при виробництві ПТМ.

Предмет дослідження – теплофізичні та технологічні особливості утилізації золошлакових відходів теплових електричних станцій.

Методи дослідження. У роботі використано стандартні сучасні методи дослідження характеристик золи для визначення її хімічного та фазово-мінералогічного складу, фізико-механічних властивостей, а також експериментальні й розрахункові методи досліджень теплофізичних процесів та властивостей структури матеріалів із застосуванням диференціальної термогравіметрії (DTA-DTG), калориметрії і оптикофотографічних приладів, фізичного моделювання, чисельного експерименту на ЕОМ, методів планованого експерименту й інших засобів математичної статистики. Теоретичні дослідження включають відомі методи математичної фізики і ряд існуючих методик розв'язку окремих задач. Застосовано методи атомно-абсорбційного аналізу для визначення вмісту важких металів; математичного моделювання розповсюдження викидів хімічних газоподібних і твердих часток (золи-виносу) в атмосферному повітрі в зонах впливу ТЕС з використанням програми EOЛ; методи картографії, програми QGIS.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні наукові результати роботи полягають у теоретичному й експериментальному обґрунтуванні та розробленні нового підходу до вирішення важливого науково-технічного завдання – утилізації техногенних відходів, що утворюються внаслідок виробничої діяльності теплових електричних (на прикладі Бурштинської ТЕС). Зокрема, у дисертаційній роботі:

1. Вперше на основі дослідження та аналізу особливостей розповсюдження шкідливих викидів ТЕС створено науково-методологічні основи і розроблено комплексні заходи щодо зменшення шкідливих забруднень й скорочення обсягів розміщення великотоннажних відходів для забезпечення відповідності ТЕС нормам екологічної безпеки.

2. Вперше за допомогою диференційно-термічного аналізу досліджено основні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в золі Бурштинської ТЕС під час зберігання та впливу на неї вологи і температури; досліджено закономірності реалізації фізико-хімічних процесів у сировинних сумішах на основі золи під час гідратації, термічного случування, кристалізації та твердіння; оптимізовано параметри технологічного впливу на зазначені процеси, що дозволило розробити теоретичні основи нових технологій утилізації золи.

3. На основі знайдених закономірностей тепломасообмінних та фізико-хімічних процесів у зольних сумішах набуло подальшого розвитку фізичне й аналітичне уявлення про фазові переходи в дисперсних середовищах, що стало підставою для розроблення принципів нових технологій утилізації твердих відходів (золи) шляхом використання їх у виробництві ПТМ.

4. Вперше доведено та обґрунтовано експериментально і аналітично, що структура теплоізоляційного матеріалу на основі золи впливає на теплофізичні характеристики й інтенсивність тепломасообміну в пористих системах, що дозволило оптимізувати склад і технологічні режими виробництва кінцевих виробів, а також розробити методику керування їх теплофізичними характеристиками на етапі проєкту.

5. Вперше на основі експериментальних досліджень створено математичні залежності, що дозволило розробити методики розрахунку параметрів енергообміну в пористому середовищі.

6. Вперше досліджено вплив складу золи на процеси гідратації цементних компонентів, встановлено кількісні характеристики цього впливу, що дозволило розробити технології заміщення золою цементу у складі газобетону, оптимізувати його сировинний склад; визначити кінетичні характеристики процесів твердіння шляхом введення хімічних добавок NaCl та Na_2SO_4 для прискорення процесів гідратації.

7. Визначено теплофізичні характеристики нових пористих матеріалів в залежності від їх структурних параметрів, що дозволило створити методологію керуваного структуроутворення ПТМ з прогнозованими властивостями.

8. Набули подальшого розвитку наукові принципи створення нових технологій виробництва будівельних матеріалів з техногенної сировини (золи), що дозволить утилізувати золу Бурштинської ТЕС у виробництві конструкцій із

пористого бетону, поступово зменшити її накопичення у золосховищах.

Практичне значення одержаних результатів. На основі результатів виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено методику комплексної утилізації твердих відходів теплових електричних станцій, що працюють на вугіллі, і методичні рекомендації для реалізації досліджуваних технологій.

Розроблено нову технологію утилізації золи шляхом створення ПТМ, оптимізовано склад ПТМ і технологічні режими, визначено теплофізичні й механічні властивості нових матеріалів, а також встановлено взаємозв'язок між ними. Це дозволило на новому експериментальному підґрунті створити теоретичні основи енергообміну в замкнених пористих системах; наукову концепцію керованого формування пористої структури нових матеріалів з прогнозованими теплофізичними характеристиками на основі золи Бурштинської ТЕС.

Розроблено матеріальні баланси золосховищ, що характеризують екологічний стан району до і після реалізації запропонованих у дисертаційній роботі технічних рішень.

Запропоновано технологію рекультивациі золовідвалів, реалізація якої дозволить вирішити низку екологічних проблем: ліквідувати розповсюдження забруднень повітрям 212,8 т/рік; зменшити забруднення гідросфери (620000 м³/рік) та атмосфери; покращити санітарно-екологічний стан територій з високим рівнем техногенного навантаження.

Деякі з цих рішень втілені у виробництво з загальним економічним ефектом 3 млн 200 тис грн на рік (акти впровадження на: ДКП «Теплові мережі» м. Дніпродзержинськ від 07.04.2015 р; ОАО «ДКПК» від 12.03.2010 р; «EANS» від 18.04.2016 р).

Реалізація результатів дисертаційної роботи дозволить скоротити викиди основних забруднювальних речовин і обсяги розміщення великотоннажних відходів, що утворюються внаслідок виробничої діяльності Бурштинської ТЕС, зменшити техногенне навантаження на довкілля Галицького району, а також отримати нові ефективні теплоізоляційні матеріали.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням. Наукові результати роботи базуються на дослідженнях, виконаних безпосередньо автором. Розробка завдань, аналіз літературних джерел, вибір методів, методології досліджень, основний комплекс експериментальних робіт (постановка експериментів, їх виконання, статистична обробка отриманих експериментальних даних), теоретичні узагальнення, положення дисертації, аналіз та інтерпретація отриманих даних автором виконані самостійно.

Апробація результатів досліджень. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на засіданнях кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, на наукових міжкафедральних семінарах кафедр: теплотехніки, теплових та атомних станцій Національного університету «Львівська політехніка»; екології Івано-Франківського Національного технічного університету нафти і газу; відділі тепломасообміну інституту механіки рідини (ІРМ, Poland), 2-му

міжнародному конгресі захисту навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування, 19-22 вересня Львів – 2012, 2016; 8 - й Міжнародній науковій конференції «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» Казахстан, Караганда 18-20 июня 2012; 65-й науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (23–24 квітня 2013 р.); 8 - й Міжнародній конференції «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», Київ, Україна, 2014 р.; Міжнародній науково-практичній конференції «Современные направления теоретических и прикладных исследований», м. Одеса (18–30 березня 2014 р.); International conference «Problems of energy saving and nature use 2013», Budapest, Hungary, 2014 р.; Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції розвитку науки і техніки в умовах глобалізації», м. Київ, Україна (25 лютого 2014 р.); LXI міжнародній науково-практичній конференції «Industrial science in the service of creation and progress», м. Лондон (1 серпня 2013 р.); V-й міжнародній науково-технічній конференції «Металлургические процессы и оборудование», м. Донецьк (4 вересня 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии», м. Гродно (15–16 жовтня 2013 р.); The European Scientific and Practical Congress «Global scientific unity 2014», Prague (26–27 september 2014); 101-й міжнародній науково-практичній конференції «Studying the nature of matter and physical fields in the search for ways of the fundamental scientific gnoseology problems solution», м. Лондон (21 квітня 2015 р.); International conference «Problems of energy saving and nature use 2013», Gdansk, Poland, 2014.

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано у 41-й науковій праці, з них 15 – у фахових виданнях України, 19 – у виданнях, що включено в МБД «Ulrich's Web Global Serials Directory», «eLIBRARY», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services», «Ulrich's Periodicals Directory» (шість статей у базі «Scopus»); 22 – у закордонних. Отримано один патент України на корисну модель. Результати дисертаційної роботи опубліковано у шести наукових монографіях і одному навчальному посібнику.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (254 джерела на 27 сторінках) та чотирьох додатків. Повний обсяг дисертації становить 346 сторінок, у тому числі основний текст містить 291 сторінку, 115 рисунків, 44 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність напряму досліджень; зазначено зв'язок роботи з науковими програмами; вказано мету, завдання, об'єкт та предмет досліджень; наведено положення, що визначають її наукову й практичну

значущість, а також особистий внесок здобувача; ступінь апробації результатів і відомості про публікації автора.

У першому розділі досліджено вплив промислових відходів на довкілля Галицького району. Проаналізовано екологічну ситуацію навколо теплових електричних станцій, зокрема Бурштинської ТЕС; технічний стан електрогенерувальних станцій України та їх вплив на навколишнє середовище; вплив відходів виробництва Бурштинської ТЕС на здоров'я населення Галицького району. Виконано прогностичні розрахунки ускладнення екологічної ситуації в Галицькому районі виходячи із перспективи збільшення обсягів споживання вугілля та виробничих потужностей Бурштинської ТЕС.

Досліджено склад золи Бурштинської ТЕС та встановлено перспективи її утилізації в технологіях виробництва пористих теплоізоляційних матеріалів. Проаналізовано можливість керованого термодинамічного спучення сировинної суміші для отримання ПТМ з прогнозованими теплофізичними властивостями.

На основі розрахункового аналізу досліджено особливості енергообміну в пористому середовищі, та зв'язок інтенсивності теплопередачі зі структурою матеріалів.

На основі літературного аналізу та досліджень автора обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, визначено мету та завдання дослідження.

У другому розділі вивчається можливість утилізації золи Бурштинської ТЕС та її використання як основного матеріалу у виробництві пористих теплоізоляційних структур різного призначення: для будівельної галузі, теплоізоляції теплотехнічного обладнання і будівель. Питання утилізації твердих відходів розглянуто в найбільш важливих аспектах – з точки зору екологічної проблеми регіону, позиції держави у даному питанні, проблем будівельної індустрії, енергогенерувальних компаній та шляхів практичного вирішення завдань. Очевидно, що золу слід розглядати не як відходи виробництва, а як вторинний ресурс – сировину для отримання нових матеріалів. Для реалізації цього завдання необхідно було дослідити основні фізико-хімічні процеси та перетворення, що відбуваються в структурі золи, які можна було б використовувати в зазначених технологіях. Одним із способів утилізації золи ТЕС є використання її в технології виробництва пористого теплоізоляційного матеріалу шляхом термічного спучення водорозчинної мінеральної сировинної суміші. Тому за допомогою диференційно-термічного аналізу досліджувалися фізико-хімічні та теплофізичні процеси, що відбуваються під час формування, нагрівання та спучування сировинних сумішей на основі золи Бурштинської ТЕС.

У процесі формування пористої структури при нагріванні та спучуванні агентами пороутворення є водяна пара, CO_2 (карбонIV оксид) та H_2 (водень). Кожен з них відіграє певну роль в формуванні структури матеріалу в визначений момент часу. На першому етапі досліджень ставилось завдання дослідити умови виділення зазначених газів, після чого можна визначити кількісно склад сировинної суміші та основні технологічні режими.

Використання золи в чистому вигляді ускладнюється через негативний вплив кальцій оксиду, який присутній у вільній формі в стані перепалу. Гідратація

частинок СаО призводить до розтріскування і руйнування затверділого матеріалу. Нейтралізувати негативний вплив СаО можливо різними способами: фізичними, хімічними, а також шляхом спільного його використання з цементом. Позитивний ефект в останньому випадку буде спостерігатися завдяки ефектам розведення і стримування деструктивних явищ міцним цементним каменем. Для оцінювання можливості використання золи в технологіях виробництва пористих матеріалів досліджено фізико-хімічні перетворення, що відбуваються в сировинних сумішах на основі золи при зміні їх рецептурно-технологічних параметрів.

Дослідження проведено з сировинними сумішами, основа яких складалася з раніше запропонованих нами рецептів, що містять кремнеземистий матеріал, глину, мінеральний наповнювач, луг і воду. Сполуки вводили окремо, потім проводили дослідження для виявлення можливостей заміщення їх золою в певній кількості. Для аналізу фізико-хімічних і енергообмінних процесів використовували диференційно-термічний аналіз (ДТА). Метою даних досліджень було визначення оптимального складу сировинної суміші та термічних режимів спучування для отримання прогнозованої структури з відповідними теплофізичними властивостями. При виконанні ДТА-аналізу сумішей на основі золи, портландцементу, кремнезему отримували відповідні графіки, які відображали певні термічні ефекти, що супроводжувалися зменшенням маси сировини (наприклад рис.1-2).

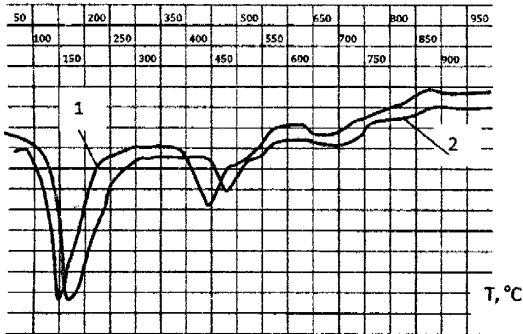


Рис.1. ДТА сировинної суміші з додаванням 70 мас. частин золи Буритинської ТЕС та 5 мас. частин портландцементу (графік 1); 20 мас. частин золи Буритинської ТЕС та 20 мас. частин портландцементу (графік 2)

Усі ендоефекти, як показує ДТА, пов'язані з втратою маси в досить широкому діапазоні температур. Значний ендоефект спостерігався за температур 50 – 250 °С з екстремумом від 115 °С до 123 °С і пов'язаний з видаленням адсорбованої води з гелеподібних продуктів гідратації, таких як кальцій гідросилікати типу CSH (I), а також кристалізаційної води з кальцій гідросульфаломітатами AFt - фази.

Чіткий ендотермічний ефект спостерігається в діапазоні тем-

ператур 370 – 420 °С і характеризує процес дегідратації кальцій гідроксиду за схемою $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. Незначні ендоефекти при 652 та 780 °С пов'язані з процесами розкладання кальцій гідросилікату (CSH (II)), а також декарбонізацією кальциту. В області температур, близьких до 930 °С, невеликий екзоефект спричинений кристалізацією тоберморітоподібного гелю (C-S-H) в волластоніт ($\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$). На рис. 1 показаний графік 2 ДТА суміші з порівняно меншим вмістом золи. Виходячи з аналізу ендотермічних процесів, що відбуваються при спученні,

ми очікували на деякі відмінності від діаграми 1. Дійсно, як впливає з рис. 1 (графік 2), при зменшеному кількісному співвідношенні сполук складових компонентів у суміші, завдяки частці золи, якісно процеси спучення не змінюються, проте енергетичні характеристики стають суттєво іншими. Всі ендоефекти збільшуються і незначно розтягуються в сторону високих температур, що відбувається завдяки процесам найбільш повної гідратації клінкерних мінералів цементу, накопиченням великої кількості новоутворень і збільшенням ступеня їх закристалізованості. Загальна диференціальна втрата маси зразка в інтервалі температур 25 – 1000 °С склала 23 %. Отже, чи можна замінити в базовій сировинній суміші кремнеземистий матеріал золою Бурштинської ТЕС? Для аналізу цього припущення було виконано дослідження з золою (рис. 2). Хімічні сполуки, які містить зола в достатній кількості, сприятимуть реалізації основних реакцій газовиділення, що показані вище.

На графіках ДТА золи, суміші золи (80 мас.ч.) та портланд-цементу (20 мас.ч.) є два чітко виражені ендотермічні ефекти. Температурний діапазон 112 та 416 °С. Перший ефект можна віднести як до процесів видалення адсорбційної води з кальцій гідросилікатів, так і до початку стадії зневоднення кальцій гідросульфоалюмінатів. Другий ендотермічний ефект пов'язаний з дегідратацією кальцій оксиду (CaO, вапна), що утворився внаслідок гасіння вільного CaO золи. Невеликий ендотермічний ефект за температури 680 °С спостерігається при розкладанні кальцій гідросилікату CSH (II), а ендоефект при 730 °С зумовлений дисоціацією невеликих кількостей CaCO₃ (кальцій карбонату).

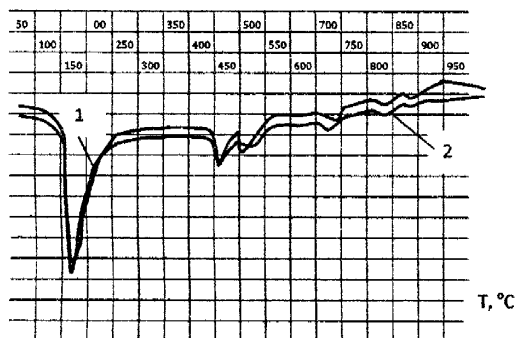


Рис.2. ДТА золи Бурштинської ТЕС після утворення Na₂SO₄ через 2 доби (графік 1); ДТА золи з золовідвалу Бурштинської ТЕС з додаванням Na₂SO₄ (графік 2)

турними інтервалами своїх максимумів вони відрізняються від попередніх. Цементно-золяні композиції завдяки утворенню Na₂SO₄ мають підвищений ступінь карбонізації продуктів гідратації, порівняно з аналогічним бездобавковим складом. Після утворення Na₂SO₄ через 2 доби (рис. 2) на дериватограмі фіксується шість чітких ендотермічних ефектів при 112, 420, 460, 700, 812 і 850 °С.

На рисунку 2 показані криві ДТА золи без додавання Na₂SO₄, який утворюється через 2 доби зберігання золи (графік 1) та з додаванням Na₂SO₄ в золу-винос. Графіки майже не мають відмінностей, що свідчить про те, що можна використовувати складові компоненти золи для формування необхідних параметрів сировинної суміші перед спучуванням за певним технологічним процесом. На графіках наявні всі перелічені вище ендотермічні ефекти. Однак за величиною і темпера-

У другому розділі дисертаційної роботи виконано досліді з заміщення відносно дорогих компонентів у запропонованих нами раніше сировинних сумішах золою Бурштинської ТЕС та пошук раціональної рецептури суміші. Критерієм такої раціональності обрана пористість і середній розмір пор матеріалу, оскільки, як було доведено в першому розділі, саме ці показники характеризують структуру ПТМ і визначають їх теплофізичні характеристики. Отже, подальші дослідження передбачають визначення складу сировинної суміші пористого теплоізоляційного матеріалу і способу його отримання, в якому за допомогою поєднання певних компонентів сировинної суміші, операцій та режимів спучування можна виготовити теплоізоляційний матеріал з підвищеною пористістю; розробити технологію, що дозволяє керувати процесом пороутворення; контролювати його і прогнозувати теплофізичні властивості отриманого матеріалу.

Склад сировинної суміші на основі золи Бурштинської ТЕС у досліджуваних діапазонах масових часток представлено в таблиці 1. Першу серію дослідів (рис. 3 - 4) виконано із зразками сировинних сумішей, для яких побудовано графіки ДТА (рис.1, 2) та іншими, що наведені у дисертаційній роботі.

Таблиця 1

Склад сировинної суміші

Показники	мас. ч.
Зола Бурштинської ТЕС	100
Мінеральний наповнювач	до 20
Глина	до 10
Натрій гідроксид (NaOH)	до 5
Натрій карбонат (Na ₂ CO ₃)	до 5
Вода	60
Натрій сульфат (Na ₂ SO ₄)	до 5
Портландцемент	до 10

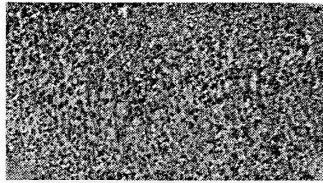
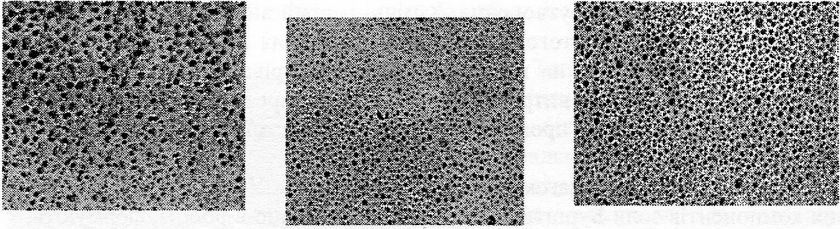


Рис. 3. Структура матеріалу на основі суміші рис. 1 (графік 1) після спучування

Спучення відбувалося за температурних умов першого ендоефекту. Пористість готового матеріалу відрізнялася не суттєво, як і графічне відображення функції розподілу пор за розмірами. Для отримання залежності структурних параметрів від рецептури суміші та температури спучення проведено серію експериментів, а результати досліджень оброблено за допомогою теорії математичного планування. Для визначення оптимального складу сировинної суміші та термічних режимів спучування виконані експериментальні дослідження за методикою планованого експерименту з ядром 2ⁿ. За керуючі фактори для дослідження пористості і середнього розміру пор прийняті фактори, що наведені в таблиці 2: масова частка золи Бурштинської ТЕС (кодовані значення X₁), масова частка глини (кодовані значення X₂), масова частка натрій карбонату Na₂CO₃ (код X₃), масова частка води (код X₄), температура спучування (код X₅), масова частка натрій гідроксиду (NaOH) (код X₆), масова частка натрій сульфату (Na₂SO₄) (код X₇), масова частка портландцементу (код X₈).



а) б) в)

Рис. 4. Структура матеріалу після стучування суміші:

а) рис. 1 (графік 2); б) рис. 2 (графік 1); в) рис. 2 (графік 2)

Для оцінювання значимості факторів використано t-критерій для плану Плакетта-Бермана. Значимі фактори визначали порівнянням табличного значення t-критерію, помноженого на дисперсію оцінок факторів. Це фактори: X_1 , X_2 , X_4 , X_5 , X_7 із попередньої серії дослідів (табл. 3).

Таблиця 2

Рівень	Значення фактора							
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Верхній	90	50	3	60	400	50	5	80
Нижній	10	5	0	20	100	5	0	10

Таблиця 3

№	Фактор	Новий код	Значення			Інтервал варіювання Δ
			-1	0	+1	
1	Вміст золи Бурштинської ТЕС, мас. частка	X_1	10	50	90	40
2	Вміст глини, мас. частка	X_2	10	30	50	20
3	Вміст води, мас. частка	X_3	20	40	60	20
4	Температура обробки, °C	X_4	100	250	400	150
5	Вміст Na_2SO_4 , мас. частка	X_5	0	2,5	5	2,5

Виключивши з моделей фактори та їх взаємодії, у яких величина коефіцієнтів за модулем менше від встановлених «порогів» значимості, для рівня значимості $\alpha = 0,05$, отримуємо такі залежності:

$$P = 437 + 73X_1 + 37X_2 + 139X_3 + 69X_4 + 39X_1X_3, \quad (1)$$

$$d_{cp} = 5,48 + 1,08X_1 + 0,96X_2 + 2,52X_3 + 0,27X_4 + 0,64X_2X_3. \quad (2)$$

З отриманих даних випливає, що найбільш вагомий вплив на пористість матеріалу та середній діаметр пор мають вода (X_3) і зола (X_1). Цей результат підтверджують дані ДТА і наше уявлення про реалізацію фізико-хімічних процесів, що відбуваються в сировинній суміші під час нагрівання та стучування. Водяна

пара є головним фактором пороутворення. Хімічні реакції виступають додатковим джерелом газовиділення. Крім того, внаслідок формування в результаті хімічних реакцій газових мікропухирців на первинних етапах нагрівання та перетворення складу сировини, практично не витрачається енергія на зародкоутворення парових пухирців (пор). Завдяки цьому процес формування пористої структури матеріалу прискорюється.

Наступним за впливом вагомим фактором є зола. У результаті взаємодії складових компонентів золи Бурштинської ТЕС, як показано в роботі, формуються необхідні реологічні властивості сировинної суміші, виникають центри пороутворення. Дуже важливою особливістю впливу золи є можливість керування зазначеними процесами. Із структури рівнянь (1), (2) випливає, що зі збільшенням вмісту золи в сировинній суміші пористість також збільшується. Глина (X_2) є додатковими газоутворювачем, але переважно вона визначає характеристики міцності та термостійкість матеріалу. Температура спучування (X_4) також є вагомим фактором, оскільки її рівень визначає інтенсивність проходження процесу спучування. Кількість парогазової суміші, що утворюється під час нагрівання, відповідає певним значенням пористості. І очевидно, що вона залежить від температури та інтенсивності нагрівання суміші.

Отримані результати дають якісну і кількісну оцінку впливу складових сировинної суміші з Бурштинською золою на структурні показники матеріалів. Як доведено нами раніше, саме структура матеріалу впливає на теплофізичні характеристики в певному кількісному вимірі. Запропоновані залежності визначають зазначений вплив, але для відпрацювання пропозицій практичного впровадження отриманих результатів необхідно додатково вивчити вплив досліджуваних факторів на властивості нових матеріалів. Ці питання висвітлено у третьому розділі дисертаційної роботи.

У третьому розділі оптимізовано склад суміші та режими термообробки. Оскільки ПТМ мають різне призначення, то відрізняються і вимоги до теплофізичних властивостей матеріалів. Головним технологічним чинником є температура спучування. Вона, звісно, не змінює характеру та не впливає на кінетику досліджуваних у попередньому розділі хімічних реакцій, проте термічний вплив визначає інтенсивність газовиділення. Тому структура матеріалу, а також і теплофізичні характеристики, будуть суттєво залежати від термічного режиму спучення. Інтенсивне пароутворення означає, що отримана структура буде порівняно рихлою (рис. 5). За значного газовиділення водяна пара та газ миттєво виходять із суміші. З підвищенням температури процеси кристалізації суміші прискорюються. Ми отримуємо матеріал з каналною пористістю, проте з низькою теплопровідністю (рис. 5 в, г). Його механічні властивості будуть найнижчими. Отже, слід обирати температурні режими виходячи з призначення ПТМ, а також враховуючи прогнозовану кінетику основних хімічних та теплофізичних процесів, що супроводжують нагрівання та спучення сировинної суміші. Отже, ми зможемо отримати матеріал з заданими теплофізичними властивостями. Тому в цьому розділі запропоновано результати досліджень впливу різних факторів на теплопровідність,

міцність та водопоглинання з метою оптимізації складу суміші й режимів спучування.

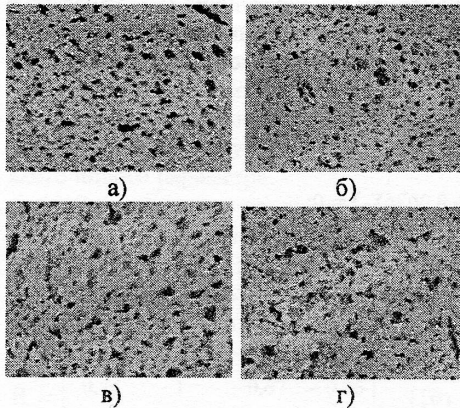


Рис. 5. Фотографії ПТМ, отримані за температур: а) першого ендомінімуму (400 °C); б) другого ендомінімуму (500 °C); в) третього ендомінімуму (700 °C); г) четвертого ендомінімуму (900 °C)

технологічних параметрів у промислових умовах. Обробку результатів експерименту та аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою модуля «Планування експерименту» статистичної програми Statgraphics 5.0 Plus.

Рівняння регресії для теплопровідності (Y_1) з урахуванням значущості коефіцієнтів набуло вигляду:

$$Y_1 = 0,978724 - 0,00966389 \cdot X_1 - 0,00824062 \cdot X_3 - 0,000705556 \cdot X_4 + 0,0000322917 \cdot X_1^2 + 0,0000664062 \cdot X_3^2. \quad (3)$$

Адекватність отриманої моделі досліджуваному процесу підтверджується високим значенням (близько 100 %) коефіцієнта детермінації $R_2 = 99,44$ %, а також малим значенням стандартної помилки оцінки $SE = 0,1598$.

За аналогічним алгоритмом досліджували міцність ПТМ на стискання (Y_2) та водопоглинання (Y_3).

Рівняння регресії з урахуванням значущості коефіцієнтів мають вигляд:

$$Y_2 = 7,91641 + 0,0415278 \cdot X_1 - 0,0693229 \cdot X_2 + 0,0771875 \cdot X_3 - 0,0174444 \cdot X_4 + 0,0075 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0,001 \cdot X_4 \cdot X_5, \quad (4)$$

$$Y_3 = 3,94297 + 0,016875 \cdot X_1 - 0,00907292 \cdot X_2 + 0,0874479 \cdot X_3 - 0,0331528 \cdot X_4 + 0,000141667 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,00180469 \cdot X_2^2 + 0,0000543056 \cdot X_2^4. \quad (5)$$

Вплив компонентів та технологічних факторів досліджено з використанням ДТА та чисельно визначено за допомогою запропонованих нами рівнянь. Для побудови наведених вище регресійних рівнянь були застосовані ортогональні композиційні плани другого порядку з ядром 2^{5-1} . Оскільки перевірка всіх регресійних залежностей за критерієм Фішера показала їх адекватність, то це

Теплопровідність ПТМ досліджувалася за допомогою приладу ИТ-λ-400 за стандартною методикою викладеною в інструкції з експлуатації приладу. Обробку експериментальних даних виконано із застосуванням методу планованого експерименту. Експеримент поставлено за програмою центрального композиційного ротатбельного плану другого порядку Бокса-Хантера. Ядро плану представлено напівреплікою 2^{5-1} ($1=X_1X_2X_3X_4X_5$). Вибрані фактори задовольняють вимоги керованості, взаємозалежності й однозначності, яким мають відповідати варіативні фактори при плануванні експерименту. Область зміни незалежних факторів відповідає передбаченому (обґрунтованому в розділі 2) діапазону змін

дозволило використовувати рівняння для знаходження оптимальних режимів процесу случування сировинної суміші. За функцію мети в першій задачі прийнято мінімальне значення теплопровідності за рівнянням (3), показники (2), (3) внесено в обмеження. У другій задачі за функцію мети прийнято максимальну міцність, при обмеженні водопоглинання (3). У результаті отримано такі оптимізаційні моделі процесу случення:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial X_1} = -0,0083 + 0,0006 \cdot X_1 + \lambda_1 0,042 + \lambda_2 0,017 + \\ \quad + 0,00014 \cdot X_1 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial X_2} = -\lambda_1 0,0693229 - \lambda_2 (0,0907 + 0,0036X_2) = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial X_3} = -0,0097 + 0,000134 \cdot X_3 + \lambda_1 0,0772 + \lambda_2 0,087 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial X_4} = -0,00071 - \lambda_1 0,0174 - \lambda_2 0,0033 + \\ \quad + \lambda_2 0,000108X_4 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial X_5} = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial X_6} = 0; \\ L = Y_1 + \lambda_1(Y_2 + X_5 - 0,15) + \lambda_2(Y_3 + X_6 - 8). \end{array} \right. \quad (6)$$

Чисельні значення обмежень прийнято після підсумовування середніх величин з інтервалами розсіювання даних.

У результаті розв'язку даної системи рівнянь отримано стаціонарну точку функції:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = 87 \text{ мас. частка}; \\ X_2 = 6 \text{ мас. частка}; \\ X_3 = 64 \text{ мас. частка}; \\ X_4 = 167 \text{ }^\circ\text{C}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Запропоновані методика і рішення дозволяють прогнозувати показники теплопровідності, міцності і водопоглинання, а за допомогою змінних X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 можна керувати процесом случування для досягнення оптимальних значень цих теплофізичних параметрів. Отримані результати дають підставу стверджувати, що оптимізувати параметр Y_1 можна не тільки підвищенням температури, але і підбором досліджуваних факторів. Для найбільш повного оцінення цього впливу виконано експериментальні дослідження в області оптимального параметра – стаціонарної точки функції Лагранжа.

З огляду на важливість температури для процесу пороутворення не тільки як технологічного чинника, але й економічного, запропоновано таку оптимізаційну модель для встановлення оптимального співвідношення X_3 та X_4 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min Y_{1\text{opt}} = 5,11 - 0,017 \cdot \frac{X_1}{X_2} - 0,065 X_3 - 0,035 X_4 - 0,00041 X_3^2 + \\ \quad + 0,000092 \cdot X_4^2 + 0,000075 \frac{X_1}{X_2} \cdot X_4; \\ -1,215 \ll X_3 \ll 1,25; \\ -1,215 \ll X_4 \ll 1,25. \end{array} \right. \quad (9)$$

Для виконання прогнозів теплофізичних параметрів ПТМ вивчали також взаємний вплив досліджуваних показників. Для цього на основі ортогонального центрального композиційного плану другого порядку з ядром 2^4 досліджували залежності коефіцієнта теплопровідності (λ), міцності (E), водопоглинання (Δ) від вмісту золи, глини, води та температури спучування.

Теплофізичні характеристики досліджено за однакових умов та однакових факторів. Тому, на основі отриманих рівнянь $\lambda, E, \Delta = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$, можна знайти функцію виду $\lambda = f(E, \Delta, X_1, T)$ для визначення теплопровідності або будь-якого іншого параметра.

Як впливає з даних залежностей, виразити показник λ через E, Δ складно. Тому застосовано регресійний підхід, тобто величину λ оцінювали в вигляді рівняння множинної регресії.

Отже на мультиколінеарність перевіряли за методом Фаррара - Глобера систему змінних E, Δ, X_1, T . Кореляційна матриця між цими змінними мала вигляд:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0,58 & -0,63 & -0,8 \\ 0,58 & 1 & -0,67 & -0,86 \\ -0,63 & -0,67 & 1 & 0,79 \\ -0,8 & -0,86 & 0,79 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для спрощення розрахунків і визначення оцінок впливу змінних, що не залежать від розмірності, побудовано модель залежності в стандартизованій формі

$$\lambda = 52,206 + \frac{112,6}{E} + \frac{167,25}{\Delta}. \quad (11)$$

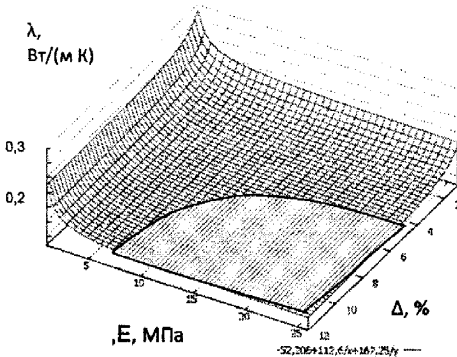


Рис. 6. Графік розрахункової залежності (в закресленій області функція не визначена)

На рис. 6 показано графік розрахункової залежності, який відображає досліджувані та встановлені нами закономірності впливу обраних факторів на цільову функцію.

Отриману модель з огляду на її адекватність можна використати для прогнозу значення коефіцієнта теплопровідності залежно від заданих значень міцності та водопоглинання. Причому, чим ближче до середніх значень цих змінних в експерименті, тим точніший прогноз.

У четвертому розділі вивчалися процеси перенесення тепла в пористому

просторі ПТМ на основі золи Бурштинської ТЕС. У попередніх розділах встановлено оптимальний склад сировинних сумішей для ПТМ, вміст складових компонентів та режими спучування. Однак ефективність опору теплопровідності матеріалів, як було зазначено в розділі 1, залежить ще і від розмірів пор та температурних умов, в яких матеріал виконує свою ізоляційну функцію. У наших попередніх дослідженнях доведено, що у мікропорах під час безпосереднього

контакту більшості молекул зі стінками пор здійснюється перекривання полів поверхневих сил у протилежних стінках. У мікропорах відбувається кнудсенівська дифузія молекул, тому і перенесення енергії уздовж поверхні пор буде найбільш інтенсивним, а газ рухається більшою мірою в пристінних областях. У великих порах енергія переноситься через весь об'єм пори. Отже, існує співвідношення розміру пори і рівня енергії, за якого теплопровідність стрімко зростає. Очевидно, що цей ефект може проявлятися не однаково і залежить від температур застосування ПТМ, його структурних та фізичних характеристик. Оскільки ПТМ на основі Бурштинської золи має розвинену мікропористу структуру, то основною складовою теплопереносу буде явище кнудсенівської дифузії. Отже виникає запитання, чи можна завдяки змінам у складі сировинної суміші підсилити ефект кнудсенівської дифузії в нашому матеріалі і для яких температур?

Традиційно процес передачі тепла поділяють на три складові: випромінювання, конвекція і теплопровідність. Питання про роль кожної з них у загальній теплопередачі дисперсних систем залишається найбільш складним.

З результатів наших розрахунків видно, що в повітряних порах діаметром менше ніж 3,0 мм, за наявності в них перепаду температур 20 °С, в діапазоні температур - 110 °С ... 1000 °С конвекції немає. Конвективні струмені з'являються за діаметра пори, що становить 3 мм і наявності перепаду температур 20 °С в діапазоні - 110 °С ... 105 °С. За подальшого зростання температури конвективні струмені зникають. Аналізуючи характер кривих залежності коефіцієнта конвекції

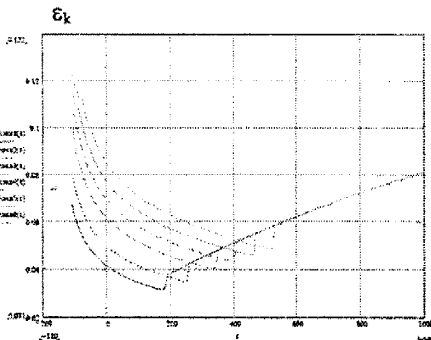


Рис. 7. Залежність еквівалентного коефіцієнта теплопровідності від температури газу в порі

ϵ_k від температури (рис. 7), можна зробити висновок про те, що з наближенням до температури, за якої конвективний плин припиняється, відбувається невелике зростання коефіцієнта конвекції (крива має деякий «стрибок») від мінімально можливої величини (за певного температурного перепаду в порі) до $\epsilon_k = 1$. З підвищенням температури інтенсивність теплопередачі шляхом конвекції знижується, що можна пояснити взаємним впливом потоків повітря в порі.

Теплопередача в порі – складний комплексний процес. Розглядаючи частку конвективної складової передачі тепла в загальній теплопередачі в порах дисперсного матеріалу, можна зробити висновок, що конвекція переважає над променистим теплопереносом в області температур $T = +25$ °С та помірних температур близько 100 °С і нижче. Слід зауважити, що елементарні види теплообміну не відокремлені і в чистому вигляді їх не буває. Як правило, на практиці одночасно відбуваються всі види теплообміну, тому кількісна оцінка внеску кожного з них у загальну теплопередачу ускладнена.

Кінематична в'язкість повітря в межах температур від +330 °С до -110 °С зменшується в 13,2 раза ($\nu_{-110} = 3,938 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\nu_{+330} = 5,2223 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$). Повітря стає більш текучим. У результаті його конвекція всередині пористого матеріалу зростає. Тому для теплової ізоляції споруд і устаткування, що експлуатується за від'ємної температури, ефективними будуть матеріали з дрібною замкнутою комірчастою структурою. В умовах невисоких додатних температур повітря розширюється і у разі відкритої пористості частково витісняється з матеріалу. Тому для огорожувальних конструкцій, що експлуатуються в умовах невисоких додатних температур, доцільно застосовувати матеріали з рівномірно розподіленою відкритою пористістю.

Значний інтерес становить початковий етап розвитку конвекції при нестационарних процесах тепло- і масоперенесення, в зв'язку з тим, що більшість технічних та технологічних процесів реалізуються в істотно нестационарних умовах.

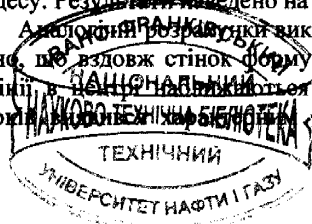
Симуляцію процесу перенесення тепла конвекцією виконували з використанням пакета прикладних програм (ППП) Flow Vision, що відповідає основним вимогам необхідним для ефективного використання комп'ютерного моделювання течії газу в порах дисперсного матеріалу. Цей програмний пакет заснований на можливості проведення обчислювального експерименту та призначений для розрахунку гідро- і газодинамічних завдань (разом з пов'язаними процесами тепло- і масоперенесення) в широкому діапазоні чисел Рейнольдса. Це дозволяє в умовах, наближених до лабораторного експерименту, вивчити явище природної конвекції в газонаповненому просторі і зіставити з відповідними теоретичними положеннями.

Базовими в ППП Flow Vision є рівняння Нав'є-Стокса (разом з рівнянням нерозривності). У цій роботі використано модель наближення Буссінеска (малі зміни густини) для опису ламінарної течії в'язкої рідини при малих числах Рейнольдса. Для чисельного розв'язку базових рівнянь у Flow Vision застосовувано метод, заснований на консервативних схемах розрахунку нестационарних рівнянь у похідних, які порівняно з неконсервативними схемами дають розв'язки, що точно відповідають законам збереження (зокрема, рівняння нерозривності).

У роботі розглянуто задачу моделювання течії в кубічній замкнутій повітряній порожнині, в якій дві сторони мають різні температури (одна холодна, інша гаряча), а дві інші – теплоізовані.

Під впливом виштовхувальної сили, що зумовлена різницею температур, виникає двовимірний конвективний рух. Для цієї задачі створено геометричний образ області (кубічної порожнини) в САПР, яку надалі імпортовано через формат STL у Flow Vision. Як змінні величини вибирали розміри замкнутого осередку та температури поверхні і газу. Проведені розрахунки дають можливість візуалізації процесу. Результати наведено на рис. 8.

Аналіз розрахунку виконано для різних температурних умов. На рисунку видно, що вздовж стінок формуються шари з відносно високою швидкістю течії. Ізолінії температури наближаються до горизонтального положення. Такий розподіл поточних швидкостей характерний для всіх розрахункових випадків. Очевидно, що

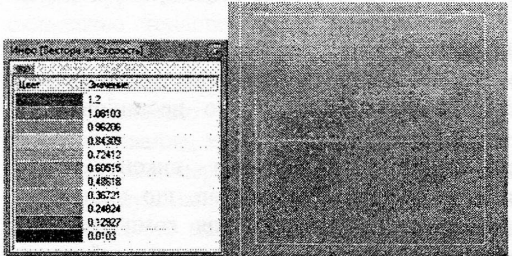


перенесення енергії в граничному шарі може бути вагомим, принаймні традиційні рівняння математичної фізики відображають цю особливість.

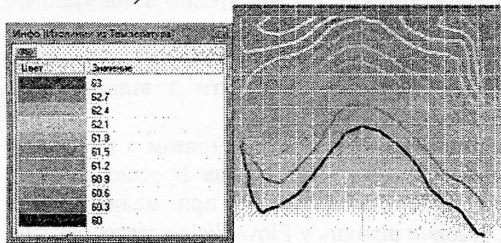
На графіках можна визначити товщину нагрітого рухомого приграничного шару. Очевидно, що вона буде тим менша, чим менші розміри пори і температура поверхні. Виходячи з наведених у першому розділі міркувань, можна припустити, що конвекція у поверхні буде наявна навіть у мікроканалах. Ми розглянули випадки, коли конвективний теплообмін, що виникає в порах матеріалу, переважає над елементарними складовими теплообміну в пористих матеріалах.

Теоретичний аналіз конвективного теплопереносу в мікропорах є актуальним завданням, яке зводиться до розроблення методики кількісної оцінки конвективного теплоперенесення в мікропорах гетерогенних систем.

У приграничному шарі або в мікропорі при конвективному теплообміні також можна виділити дві складові: чисту конвекцію, тобто перенесення тепла тільки внаслідок перенесення маси, і теплопровідність – молекулярне перенесення тепла. У разі, якщо розмір пори малий і кнудсенівська дифузія має суттєвий вплив на енергообмін у порожнині, конвекцію можна сприймати як рух молекул уздовж поверхні. У наших розрахунках ми бачимо зростання температури газу біля поверхні, що може бути ілюстрацією



а) розподіл швидкостей (вектори швидкостей)



б) розподіл температур (ізолінії температур)

Рис. 8. Результати розрахунку конвективних течій, температура поверхні $T = 65^\circ\text{C}$, діаметр пори – 3 мм

нашого уявлення про даний процес. Під час конвективного теплообміну між температурним і швидкісним полем існує тісний взаємозв'язок. З одного боку, поле температури залежить від швидкісного поля і його змін. З іншого боку, зі зміною температури змінюється в'язкість, а також інші фізичні властивості середовища, що викликає зміни швидкісного поля.

Біля поверхні пори внаслідок дії сил в'язкості формується приграничний шар. В середині пори, за межами приграничного шару, існує потенційний потік, вільний від гальмівної дії сил в'язкості (ядро потоку).

Отже, відбувається поділ потоку на дві області: приграничний шар, в якому зосереджено дію сил в'язкості, і ядро потоку, в якому дія сил в'язкості дуже мала. Сили, що діють у нормальному напрямку до внутрішньої поверхні пори, значно

слабші за сили, які діють у дотичному напрямку.

Формування приграничного шару не викликає змін поздовжньої складової швидкості потенційного потоку і приводить до утворення в ньому поперечної течії. Поперечна складова швидкості незначно впливає на потенційні струмені в порі, через приграничний шар, нерозривність потоку і поступове зменшення поздовжньої складової швидкості вздовж течії. Тому дія поперечної складової швидкості проявляється як зворотний вплив приграничного шару на потенційний потік.

Для оцінювання інтенсивності приграничного переносу тепла в порах матеріалу розроблено математичну модель, що пов'язує температуру поверхні зі швидкістю конвективної течії.

Стан в'язкого середовища за ньютонівським законом тертя без спрощувальних припущень описується рівняннями Нав'є-Стокса. Розв'язок цих рівнянь дає можливість вивчати складні гідродинамічні течії в замкнених областях з плинном при малих числах Рейнольдса, де немає явно виражених приграничних шарів.

У літературі відома дуже обмежена кількість випадків, які допускають аналітичне інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса.

Для опису процесів у порах дисперсного матеріалу використано такі диференціальні рівняння:

- рівняння руху (закон збереження імпульсу);
- рівняння нерозривності (закон збереження маси);
- рівняння переносу тепла (закон збереження енергії);
- рівняння стану, яке пов'язує тиск, густину і температуру.

Математична модель гравітаційної конвекції включає рівняння Нав'є-Стокса:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{V} + \frac{1}{3} \eta \nabla (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \rho \mathbf{g}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (13)$$

$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T, \quad (14)$$

$$\rho = \rho(T), \quad (15)$$

де \mathbf{V} – вектор швидкості, p – тиск, T – абсолютна температура газу, ρ – густина, η – динамічна в'язкість, λ – теплопровідність, t – час, \mathbf{g} – прискорення вільного падіння.

Приймаємо коефіцієнти η , λ , $c = \text{const}$ (тому що наявні в середовищі різниці температур досить малі).

Для спрощення використовуємо наближення Бусінеска-Обербека.

Нехай T_0 – деяке значення з інтервалу зміни температури в середовищі, за якого густина має величину ρ_0 . Припустимо, що температура T в середовищі незначно відхиляється від T_0 . Тоді рівняння стану можна лінеаризувати, залишаючи

лише член 1-го порядку малості в розкладанні функції $\rho(T)$ в ряд Тейлора в області значення T_0 : $\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$, де $\beta = -\frac{1}{\rho_0} \partial \rho(T_0) / \partial T$ - коефіцієнт теплового розширення газу при $T = T_0$. Залежність густини від температури враховується лише в члені з об'ємною силою тяжіння ρg , а в решті випадків вважають $\rho = \rho_0$. Наближений розв'язок граничної задачі матиме вигляд:

$$T(r, \theta) \approx R \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{V}{a} (R - r) \right] \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^n P_n(\cos \theta)}{\lambda \cdot \left(\frac{1}{2} \frac{V}{a} R + n \right) + \alpha \cdot R} \quad (16)$$

Розв'язок рівняння (16) показано на графіку рисунка 9.

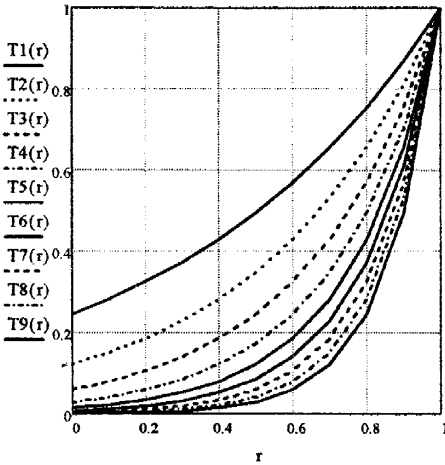


Рис. 9. Розв'язок рівняння (4.37) $T(r) = f(r)$ при V : $T1(r) - 0.4$; $T2(r) - 0.5$; $T3(r) - 0.6$; $T4(r) = 0.7$; $T5(r) - 0.8$; $T6(r) - 0.85$; $T7(r) - 0.9$; $T8(r) - 0.95$; $T9(r) - 1$

З рис. 9 випливає, що до 20 % приграничного шару бере участь у перенесенні енергії в мікропорах. Отже, навіть при невиконанні умови $Gr \cdot Pr > 1000$ конвективний перенос енергії відбувається і в мікропорах. Розв'язок рівнянь для нестационарного режиму можна представити як

$$T(r, \theta, 0) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{mn} \times e^{\frac{\partial_r}{2a} J_{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu_m r}{R} \right)} \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot P_n(\cos \theta), \quad (17)$$

$$C_{mn} = f_{mn},$$

$$f_{mn} = \frac{2n+1}{2} \int_0^{\pi} P_n(\cos \theta_0) \sin \theta_0 d\theta_0 \int_0^R \frac{1}{\left| \frac{\partial_r}{2a} J_{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu_m r}{R} \right) \right|^2} \times f(\rho, \theta_0) e^{-\frac{\partial_r}{2a} \rho J_{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu_m r}{R} \right)} \rho^3 d\rho. \quad (18)$$

Оскільки функція $e^{\frac{\partial r}{2a} r} \frac{J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m r}{R}\right)}{r}$ є ортогональною з вагою $\left|e^{-\frac{\partial r}{2a} r} r^2\right|$ на відрізку $[0; R]$, μ_m – корені трансцендентного рівняння

$$\mu J'_{n+\frac{1}{2}}(\mu) + \left[R\left(\frac{V_r}{2a} + \alpha\right) - \frac{1}{2}\right] J_{n+\frac{1}{2}}(\mu) = 0. \quad (19)$$

Розв'язок рівняння представлено на рис. 10, 11. Для спрощення завдання граничних умов передбачається, що перетин пори розділений температурним полем на два півкола, поверхня одного з них має вищу температуру.

На рис.10, 11 показані графіки розподілу температури повітря в порі. З наведених розрахункових даних випливає, що в початковий момент часу температурне поле відповідає заданим граничним і початковим умовам.

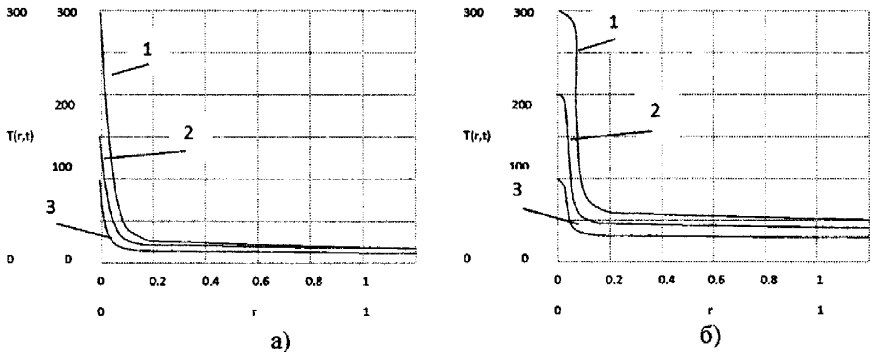


Рис. 10. Розподіл температури повітря в порі (радіус безрозмірний) у момент часу: а) $t = 0$ с: 1 – $T_0 = 300$ °С; 2 – $T_0 = 200$ °С; 3 – $T_0 = 100$ °С; б) $t = 2$ с

Утворення конвективного струму проявляється в наступні моменти часу. Як видно на графіках, у пристінній області виникає конвективний рух повітря. Такий фізичний процес обґрунтований в першому розділі і закладений в ідеологію математичної моделі. Товщину цього приграничного шару встановити точно досить складно і теоретично, й експериментально. Можна припустити, що такий перебіг буде відчутним в основному біля вертикальних стін. Однак перенесення енергії може відбуватися і в разі малих пор, для яких не виконується співвідношення $Gr \ll Pr$. Цим можна пояснити неузгодженість розрахункових і практичних даних температур матеріалу теплоізоляції. Тому до теперішнього часу проектування і виготовлення теплоізоляційних конструкцій засноване виключно на емпіричній інформації, яка рідко повторювалася навіть за однакових умов.

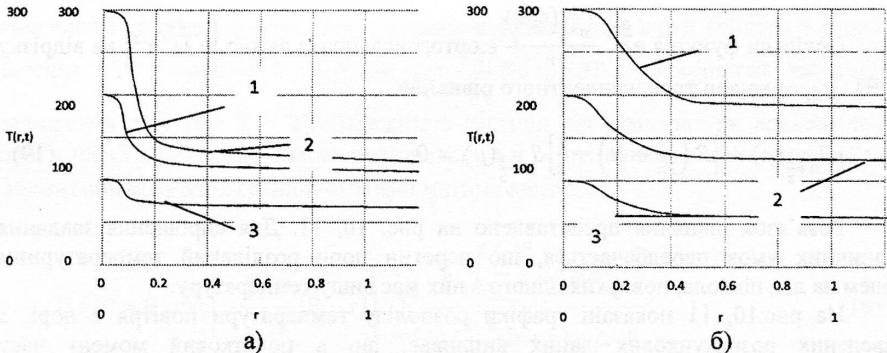


Рис. 11. Розподіл температури повітря в порі (радіус безрозмірний) у момент часу: а) $t = 4$ с: 1 – $T_0 = 300^\circ\text{C}$; 2 – $T_0 = 200^\circ\text{C}$; 3 – $T_0 = 100^\circ\text{C}$; б) $t = 6$ с

Отже, запропоновану методику можна використовувати для розрахунків теплопровідності мікропор.

У п'ятому розділі вивчали найбільш поширений механізм перенесення теплової енергії в мікропорах шляхом конвекції, теплопровідності і випромінювання. У різних термічних і геометричних умовах у процесі перенесення енергії будуть домінувати ті чи інші способи теплопередачі. В узагальненій постановці задачі враховували всі види теплопереносу, а мета моделювання полягала в отриманні кінцевої функції, за допомогою якої можна визначити вид теплопереносу для конкретних умов, а, отже, і прогнозувати необхідні структурні (теплофізичні) характеристики матеріалу на стадії його проектування і виробництва.

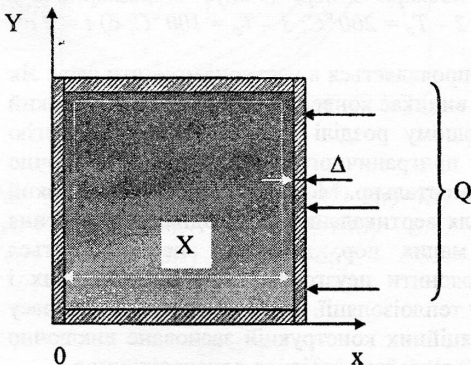


Рис. 12. Розрахункова схема

порожнину в напрямку $X \rightarrow 0$ з втратою енергії. Температура правої стінки вища від температур інших стінок. Товщина стінок каркаса – Δ . Таку задачу можна представити рівнянням теплової конвекції в наближенні Бусінеска - Обербека, рівняннями Нав'є - Стокса, теплопровідності і нестисливості.

Для умов попередньої задачі спільний процес теплопередачі представлений схемою на рис. 12. Моделюється процес теплоперенесення конвекцією, теплопровідністю і випромінюванням у газовій порожнині з урахуванням теплопровідності стінок. Передбачається, що виділена область є фрагментом пористої структури матеріалу. Причому, як показано на схемі, тепло сприймається правою зовнішньою стінкою (каркасом матеріалу) і передається через стінку та газу

У даній моделі передбачається, що густина газу залежить від температури. Така залежність враховується в рівнянні конвекції для масових сил. Систему рівнянь можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \vartheta \Delta \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla P + g T \beta, \quad (20)$$

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0, \quad (21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{V} \nabla T = a \Delta T - \operatorname{div} \vec{q}, \quad (22)$$

$$\operatorname{div} \vec{q} = \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (23)$$

де T – температура, a – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, \vec{V} – швидкість потоку, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, P – тиск, g – прискорення вільного падіння; β – коефіцієнт об'ємного розширення, ρ – густина.

Рівняння теплопровідності стінки

$$\frac{\partial T_M}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_M}{\partial z^2} \right), \quad (24)$$

$$q_x = -\frac{4\epsilon\sigma T^3}{3} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (25)$$

$$q_y = -\frac{4\epsilon\sigma T^3}{3} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (26)$$

$$q_z = -\frac{4\epsilon\sigma T^3}{3} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (27)$$

де σ – стала Стефана - Больцмана; ϵ – приведений ступінь чорноти.

Розв'язки рівнянь знайдемо у вигляді керуючих функцій, які характеризують конвективний перенос енергії в виділеному об'ємі і біля поверхні, з урахуванням розмірів та температури осередку для спільного теплопереносу.

Область зміни змінних у газовому осередку визначається співвідношеннями:

$$\Delta \leq x \leq X + \Delta; \quad \Delta \leq y \leq X + \Delta. \quad (28)$$

Для теплопровідності в стінці область визначення:

$$0 \leq x \leq \Delta; \quad 0 \leq y \leq \Delta. \quad (29)$$

У результаті розв'язку рівнянь необхідно визначити проєкції вектора швидкості, тиск і температуру в перетині газової порожнини, які будуть змінюватися в напрямку координатних осей і в часі. Інші параметри вважають заданими.

Безрозмірні рівняння Бусінеска в змінних «вихор швидкості - функції струму - температура» для даної задачі в газовій порожнині:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} - \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \Delta \Omega = \frac{\partial \theta r}{\partial X} + \frac{\partial \Psi}{\partial X} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial Y} - \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial X}, \quad (30)$$

де Ra – число Рейля; Pr – число Прандтля, $\Omega = -\Delta \Psi$.

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial \tau} - \frac{1}{\sqrt{Pr \cdot Ra}} \Delta \theta_r = \frac{\partial \Psi}{\partial X} \cdot \frac{\partial \theta_r}{\partial Y} - \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \cdot \frac{\partial \theta_r}{\partial X} + \frac{16}{3} \cdot \frac{Sk}{\tau_k} \cdot \frac{1}{\sqrt{Pr \cdot Ra}} \cdot \left\{ 3 \left(\theta_r + \frac{T_0}{T_{ut-T_0}} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial \theta_r}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta_r}{\partial Y} \right)^2 \right] + \left(\theta_r + \frac{T_0}{T_{ut-T_0}} \right)^3 \Delta \theta_r \right\}. \quad (31)$$

$$\text{В елементах твердої стінки } \frac{\partial \theta_{ст}}{\partial F_{ост}} = \Delta \theta_{ст}, \quad (32)$$

$Fo_{ст}$ – число Фур'є.

Початкові умови:

$$\Psi(X, Y, 0) = \Omega(X, Y, 0) = 0; \quad (33)$$

$$\theta(X, Y, 0) = 0; \quad (34)$$

$$\theta(X, Y, 0) = 1 \text{ при } \frac{\Delta + X < x < 2\Delta + X}{X}; \quad \frac{\Delta + X < y < 2\Delta + X}{X}. \quad (35)$$

Граничні умови:

на зовнішніх границях

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = Bi \theta_{ст} - Bi \theta_B + \frac{\varepsilon \sigma X (T_n - T_B)^3}{\lambda_B} \left\{ \left(\theta_{ст} + \frac{T_B}{T_n - T_B} \right)^4 - \left(\frac{T_B}{T_n - T_B} \right)^4 \right\} \quad (36)$$

$$\text{для області } x = 0; \quad \Delta < y < \frac{\Delta}{X} + 1, \quad \tau(0, 1); \quad (37)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0; \quad (38)$$

$$\text{для області } x = 2\Delta/X + 1; \quad 0 < y < \frac{\Delta}{X} + 1, \quad \tau(0, 1);$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0; \quad (39)$$

$$\text{для області } y = 0; \quad 0 < x < \frac{\Delta}{X} + 1, \quad \tau(0, 1).$$

На внутрішніх границях:

$$\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0; \quad \theta_{ст} = \theta_B; \quad \frac{\partial \theta_{ст}}{\partial x} = \bar{\lambda} \frac{\partial \theta_B}{\partial x} \quad (40)$$

$$\text{для області: } x = \Delta/X; \quad \Delta/X \leq y \leq 1 + \Delta/X; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{конв}/\tau_c;$$

$$x = \Delta/X + 1; \quad \Delta/X \leq y \leq 1 + \Delta/X; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{конв}/\tau_c;$$

$$\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial y} = 0; \quad \theta_{ст} = \theta_B; \quad \frac{\partial \theta_{ст}}{\partial y} = \bar{\lambda} \frac{\partial \theta_B}{\partial y}; \quad (41)$$

$$\text{для області: } y = \Delta/X; \quad \Delta/X \leq x \leq 1 + \Delta/X; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{конв}/\tau_c;$$

$$x = \Delta/X + 1; \quad \Delta/X \leq x \leq 1 + \Delta/X; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{конв}/\tau_c;$$

$$\theta = 1; \quad (42)$$

$$\text{для області } x = \Delta/X; \quad \Delta/X \leq y \leq 1 + \Delta/X; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{конв}/\tau_c;$$

$$\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial y} = 0, \quad \theta = 1; \quad (43)$$

$$\text{для області } y = \Delta/X; \quad \Delta/X \leq x \leq 1 + \Delta/X; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{конв}/\tau_c;$$

$$\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0, \quad \theta = 1. \quad (44)$$

Граничні умови задані для функції струму і формально не задані для вихору на границі області. Розв'язок граничної задачі матиме вигляд:

$$\Psi(x, y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_{nm}(\tau) \sin m\pi(x - \frac{\Delta}{X}) \cdot \sin \frac{Xn\pi}{2\Delta+X}; \quad (45)$$

$$\Psi_{nm}(\tau) = \frac{-4X}{2\Delta+X} \int_0^{\tau} e^{-[m^2 + \frac{X^2 n^2}{(2\Delta+X)^2}]^2 (\tau - \tau_0)} \cdot \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \frac{F_{nm}^{(1)}(\tau_0)}{[m^2 + \frac{X^2 n^2}{(2\Delta+X)^2}]^2} d\tau_0. \quad (46)$$

Функція Гріна $\gamma(x, y; \bar{x}, \bar{y}, \tau - \tau_0)$ для відповідних граничних задач має вигляд

$$\gamma^{CT1}(x; \bar{x}, \bar{x}, \tau - \tau_0) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1e^{-\gamma_{nm}^2(\tau - \tau_0)}}{\|V_{nm}^{CT1}(x, y)\|^2} \cdot V_{nm}^{CT1}(x) V_{nm}^{CT1}(\bar{x}) \cos \frac{Xn\pi y}{2\Delta+H} \cdot \cos \frac{Ln\pi Y}{2h_1+H}; \quad (47)$$

$$\gamma^{CT2}(x; \bar{x}, \bar{x}, \tau - \tau_0) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1e^{-\gamma_{nm}^2(\tau - \tau_0)}}{\|V_{nm}^{CT2}(x, y)\|^2} \cdot V_{nm}^{CT2}(x) V_{nm}^{CT2}(\bar{x}) \cos \frac{Xn\pi y}{2\Delta+H} \cdot \cos \frac{Xn\pi Y}{2\Delta+H}; \quad (48)$$

$$\gamma^{\Gamma}(x; \bar{x}, \bar{x}, \tau - \tau_0) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1e^{-\gamma_{nm}^2(\tau - \tau_0)}}{\|V_{nm}^{\Gamma}(x, y)\|^2} \cdot V_{nm}^{\Gamma}(x) V_{nm}^{\Gamma}(\bar{x}) \cos \cos \frac{Xn\pi y}{2\Delta+H} \cdot \cos \frac{Xn\pi Y}{2\Delta+H} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} & \gamma^{\Psi}(x; \bar{x}, \bar{x}, \tau - \tau_0) = \\ & = -\frac{4X}{2\Delta+X} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\sqrt{\frac{Pr}{Ra}}^2 [m^2 + \frac{L^2 n^2}{(2h_1+H)^2}] (\tau - \tau_0)} \cdot \frac{\sin m\pi(x - \frac{L}{L})}{\pi^2 [m^2 + \frac{X^2 n^2}{(2\Delta+X)^2}]} \sin m\pi(\bar{x} - \frac{\Delta}{X}) \cdot \\ & \cdot \sin \frac{Xn\pi y}{2\Delta+H} \cdot \sin \frac{Xn\pi Y}{2\Delta+H}. \end{aligned} \quad (50)$$

При розрахунку функції Гріна рішення можна записати

$$\Theta_{CT1}(x, y, \tau) \int_0^{\tau} d\tau_0 \int_0^{\Delta/X+1} d\bar{x} \int_0^{\frac{2\Delta+X}{X}} d\bar{y} \gamma^{CT1}(x, y; \bar{x}, \bar{y}, \tau - \tau_0) \cdot F_3(\bar{x}, \bar{y}, \tau_0) d\bar{y}, \quad (51)$$

$$\Theta_{\Gamma}(x, y, \tau) \int_0^{\tau} d\tau_0 \int_0^{\Delta/X+1} d\bar{x} \int_0^{\frac{2\Delta+X}{X}} d\bar{y} \gamma^{\Gamma}(x, y; \bar{x}, \bar{y}, \tau - \tau_0) \cdot F_2(\bar{x}, \bar{y}, \tau_0) d\bar{y}, \quad (52)$$

$$\Theta_{CT2}(x, y, \tau) \int_0^{\tau} d\tau_0 \int_0^{\Delta/X+1} d\bar{x} \int_0^{\frac{2\Delta+X}{X}} d\bar{y} \gamma^{CT2}(x, y; \bar{x}, \bar{y}, \tau - \tau_0) \cdot F_3^*(\bar{x}, \bar{y}, \tau_0) d\bar{y}, \quad (53)$$

$$\Psi(x, y, \tau) = \int_0^{\tau} d\tau_0 \int_{\Delta/X}^{\Delta/X+1} dx \int_0^{\frac{2\Delta+X}{X}} d\bar{y} \gamma^{\Psi}(x, y; \bar{x}, \bar{y}, \tau - \tau_0) \cdot F_1(\bar{x}, \bar{y}, \tau_0) d\bar{y}. \quad (54)$$

При використанні початкової умови

$$\Theta(x, y, 0) = 1, \quad (55)$$

$$\text{та умов } \frac{\Delta}{X} \leq X \leq \frac{\Delta+X}{X} \quad \text{і} \quad \frac{\Delta}{X} \leq Y \leq \frac{\Delta+X}{X};$$

$$\begin{aligned} \Theta_{\Gamma}^H(x, y, \tau) = & \frac{2\Delta+X}{X} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1e^{-\gamma_{nm}^2(\tau - \tau_0)}}{\|V_{nm}^{\Gamma}(x, y)\|^2} \cdot \frac{1}{\omega_{nm} \sin \omega_{nm}} \cdot \left\{ A_{nm} \left[\cos \omega_{nm} \left(1 - \frac{\Delta}{X}\right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \cos \omega_{nm} \right] - B_{nm} \left[\cos \omega_{nm} \frac{\Delta}{X} - 1 \right] \right\} X_{nm}^{\Gamma}(x) \cdot \left[\sin \frac{n\pi(\Delta + X)}{2\Delta+X} \right] \cos \frac{Xn\pi X}{2\Delta+X}. \end{aligned} \quad (56)$$

$$\text{При } X = \Delta/X \quad \Theta_{CT1} = \Theta_{\Gamma}.$$

$$\Theta_{CT1}^H(x, y, \tau) = \frac{2\Delta+X}{X} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\gamma_{nm}^2 \tau} \cdot D_{nm} \frac{1}{\|V_{nm}^{CT1}(x, y)\|^2} \cdot V_{nm}^{CT1}(\bar{x}) \cos \frac{Xn\pi X}{2\Delta+X}, \quad (57)$$

$$D_{nm} = \frac{\|V_{nm}^{CT1}(X,Y)\|^2}{\|V_{nm}^r(X,Y)\|^2} \frac{1}{\bar{\omega}_{nm} \sin \bar{\omega}_{nm}} \cdot \left\{ A_{nm} \left[\cos \bar{\omega}_{nm} \frac{l_{nr}}{L} - 1 \right] \right\} \cdot \left[\sin \frac{n\pi(h_1+h_2+h_{nr})}{2h_1+H} - \sin \frac{n\pi(h_1+h_2)}{2h_1+H} \right]. \quad (58)$$

$$\text{При } x = \Delta/X + 1 \quad \theta_{CT1} = \theta_I,$$

$$Q_{cm2}(x, y, \tau) = \frac{2\Delta+X}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \Delta^{-\gamma^2} n m \tau \frac{1}{\|V_{nm}^{cm2}(x,y)\|^2} V_{nm}^{cm2}(x) \cos \frac{\alpha_n \pi y}{2\Delta+X}. \quad (59)$$

Для D_{nm} в формулі (58) необхідно замінити $\|V_{nm}^{cm1}(X,Y)\|^2$ на $\|V_{nm}^{cm2}(X,Y)\|^2$.

$$\theta_{cm1}(x, y, \tau) = \int_0^\tau d\tau_0 \int_0^{\frac{2\Delta+X}{x}} \varphi^{cm1}(x, y; 0, \bar{y}; \tau - \tau_0) f_1(0, \bar{y}, \tau_0) d\bar{y}; \quad (60)$$

$$f_1(0, \bar{y}, \tau_0) = Bi\theta_{cm} - Sk_{cm} \left[\left(\theta_{cm} + \frac{\tau_0}{T_{cm} - T_0} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{T_{cm} - T_0} \right)^4 \right]. \quad (61)$$

Рівняння (61) є нелінійним інтегральним рівнянням, яке вирішували, використовуючи метод ітерацій. За перше наближення візьмемо (57). Граничні умови можна представити:

$$\theta_r'(X, Y, \tau) = 1, \quad (62)$$

$$\text{при } \frac{\Delta}{x} \leq x \leq \frac{\Delta+X}{x}, \quad \frac{\Delta}{x} \leq y \leq \frac{\Delta+X}{x}, \quad \frac{\Delta}{x} \leq x \leq \frac{\Delta+X}{x}.$$

При знаходженні рішення (54) за перше наближення приймемо

$$\theta_r(X, Y, \tau) = \theta_r^H(X, Y, \tau) + \theta_r^Y(X, Y, \tau). \quad (63)$$

Отримавши перше наближення $\Psi(x, y, \tau)$ і з огляду на (63), підставивши його у (52), отримаємо друге наближення θ_r .

Застосовуючи запропоновану методику, отримуємо наближення виразу $\Psi(X, Y, \tau)$ і $\theta_r(X, Y, \tau)$ (рис.13).

З аналізу отриманих результатів випливають важливі наслідки, які свідчать про сутність процесу переносу енергії в замкненому просторі; механізм перенесення енергії з урахуванням стрибка теплопровідності:

- графіки розподілу температури подібні для пор з однаковими розмірами не залежно від температур;

- в порі не можуть бути досягнуті значні градієнти температур, збільшення градієнта можливе переважно завдяки фізичним властивостям матеріалу. Отже, саме додавання Буригінської золи в сировинну суміш дозволило нам створити ПТМ з максимальним термічним опором (градієнтом температури);

- площа під кривими графіків надає інформацію про міру впливу методу передачі енергії (конвекція або теплопровідність). Різке зростання графіків відповідає стрибку теплопровідності на рис. 7. Отже, ми підтверджуємо попередню гіпотезу про можливість суттєвого зменшення теплового потоку в ПТМ на основі Буригінської золи за певних геометричних параметрів пор.

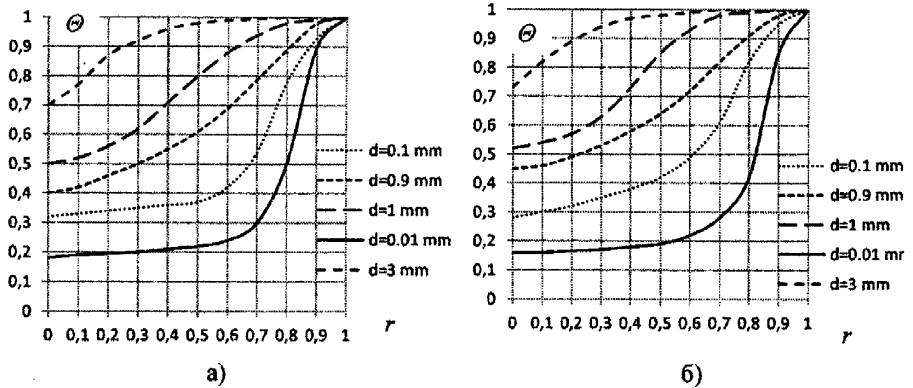


Рис. 13. Поле температури в безрозмірних координатах радіуса та температури (різниця температур між протилежними стінками: а) $\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Отже, використання техногенних відходів Бурштинської ТЕС у нашій технології виробництва пористих матеріалів дає можливість не тільки утилізувати значну кількість золи та отримати ефективний ПТМ, але й покращити екологічну ситуацію в Галицькому районі.

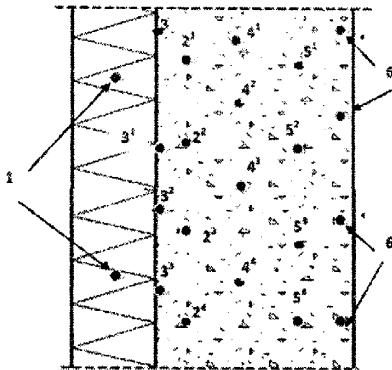
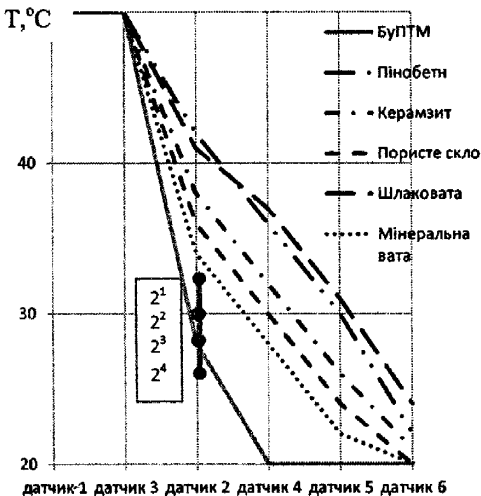


Рис. 14. Розташування датчиків температури в вертикальній конструкції із ПТМ

Для виявлення ефективності отриманого матеріалу застосовували експериментальну установку, основу якої становив багатоточковий електронний реєструвальний термометр AVT5330. До комплексу реєстратора входило програмне забезпечення для роботи в середовищі Windows. Воно дозволяє встановити автоматичне виконання вимірювань в інтервалі від 2 секунд до 24 годин. До реєстратора може бути підключено до 8 датчиків температури DS18B20 (рис. 14). Кожен датчик з'єднувався з реєстратором кабелем довжиною близько 2 м, який ізолюваний термоусадковою оболонкою. Перед розміщенням у точці вимірювань датчики пройшли калібрування в спеціалізованій лабораторії. Датчики № 2, 4 і 5 були встановлені всередині ПТМ в каналах діаметром 8 мм на різній глибині (рис. 14, 15). Датчики № 3 та 6 – на поверхні ПТМ, № 1 у нагрівальному елементі. Щоб уникнути впливу на результати вимірювань, датчики встановлювали з вертикальним і горизонтальним відступом один від одного. Датчики №№ 3 і 6 укріплювали безпосередньо на внутрішній і зовнішній поверхні стіни, датчик № 1 реєстрував температуру гарячої поверхні.

Конструкцію встановлювали в термічну камеру. На рисунку 15 наведено графіки розподілу температури, що характеризують весь цикл вимірювань. У дослідженнях ми порівнювали величину термічного опору різних ПТМ з пористим матеріалом на основі золи Бурштинської ТЕС. Практичні вимірювання підтверджують ефективність нового матеріалу. На графіках показано діапазон показників датчиків температури в зазначених межах ΔT . Зі збільшенням температури датчик фіксував зростання локальної температури. Отже, запропонована методика оцінювання інтенсивності теплопередачі підтверджується експериментально.

Золовідходи Бурштинської ТЕС можна поділити на два типи: золу сухого відбору (зола-виносу) та мокрою (зола гідровидалення). Одним із недоліків золи



датчик 1 датчик 3 датчик 2 датчик 4 датчик 5 датчик 6

Рис. 15. Розподіл температури для обраних інтервалів вимірювань $\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

є її постійний склад, який залежить від морфологічних особливостей палива, що згорає, тонини помелу в процесі його підготовки, зольності палива, хімічного складу мінеральної частини палива, температури в зоні горіння, часу перебування частинок у цій зоні та ін. До того ж у золі, яка зберігається у золовідвалах, постійно відбуваються хімічні перетворення. Отже, запропоновану нами технологію слід коригувати: оптимізувати склад сировинної суміші за методикою, що викладена в розділах 2 та 3 дисертаційної роботи.

У шостому розділі дисертації запропонована методика оцінювання механізмів впливу мінеральних наповнювачів та хімічних елементів на стадіях приготування і поризації.

Механізми впливу мінеральних наповнювачів та хімічних реагентів на процеси спучування можна оцінити на основі аналізу об'єднаного рівняння першого та другого законів термодинаміки:

$$\Delta G = P \cdot \Delta V + \sigma \cdot \Delta S + \mu \cdot \Delta n + \varphi \cdot \Delta q - T \cdot \Delta S = \Delta H - T\Delta S, \quad (64)$$

де ΔG – вільна енергія Гіббса, за допомогою якої можна прогнозувати інтенсивність та напрям зміни енергетичного стану системи; ΔH – ентальпійний фактор системи; $T\Delta S$ – ентропійний фактор.

Ентропійний фактор змінюється з утворенням пористої структури при виконанні наступної роботи системи (сировинної суміші):

- зміна об'єму системи;
- утворення нової поверхні та збільшення поверхневого натягу при твердінні каркасу;

- зміна хімічного потенціалу, фазового та компонентного складу.

Ентропійний фактор збільшується внаслідок формування пористої структури, яка утворюється завдяки технологічним прийомам наведеним у попередніх розділах.

Після розв'язку рівняння (64) матимемо значення робочої температури спучування

$$\Delta T = \frac{1}{R \ln|p^{(1)}|} \cdot \left(\frac{2\sigma v^{(1)}}{r} + \frac{p^{(2)}}{\rho^{(2)}} \right) - T_0, \quad (65)$$

де T_0 – температура газу-пороутворювача, яку ми визначили в розділі 2 за допомогою ДТА (наприклад температура першого ендотермічного мінімуму).

Для теоретичного аналізу динаміки росту газової фази (пор) у сировинній суміші при її нагріванні застосовуємо рівняння Релея-Плессета. Створюючи модель утворення газової фази, необхідно враховувати інтенсивність розчинення газів бульбашки в рідині з одночасним фазовим її переходом (рідина), яка визначається швидкістю проходження тепло- і масообмінних процесів біля поверхні бульбашки. Основними факторами, які впливають на хід зазначених процесів, є температура та тиск газопарової суміші в середині бульбашки. Адже швидкість зміни розміру пори в окремі моменти часу може сягати декількох сотень метрів за секунду, що суттєво впливає на перебіг тепло- та масообмінних процесів на її границі. Внаслідок цих процесів теплофізичні характеристики рідини на границі з бульбашкою також можуть суттєво змінюватися. Отже, для коректної постановки задачі необхідно врахувати комплекс взаємопов'язаних між собою механічних та термодинамічних процесів, які проходять в обмеженому об'ємі за високої швидкості.

Метою даного розділу є створення математичної моделі динаміки парової пори, що дозволить отримувати достовірну інформацію про її термодинамічні характеристики під час росту або стискання. У загальному вигляді математична модель має містити такі складові:

- модель кінетики газової бульбашки у в'язкій рідині;
- модель термодинамічних процесів у середині газопарової бульбашки;
- модель тепло- і масообмінних процесів на границі бульбашки;
- моделювання фазового переходу в рідині;
- моделювання теплообмінних процесів у рідині, що оточує бульбашку.

Для спрощення математичної моделі прийнято такі припущення:

- газопарова бульбашка має сферичну форму;
- рідина є в'язкою та нестисливою;
- всередині газопарової бульбашки міститься суміш газу та парів рідини, маса яких може змінюватися в результаті масообмінних процесів на границі бульбашки;
- газ та пари рідини в середині бульбашки розглядають як реальний газ (з урахуванням Ван-дер-Ваальсових сил).

Швидкість руху рідини (\dot{R}) на границі бульбашки можна визначити шляхом інтегрування відомого рівняння Релея-Плессета

$$\frac{d\dot{R}}{d\tau} = \frac{P_{B(\tau)} - P_{\infty}}{\rho_r R} - \frac{1.5}{R} \dot{R}^2 - \frac{4\mu_r}{\rho_r \cdot R^2} \dot{R} - \frac{2\sigma_r}{\rho_r \cdot R^2}, \quad (66)$$

де τ – час, с; $P_{B(\tau)}$ – тиск парогазової суміші всередині бульбашки, Па; P_{∞} – тиск рідини, Па; ρ_r – густина рідини, кг/м³; μ_r – динамічна в'язкість рідини, Па·с; σ_r – коефіцієнт поверхневого натягу на границі рідина-газ, Н/м.

Якщо на поверхні бульбашки відбувається випаровування чи конденсація рідини то її радіус (R) буде змінюватися не лише через радіальний рух, але і внаслідок фазового переходу

$$\frac{dR}{d\tau} = \dot{R} + \frac{I_p}{\rho_r}, \quad (67)$$

де I_p – маса парів рідини, що переноситься через одиницю поверхні бульбашки за одиницю часу, кг/(м²·с). Зазвичай поправка на вплив фазового переходу невелика.

Припустимо, що в початковий момент часу бульбашка з радіусом R_0 та тиском всередині P_{B0} з'являється у рідині з тиском P_{∞} . Якщо бульбашка перебуває в стані рівноваги з рідиною, то

$$P_{B0} = P_{\infty} + \frac{2\sigma_r}{R_0}. \quad (68)$$

Якщо початковий тиск у бульбашці більший ніж P_{B0} – вона починає зростати, якщо менший – стискатися. Розглянемо рівняння, що описують поведінку газопарової бульбашки під час її переходу до нового стану термодинамічної рівноваги.

Внаслідок зміни розміру пори, температури газу чи складу парогазової суміші, тиск всередині бульбашки змінюється. Згідно з законом Дальтона, загальний тиск суміші в бульбашці дорівнюватиме сумі парціальних тисків газу та водяної пари

$$P_B = P_g + P_p. \quad (69)$$

В окремі моменти часу тиск в середині бульбашки може різко зростати, тому описуючи її термодинамічний стан, необхідно враховувати відмінність її параметрів від стану ідеального газу. Для визначення парціальних тисків компонентів парогазової суміші, доцільно застосувати рівняння Ван-дер-Ваальса

$$P_g = \frac{R\mu_g T}{\rho_g} - \rho_g^2 \frac{a_g}{\mu_g^2}; \quad P_p = \frac{R\mu_p T}{\rho_p} - \rho_p^2 \frac{a_p}{\mu_p^2}, \quad (70)$$

де P_g – парціальний тиск газу, Па; ρ_g – густина газу, кг/м³; $R_{\mu} = 8314$ – універсальна газова стала, Дж/(кмоль·К); a_g – молекулярна маса газу, кг/кмоль; μ_p – молекулярна маса парів рідини, кг/кмоль; T – температура суміші газів в бульбашці, К; a_g, a_p [(Н·м⁴)/моль²], b_g, b_p [м³/моль] – сталі Ван-дер-Ваальса відповідно для газу та пари.

Для сильно стиснених газів рівняння Ван-дер-Ваальса можна замінити на інші його модифікації (напр. Редліха-Квонга). У рівнянні (70) невідомими

величинами є температура парогазової суміші та густина окремих її компонентів.

Густина газів суміші визначається впливом масообмінних процесів та зміною радіуса бульбашки. Густина кожного компонента газової суміші можна знайти шляхом інтегрування рівнянь

$$\frac{d\rho_g}{dt} = \frac{3}{R} \left(I_g - \rho_g \frac{dR}{dt} \right), \quad \frac{d\rho_p}{dt} = \frac{3}{R} \left(I_p - \rho_p \frac{dR}{dt} \right), \quad (71)$$

де I_g – маса парів газу, що переноситься через одиницю поверхні бульбашки за одиницю часу, кг/(м²с).

Для визначення температури в середині бульбашки зазвичай застосовують перший закон термодинаміки, який для газопарової суміші матиме вигляд:

$$\frac{dU_g}{dt} + \frac{dU_p}{dt} = F \cdot q - P_B \frac{dV}{dt}. \quad (72)$$

Для суміші газів його можна записати як

$$\frac{d(m_g c_g + m_p c_p) T}{dt} = 4\pi R^2 q - P_B \frac{d(4/3\pi R^3)}{dt}, \quad (73)$$

де m_g, m_p – маса парів відповідно газу та пари, кг; c_g, c_p – масова теплоємність парів газу та пари, Дж/(кг·°C); q – питомий тепловий потік біля поверхні бульбашки, Вт/м².

Вважаючи масові теплоємності газу та пари постійними, після диференціювання рівняння (73) отримаємо

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3}{R(c_g \rho_g + c_p \rho_p)} \left[q - T(c_g I_g + c_p I_p) - P_B \frac{dR}{dt} \right]. \quad (74)$$

Рівняння (74) містить три невідомі величини: питомий тепловий потік, масовий потік газу та масовий потік пари. Передумовою виникнення теплового потоку є різниця температур між стінкою парової бульбашки та газопаровою сумішшю в середині бульбашки. Рушійною силою масообмінних потоків є різниця парціальних тисків біля стінки парової бульбашки та її внутрішнього середовища.

Питомий тепловий потік складається з трьох частин:

- тепловий потік від парогазової суміші до стінки бульбашки;
- тепловий потік на нагрівання пари, що надходить у бульбашку з її поверхні;
- тепловий потік на нагрівання газу, що надходить у середину бульбашки

шляхом десорбції з її поверхні.

Загалом ці теплові потоки можна визначити за формулою

$$q = (\alpha + c_g I_g + c_p I_p) (T_{(R,\tau)} - T), \quad (75)$$

де α – коефіцієнт теплообміну біля поверхні бульбашки, Вт/(м²·°C);

$T_{(R,\tau)}$ – температура поверхні бульбашки, °C.

Коефіцієнт теплообміну біля поверхні бульбашки можна знайти за формулою

$$\alpha = \frac{q_1 + q_2 - q_3 - q_4}{(T_{(R,\tau)} - T)}, \quad (76)$$

де q_1, q_2, q_3, q_4 – питомі теплові потоки, що переносяться шляхом пружного співударяння молекул газу та пари зі стінкою бульбашки. Формули (75) та (76) можна поєднати

$$q = q_1 + q_2 - q_3 - q_4 + (c_g I_g + c_p I_p) (T_{(R,\tau)} - T). \quad (77)$$

Тепловий потік, що передається молекулами газової фази під час співударяння зі стінкою пори, визначається швидкістю їх теплового руху; кількістю та теплофізичними властивостями газу. Середньоарифметичні швидкості теплового руху молекул пари та газу сягають декількох сотень метрів за секунду і розраховуються за формулами:

$$u_{p(T)} = \sqrt{8R_u T / \mu_p \pi} \text{ та } u_{g(T)} = \sqrt{8R_u T / \mu_g \pi}. \quad (78)$$

Відповідно до положень молекулярно-кінетичної теорії, маса молекул пари, які співударяються з нерухомою одиничною поверхнею за одиницю часу $0.25 \rho_p u_{p(T)}$. Частина цих молекул з масою $0.25 \alpha_p \rho_p u_{p(T)}$ конденсується, а інша частина повертається всередину бульбашки $0.25(1 - \alpha_p) \rho_p u_{p(T)}$. Таке ж відбувається й у газовій частині суміші.

Варто зазначити, що стінка бульбашки теж рухається і в окремі моменти часу її швидкість може набувати досить великих значень (декілька десятків метрів за секунду). З розширенням бульбашки напрямком її швидкості співпадає з напрямком руху пари та газу і їх взаємна швидкість зменшується. З урахуванням швидкості руху стінки, тепловий потік, що надходить з молекулами пари в середину бульбашки

$$q_1 = 0.25(1 - \alpha_p) \rho_p (u_{p(T)} - \dot{R}) c_p T_{(R,\tau)}. \quad (79)$$

Тепловий потік, що надходить з молекулами газу в середину бульбашки

$$q_2 = 0.25(1 - \alpha_g) \rho_g (u_{g(T)} - \dot{R}) c_g T_{(R,\tau)}. \quad (80)$$

У формулах (79) та (80) α_p, α_g – коефіцієнти акомодатії відповідно пари та газу.

Тепловий потік, що переноситься з молекулами пари до поверхні бульбашки

$$q_3 = 0.25 \rho_p (u_{p(T)} - \dot{R}) c_p T. \quad (81)$$

Тепловий потік, що переноситься з молекулами газу до поверхні бульбашки

$$q_4 = 0.25 \rho_g (u_{g(T)} - \dot{R}) c_g T. \quad (82)$$

Потік маси на границі парової бульбашки можна визначити за рівнянням Герца-Кнудсена

$$I_g = \alpha_g \frac{P_g^*(T) - P_g}{\sqrt{\frac{2\pi R_u T_{(R,\tau)}}{\mu_g}}}, \quad I_p = \alpha_p \frac{P_p^*(T) - P_p}{\sqrt{\frac{2\pi R_u T_{(R,\tau)}}{\mu_p}}}, \quad (83)$$

де $P_{g(T)}^*$, $P_{p(T)}^*$ – парціальні тиски насиченого газу та парів рідини біля поверхні бульбашки, Па. Для процесу випаровування з поверхні бульбашки потік маси вважаємо додатним.

Для визначення тиску насичених парів біля поверхні бульбашки можна застосувати рівняння Клапейрона-Клаузіуса

$$P_{g(T)}^* = P_{Sg} \exp \left[\frac{r_g \mu_g}{R_\mu} \left(\frac{1}{T_{Sg}} - \frac{1}{T_{(R,\tau)}} \right) \right], P_{p(T)}^* = P_{Sp} \exp \left[\frac{r_p \mu_p}{R_\mu} \left(\frac{1}{T_{Sp}} - \frac{1}{T_{(R,\tau)}} \right) \right], \quad (84)$$

де r_g – теплота фазового переходу для газу, Дж/кг; r_p – теплота фазового переходу для пари, Дж/кг; P_{Sg}, T_{Sg} – тиск та температура опорної точки для газу, Па, К; P_{Sp}, T_{Sp} – тиск та температура опорної точки для пари, Па, К.

Для підвищення точності розрахунку опорну точку з відомими параметрами тиску та температури бажано обирати поблизу їх розрахункових значень. За незначних змін температури теплоту фазового переходу можна вважати сталою, в іншому випадку її необхідно апроксимувати.

Для визначення невідомої температури на поверхні бульбашки можна застосувати рівняння теплопровідності Фур'є. Позначимо через « x » координату, за якою змінюється радіус бульбашки. З урахуванням переміщення маси при зміні радіуса бульбашки

$$\frac{\partial T_{(x,\tau)}}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_r x^2 \frac{\partial T_{(x,\tau)}}{\partial x} - \dot{R} R^2 T_{(x,\tau)} \right), \quad (85)$$

де λ_r – теплопровідність рідини, Вт/(м°C); c_r – теплоємність рідини, Дж/(кг°C). У результаті тепло- та масообмінних процесів на границі бульбашки рідина може змінювати свої теплофізичні характеристики (λ_r, ρ_r, c_r).

Враховуючи, що масообмінні процеси відбуваються на границі парової бульбашки, граничні умови записано з урахуванням теплоти фазового переходу для газу та пари

$$-\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} (x = R, \tau) = \alpha (T - T_{(R,\tau)}) - I_g r_g - I_p r_p. \quad (86)$$

Систему рівнянь (66)–(86) можна розв'язати за допомогою цифрових методів, наприклад методу Рунге-Кутта 4-го порядку.

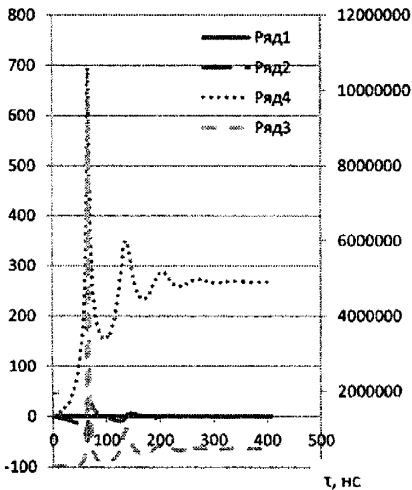
За наведеними рівняннями виконанорозрахунок термодинамічного стану бульбашки з газом та водяною парою за умови відсутності тепло- та масообмінних процесів біля поверхні (рис. 16).

У другому та третьому розділах дисертаційної роботи визначено основні співвідношення енергетичних, кінематичних та рецептурних складових запропонованої нами технологій. Методика даного розділу дає можливість регулювати зазначені параметри для отримання заданого розміру пор (середнього), які і будуть визначати необхідні теплофізичні характеристики ПТМ на основі Бурштинської золи.

У сьомому розділі досліджено можливість використання золи в технологіях

виробництві газобетону (рис. 17). Оскільки спучування і набір структурної міцності газобетонним масивом істотно залежать від водотвердого співвідношення (ВТС), то на першому етапі здійснювали пошук оптимальної кількості води для замішування золоцементних композицій. З метою визначення впливу водотвердого співвідношення на спучування матеріалу були виготовлені газобетонні суміші з ВТС в діапазоні від 0,2 до 0,6, який визначено в другому розділі дисертаційної роботи. У цьому випадку газобетонні суміші виготовляли на основі цементу і піску, або на основі цементу і золи Бурштинської ТЕС із введенням хімічних добавок. Дослідження показали, що у визначеному діапазоні зі збільшенням ВТС висота спученого цементно-піщаного газобетону зростає.

Для золоцементного газобетону є оптимум співвідношення ВТС, що становить 0,5. Із введенням хімічних добавок NaCl і Na₂SO₄ кількість води не змінюється за винятком складів, в яких зазначені добавки використовуються в малих кількостях (0,5 %). Зменшення ВТС у цьому випадку можливо відбувається



внаслідок «розрідження» суміші через ефект пептизації тонкодисперсних частинок, що дозволяє отримати газобетон з рівномірною пористістю з меншою кількістю води. Але, як і в попередніх дослідях (розділи 2 та 3), добавки практично не впливають на процес спучування, оскільки в сухій золі (за тривалого її зберігання) шляхом хімічних реакцій утворюються ці сполуки, а додавання або збільшення їх кількості не змінює кількісно результати зазначеного процесу. Встановлено, що використання Бурштинської золи замість піску дозволяє збільшити висоту спучування на 70 %, а з введенням хімічних добавок – додатково ще від 3 до 7 %.

Застосування хімічних добавок дозволяє скоротити терміни твердіння бетонної маси, оскільки вони забезпечують швидке зв'язування води і накопичення твердої фази з максимальною щільністю заповнення простору каркаса. На нашу думку, це відбувається завдяки додатковому синтезу AFt і AFm фаз, які зв'язують

підвищену кількість H₂O, мають високу швидкість росту і забезпечують швидкий набір структурної міцності. Отримані результати представлені на рис 17. Уповільненим структуроутворенням володіє класичний цементно-піщаний газобетон. Про це свідчать такі характеристики як уповільнений набір

конструкційної міцності, порівняно з іншими зразками, і підвищена усадка. Для нього характерне повільне зростання міцності, що становить до кінця схоплювання цементу (4 години) 0,8 МПа, а через 10 годин – всього 1,8 Па, у той час як для подальших технологічних процесів масив газобетону повинен мати 2,50 – 3,0 Па.

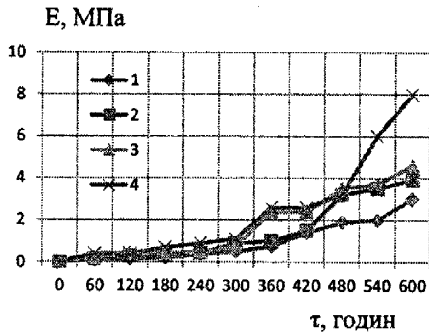


Рис. 17. Міцність газобетону залежно від складу сировинної суміші:

- 1 – цементно-піщаний;
- 2 – цементно-зоільний;
- 3 – цементно-зоільний з Na₂SO₄ (1 %);
- 4 – цементно-зоільний з NaCl (1 %)

Застосування золи Бурштинської ТЕС і хімічних добавок дозволяє регулювати властивості газобетону як на стадії дозрівання масиву, так і кінцевого матеріалу. Отже, золу можна утилізувати шляхом використання в технології виробництва газобетону. На території Бурштинської ТЕС можна виділити три основні джерела розповсюдження шкідливих викидів: золовідвали; три димові труби та стічні води. За нашими дослідженнями встановлені кількісні параметри забруднювачів, що перевищують ГДК: SO_x, NO_x та пил – золи-виносу з труб й золовідвалів (рис.18).

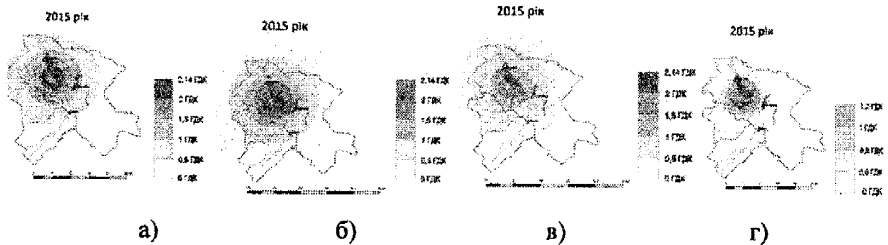


Рис.18. Концентрації шкідливих викидів БуТЕС у приземному шарі атмосфери: а) NO₂ (нітроген(IV) оксиду); б) SO₂ (сульфур(IV) оксиду); в) CO₂ (вуглекислий газ); г) неорганічного пилу, який містить SiO₂ (силіцій(IV) оксид)

На розрахункових схемах позначена область діаметром 30 км. З 2013 року спостерігається перевищення ГДК в 1,5 – 2,14 разів у радіусі 10 км. На рисунку також позначена концентрація неорганічного пилу, що містить SiO₂. Вміст пилу з 2013 року суттєво збільшився, перевищуючи ГДК у 1,2 раза в 10 - кілометровій зоні.

Перевищення ГДК пов'язане з використанням низькосортного вугілля та збільшенням потужності ТЕС. Загалом концентрація NO₂ визначається режимом та організацією процесів горіння палива. Отже, оскільки на сьогодні оптимізація процесу горіння залишається актуальним завданням, то одним із завдань сьомого розділу була оптимізація процесу спалювання вугілля для зменшення викидів NO₂ та SO₂.

На Бурштинській ТЕС пропонується встановити додатково установку одночасного очищення димових газів від SO_x та NO_x шляхом подачі озону в скрубєр. Установка забезпечує очищення газів від SO_2 до 90 %, NO_x до 65 %.

Для забезпечення необхідних нормативами викидів твердих частинок в атмосферу на Бурштинській ТЕС пропонується провести реконструкцію усіх енергоблоків золоуловлювачів з ефективністю від 98,6 до 99,8 %, які забезпечують кінцеву запиленість очищених газів на рівні 50 мг/м^3 . Карту розсіювання забруднювачів із труб після встановлення на Бурштинській ТЕС системи очищення з зазначеною ефективністю представлено на рис.19.

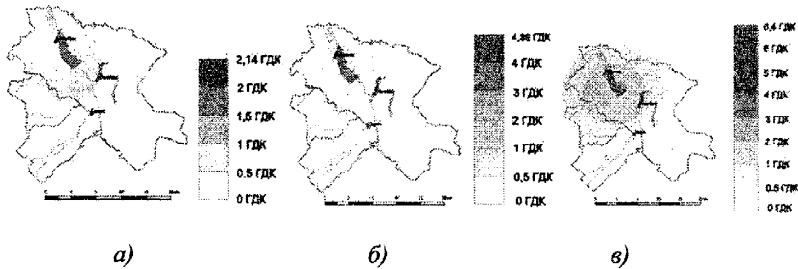


Рис. 19. Прогнозна зміна концентрації шкідливих викидів після встановлення системи очищення: а) NO_2 ; б) SO_2 ; в) група сумарії

З розрахункових даних випливає, що концентрація шкідливих викидів перебуває в межах ГДК. Є перевищення ГДК лише безпосередньо на золовідвалах.

Детальну увагу в сьомому розділі приділено розробленню технології зменшення кількості NO_x в котлоагрегаті, в основі якої лежить попереднє термічне

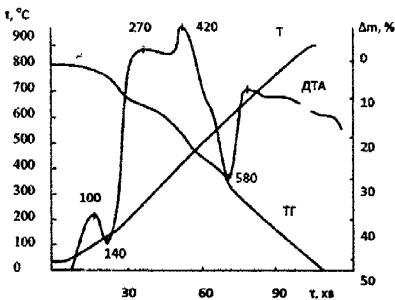


Рис.20. Приклад ДТА вугілля

руйнування азотовмісних сполук палива з переходом виділеного при цьому атомарного азоту в молекулярний азот. Для цього за допомогою ДТА-аналізу досліджували процеси нагрівання марок вугілля, використовуваних на Бурштинській ТЕС (рис. 20). Послідовна реалізація на котлах ТП-100 Бурштинської ТЕС низки технологічних заходів дозволить зменшити концентрацію NO_x в димових газах до рівня $780 - 840 \text{ мг/м}^3$, близького до режиму спалювання природного газу – $550-640 \text{ мг/м}^3$, що $a = 1,12-1,20$.

Для підвищення світимості факелу запропоновано відповідну технологію спалювання водо-мазутної емульсії. Досліджено вплив різних факторів на температуру факелу, за допомогою методики планованого експерименту отримано математичні рівняння та розв'язано задачу оптимізації режимних параметрів спалювання.

У зонах техногенного впливу об'єкта (Бурштинської ТЕС) формуються несприятливі екологічні умови, пов'язані з забрудненням атмосферного повітря, ґрунтів, поверхневих та підґрунтових вод Галицького району. Джерелами забруднення ґрунту і підґрунтових вод є викиди димових газів, які містять високодисперсні тверді частинки золи, що здатні розповсюджуватися на значні відстані й з часом покривати поверхню ґрунту; золовідвали, в яких відбувається вертикальна міграція забрудненого фільтрату і його розповсюдження в підземні водні горизонти.

З урахуванням показників забрудненості (табл. 4), золошлаки можна характеризувати як небезпечні відходи, які при складуванні на відкритих золоховищах внаслідок свого фізичного складу (переважно дрібні фракції) створюють підвищену запиленість атмосферного повітря. У результаті хімічні сполуки, що містить зола, легко переносяться повітрям навколо золовідвалів і забруднюють прилеглі території.

Значної уваги потребують проблеми, пов'язані з радіоактивністю золи та можливістю її використання для виробництва будівельних матеріалів і виробів.

Таблиця 4

Забруднення важкими металами золошлакових відходів

Хімічний елемент	Вміст, мг/кг	
	діючого золошлаковідвалу	закритого золошлаковідвалу
Цинк	35,0	21,3
Купрум	20,1	17,8
Кадмій	1,0	1,0
Плюмбум	23,0	14,9
Кобальт	6,5	5,0
Нікол	27,3	22,0
Манган	27,3	27,8

Результати дослідження золи на наявність радіоактивних елементів (табл. 5) показали, що їх вміст у золі значно нижчий від ГДК для будівельних матеріалів, тому цілком можливе застосування даного техногенного відходу у виробництві ПТМ.

Результати дослідження освітленої води з золовідвалу, яка повертається на ТЕС для повторного використання (табл. 6) свідчать, що вони забруднені важкими металами та іншими забруднювальними речовинами.

Таблиця 5

Результати спектрометричного аналізу золошлакових відходів

Елемент	Активність, Бк/г	$A_{\text{эф.}}$, Бк/г	Припустима радіоактивність будівельних матеріалів, Бк/г
Th ²²⁸	0,37	-	до 0,5 за ДБН В.2.2-15-2005; до 0,370 за ГОСТ 30108-94
Ra ²²⁵	0,0666	$4 \cdot 10^{-12}$	
K ⁴⁶	0,3589	0,148	

Таблиця 6

Результати аналізів інфільтраційних вод з золівідвалу № 3

Речовина, мг/дм ³	Золовідвал (інфільтраційна вода)	Речовина, мг/дм ³	Золовідвал (інфільтраційна вода)
Кобальт	0,01	Манган	0,0525
Ферум	0,133	Цинк	0,05
Ванадій	0,115	Купрум	0,05
Арсен	0,110	Нікол	0,01
Хром	0,015	Плюмбум	0,005

Порівняльний аналіз санітарно-хімічної характеристики зразків золи Бурштинської ТЕС і води, що йде від золівідвалу, дозволяє зробити висновок про наявність міграції хімічних речовин - інгредієнтів золи в дренажні води. Причому на відстані 500 ... 1000 м вміст зменшується тільки в 1,5 ... 3 рази. Наявність рухомих форм металів свідчить про їхню здатність вступати у взаємодію з ґрунтовими комплексами, брати участь в обмінних процесах і мігрувати в суміжні середовища. У результаті відбувається забруднення підґрунтових вод та ґрунтових поверхонь з утворенням локальних геохімічних аномалій підвищеного вмісту техногенних мас металів щодо фонових концентрацій.

Прогноз втрат зольного ґрунту здійснено з урахуванням конструктивних, планувальних та природно-кліматичних факторів. Потенційні втрати ґрунту від вітрової ерозії наведені в табл. 7.

Таблиця 7

Втрати зольного ґрунту

№ золівідвалу	Втрати, г/с	Втрати, т/рік
1 -	27,4	98,6
2	29,0	104,49
3	2,69	9,7

Результати розрахунку свідчать, що золівідвали є джерелом екологічної загрози, оскільки створюють підвищену запиленість повітря і забруднюють водний басейн інфільтраційними та освітленими водами, які містять небезпечні речовини. Тому виникає необхідність локалізувати джерело забруднення навколишнього середовища з метою забезпечення екологічної безпеки. Консервація золівідвалів може проводитися з використанням: природного рослинного ґрунту; мулу з водовідстійних споруд, систем освітлення води, каналізації.

Покриття поверхні сховища шаром природного матеріалу дає можливість усунути негативний вплив на середовище, але це економічно недоцільно, оскільки транспортування родючого ґрунту з окремих районів пов'язане зі значними витратами.

Використання місцевого відходу дозволить відмовитися від гідросівби (мул сприятиме бурхливому розвитку густої дернини при змішуванні з золою),

ліквідувати пиління золовідвалів, зменшити інфільтрацію освітленої води, а також вирішити проблему утилізації мулу. Після нанесення ґрунтової суміші, що містить мул, на сплановану поверхню слід висаджувати рослини, які здатні формувати дернину: пирій, тонконіг лучний, стokolос, еспарцет, буркун жовтий і білий та ін.

З рекультивацією 60 % території золовідвалів показники забруднень досліджуваної території можуть бути в межах ГДК (рис.21).

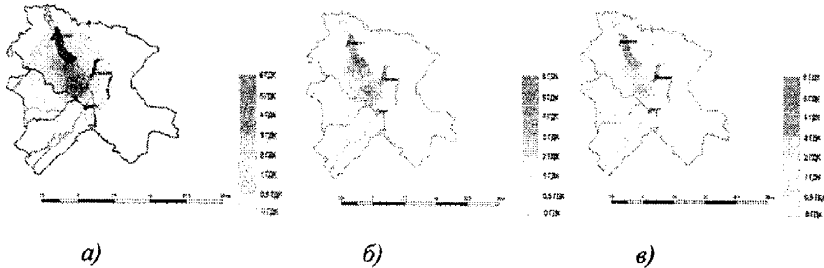


Рис. 21. Повітряне розсіювання забруднювачів відходів Бурштинської ТЕС із золовідвалів № 1; № 2; № 3:

- а) станом на 2015 рік; б) при 60 % рекультивації поверхні золовідвалів;
в) при 80 % рекультивації поверхні золовідвалів

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження дозволили сформулювати пропозиції щодо зменшення техногенного навантаження на довкілля теплових електричних станцій (на прикладі Бурштинської ТЕС) (рис. 21).

1. На Бурштинській ТЕС, як і на більшості теплових електричних станцій, здійснюють гідравлічний транспорт золи. Для цього використовують 746000 м³/рік води, яку необхідно очишувати. Вода формує потужні стоки 126000 м³/рік та збільшує об'єм інфільтрації до 620000 м³/рік, що сприяє розповсюдженню забруднювачів Бурштинської ТЕС у довкілля, як це було показано вище.

Тому перший крок до зменшення техногенного навантаження – використання золи, що подається гідротранспортом на золовідвал, в технології виробництва нових пористих теплоізоляційних матеріалів, як це було обґрунтовано практично і теоретично в відповідних розділах дисертаційної роботи. Разом з тим буде ліквідовано процеси інфільтрації забрудненої води через золовідвал в ґрунтові води, зменшаться об'єми стічних вод та, відповідно, покращиться стан водогосподарського комплексу Галицького району. Кількісні показники запропонованих рішень представлено на екологічних картах (рис 1.7-1.10) в першому розділі дисертації.

2. Проведення рекультивації золовідвалів за запропонованою технологією приведе до припинення вітрової ерозії (пиління), внаслідок якої виноситься 212,8 т/рік забруднювачів разом з золою.

3. Використання золи із золовідвалів у виробництві газобетонних конструкцій дозволить скоротити накопичення золи в золосховищах та зменшити витрати цементу до 50 % в технологіях виробництва газобетону.

На рис. 22 представлена схема матеріального балансу золовідвалу після природоохоронних заходів, що запропоновані в даній дисертаційній роботі.

Отже реалізація даного проєкту дозволить ліквідувати накопичення відходів і вирішити проблеми забруднення довкілля техногенними відходами: пиління золовідвалів (212,8 т/рік); інфільтрацію води (620000 м³/рік); забруднення стоку (126000 м³/рік), а також – уникнути потреб у воді на гідротранспорт (726000 м³/рік).

Використання (утилізація) золи дає можливість виробляти нові дешеві та ефективні пористі матеріали для теплоізоляції енергетичних об'єктів та будівель.

У додатках наведено розрахункову програму для розв'язку рівнянь математичної моделі на ПЕОМ та акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

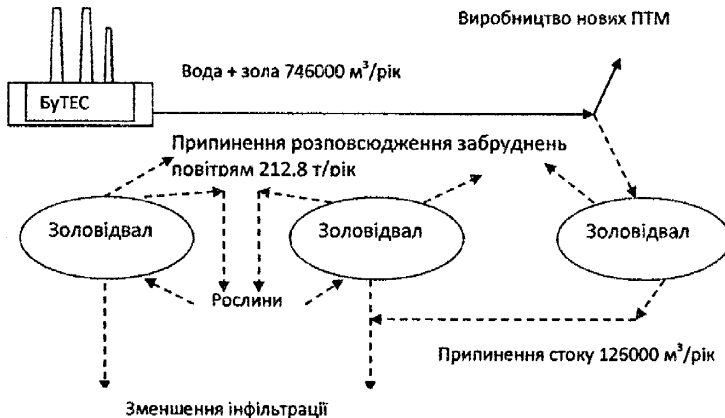


Рис. 22. Схема матеріального балансу золовідвалів після природоохоронних заходів, що запропоновані в даній дисертаційній роботі

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено узагальнення нового вирішення наукової та важливої прикладної проблеми екології та енергетики – утилізації твердих промислових відходів теплових електричних станцій шляхом створення інноваційних пористих теплоізоляційних матеріалів (на прикладі Бурштинської ТЕС):

1. Екологічні обстеження довкілля Галицького району дозволили визначити якісний та кількісний вплив відходів Бурштинської ТЕС на екологічний стан довкілля та здоров'я населення; запропонувати нові технології утилізації золошлакових відходів Бурштинської ТЕС. У результаті реалізації даних

технологій вирішується проблема накопичення золи в існуючих золівдвалах шляхом її використання у виробництві бетонних конструкцій та нових ефективних пористих теплоізоляційних матеріалів.

2. Запропоновано й експериментально обґрунтовано технології утилізації золи шляхом створення нових ПТМ, оптимізовано склад ПТМ і технологічні режими, визначено теплофізичні й механічні властивості нових матеріалів, а також встановлено взаємозв'язок між ними. Це дозволило на новому експериментальному підґрунті створити теоретичні основи енергообміну в замкнених пористих системах, наукову концепцію керованого формування пористої структури нових матеріалів на основі Бурштинської золи з прогнозованими теплофізичними характеристиками.

3. За допомогою диференційно-термічного аналізу досліджено основні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в золі Бурштинської ТЕС під час її зберігання та впливу на неї вологи і температур. Досліджено закономірності реалізації фізико-хімічних процесів в сировинних сумішах на основі золи Бурштинської ТЕС під час її гідратації, спучування, кристалізації та твердіння. Оптимізовано параметри технологічного впливу на зазначені процеси. Отримано результати використані в запропонованих технологіях утилізації золи.

4. Досліджено вплив складу золи на процеси гідратації цементних компонентів, встановлено кількісні характеристики цього впливу. На основі отриманих даних розроблено пропозиції щодо часткового заміщення золою цементу у складі газобетону. Оптимізовано сировинний склад газобетону на основі золи, досліджено кінетичні характеристики процесів твердіння. Встановлено, що введення в газобетонну суміш хімічних сполук NaCl та Na_2SO_4 прискорює процеси гідратації кальцію та твердіння.

5. Запропоновано технологію рекультиватії золівдвалів, реалізація якої дозволить вирішити ряд екологічних проблем регіону: ліквідувати розповсюдження забруднень повітрям 212,8 т/рік; зменшити забруднення гідросфери (726000 m^3 /рік) та атмосфери; оздоровлення санітарної та екологічної ситуації в районі.

6. На основі виконаних досліджень розроблено матеріальні баланси золосховищ, які характеризують екологічний стан регіону до і після реалізації запропонованих у дисертаційній роботі технічних рішень. Деякі з цих рішень впроваджені у виробництво з загальним економічним ефектом 3 млн 487 тис. грн на рік. Реалізація результатів дисертаційної роботи дозволить не тільки значно збільшити економічний ефект, але і зменшити техногенне навантаження на території Галицького району, а також отримати нові ефективні теплоізоляційні матеріали.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Павленко А. М. Оптимизация процесса производства пористых теплоизоляционных материалов / А. М. Павленко, А. В. Кошляк, В. Е. Черниченко

// Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2010. – № 2.(61) Ч.1. – С. 30-33.

2. Павленко А. М. Моделирование взаимосвязи технологических и структурных характеристик пористых теплоизоляционных материалов в процессе производства / А. М. Павленко, А. В. Кошлак, В. Е. Черниченко // Вестник Кременчугского национального университета им. М. Остроградского. – 2010. – № 1(60) Ч.1. – С. 104-108.

3. Кошлак А. В. Динамика формирования пористой структуры / А. В. Кошлак // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2010. – Выпуск 2(15). – С. 112-116.

4. Кошлак А. В. Влияние структуры пористых гидросиликатов на их теплопроводность / А. В. Кошлак // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2011. – Выпуск 1(16). – С. 150-153.

5. Павленко А. М. Дослідження процесів термічного спучення гідросилікатів / А. М. Павленко, А. В. Кошлак, Ю. В. Ракочая // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2011. – Выпуск 1(16). – С. 140-145.

6. Павленко А. М. Моделирование технологии образования окислов азота при сжигании топливных эмульсий / А. М. Павленко, А. В. Кошлак, В. Е. Черниченко, О.С. Осенняя // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2011. – № 5.(70). – Ч.2. – С. 191-194.

7. Павленко А. М. Производство пористого материала с прогнозируемыми теплофизическими характеристиками / А. М. Павленко, А. В. Кошлак // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – 2011 – Випуск 3. – С. 135-141.

8. Павленко А. М. Оптимизация процесса горения водомазутных эмульсий / А. М. Павленко, А. В. Кошлак, О. С. Осенняя, В. Е. Черниченко // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2011. – № 4(69). – С. 25-28.

9. Кошлак А. В. Особенности формирования теплофизических характеристик пористого материала / А. В. Кошлак // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2011. – Выпуск 2(17). – С. 205-210.

10. Кошлак А. В. Особливості термічного спучення гідросилікатів / А. В. Кошлак // Сборник научных трудов «Национальная академия природо-охранного и курортного строительства». – 2012. – Выпуск 43. – С. 49 – 53 .

11. Братута Э. Г. Особенности теплопроводности пористого материала / Э. Г. Братута, А. В. Кошлак // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2014 (4). – С. 116-119.

12. Павленко А. М. Параметры газа агента-порообразователя внутри замкнутой сферической поры в состоянии равновесия / А. М. Павленко, А. В. Кошлак, А. А. Чейлитко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2015. – № 62. – С. 28-35.

13. Павленко А. М. Енергозберігаючі технології формування об'ємних аморфних структур / А. М. Павленко, Б. О. Усенко, Г. В. Кошлак // Збірник

наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – № 153. – С. 192-202.

14. Крижанівський Є. І. Екологічні проблеми енергетики / Є. І. Крижанівський, Г. В. Кошлак // Нафтогазова енергетика. – 2016. – № 2 (28). – С. 80 - 90.

15. Pavlenko A. Study of the formation of gas-vapor in the liquid mixture / A. Pavlenko, H. Koshlak, A. Cheilytko, M. Nosov // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – VOL 4. – No 5(82). – P. 58-65.

16. Павленко А. М. Уменьшение неоднородности при структуро-образовании пористого материала как фактор улучшения теплофизических характеристик теплоизоляции / А. М. Павленко, А. А. Чейлытко, А. В. Кошлак // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимента: материалы 8-й междунар. науч. конф., 18-20 июня 2012 г. – Караганда, 2012. – С. 550-554.

17. Павленко А. М. Метод решения уравнений теплопроводности / А. М. Павленко, А. В. Кошлак, Б. О. Усенко // Сборник статей по материалам XXII Международной заочной научно-практической конференции 15 июля 2013 г. «Инновации в науке». – 2013. – № 22. – С. 59-73.

18. Павленко А. М. Передача тепла в малом замкнутом пространстве / А. М. Павленко, Б. О. Усенко, А. В. Кошлак // Методология, теория и практика в современных физико-математических, технических, химических науках. Материалы международной научно-практической конференции 17.08.13. – Новосибирск: Сибпринт. – С. 66-72.

19. Pavlenko A. M. The processes of heat and mass exchange in the vortex devices / A. M. Pavlenko, H. V. Koshlak, B. O. Usenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 3. – P. 55-59.

20. Pavlenko A. M. Thermal conductivity of the gas in small space / A. M. Pavlenko, H. V. Koshlak, B. O. Usenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2. – P. 15-20.

21. Koshlak A. Solution of equations thermal conductivity / A. Koshlak // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use». – Radom: Kazimierz Pulaski University of technology and Humanities in Radom. – 2014. – № 2 (3). – P. 38-49.

22. Pavlenko A. Design of processes of thermal bloating of silicates / A. Pavlenko, A. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No 1. – P. 118-123.

23. Pavlenko A. The temperature distribution of the materials in convective heat transfer / A. Pavlenko, A. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No 4. – P. 343-347.

24. Koshlak H. Temperature state plate in conditions convective heat transfer / A. Pavlenko, H. Koshlak // Collection of scientific articles «Energy, energy saving and rational nature use». – Radom: Kazimierz Pulaski University of technology and Humanities in Radom. – 2015. – № 1 (4). – P. 108-114.

25. Pavlenko A. M. Research the energyefficient process of high-speed casting of metal between the cooling rolls / A. M. Pavlenko, H. V. Koshlak, B. O. Usenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 5. – P. 68-72.

26. Pavlenko A. Investigation of mathematical problems of rolling melt metal between the cooling roll / A. Pavlenko, H. Koshlak, B. Usenko // «Studying the nature of matter and physical fields in the search for ways of the fundamental scientific gnoseology problems solution»: peer-reviewed materials digest, 21-27 april 2015: collective monograph. – London, 2015. – P. 45-48.

27. Pavlenko A. Study of the stability of methane hydrates in normal conditions / A. Pavlenko, H. Koshlak, O. Vytyaz // AGH Drilling. Oil. Gas. – 2015. – № 4, vol.31. – P. 495-506.

28. Pavlenko A. Prospects for the development of hydrate and transportation technology of methane gas / A. Pavlenko, H. Koshlak, O. Vytyaz, C. Rybicki // AGH Drilling. Oil. Gas.–2015. – № 1 vol.32. – P. 5-13.

29. Кошляк А. Влияние технологических параметров и структурных характеристик пористых гидросиликатов на их термостойкость / А. Кошляк // Сборник научных трудов Sword. – 2014. – № 1. – Т.10 – С. 27-32.

30. Koshlak H. Heat exchange in a confined space / H. Koshlak // Problem of energy saving and nature use 2013. – Budapest, 2014. – С. 87-92.

31. Павленко А. М. Особенности горения топливных эмульсий / А.М. Павленко, А.Л. Шкаровский, А.В. Кошляк // Газинформ. – 2013. – № 3 (43). – С. 56-59.

32. Pavlenko A. Dimensions of the nucleus agent pore former closed spherical pores / A. Pavlenko, A. Cheilytko, H. Koshlak // Aktualne zagadnienia energetyki, budownictwa i inzynierii srodowiska. – Koszalin, 2016. – P. 75-83.

33. Koshlak H. V. Use of burshtyn TPP ash for the production of expanded gas concrete/ Energy, energy saving and rational nature use. – 2016. – № 2 (5). – P. 87-95.

34. Пат. 56699 UA, МПК С04В14/00. Спосіб одержання пористого теплоізоляційного матеріалу / Кошляк А. В., Павленко А. М.; заявник та патентовласник ДДТУ. – № 201008090; заявл. 29.06.2010; опублік. 25.01.2011, Бюл. № 2.

35. Теплотехнологічні процеси та установки: Задачі та приклади розрахунків: / [І. С. Долгополов, В. Т. Тучин, О. В. Садовий, Г. В. Кошляк]. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. – 149 с.

36. Пористі теплоізоляційні матеріали / [Е. Г. Братуга, А. М. Павленко, А. В. Кошляк, О. В. Круглякова]. – Харків: Едена, 2010. – 105 с.

37. Кошляк Г. В. Теплофізичні особливості формування пористої структури / Г. В. Кошляк. – Харків: ХВ, 2015. – 162 с.

38. Pavlenko A. Technical thermodynamics. / A. Pavlenko, H. Koshlak. – Oradea: University Press, 2015. – 136 p.

39. Szkarowski A. Hydrodynamika dyspersyjnego strumienia w komorach wirowych / A. Szkarowski, A. Pavlenko, H. Koshlak. – Koszalin: KTU, 2015. – 146 p.

40. The special aspects energy and resource savings / [H. Koshlak, N. Zotsenko, Y. Vynnykov and other]; unde the general editorship A. Pavlenko // Production thermal insulation of porous matherial / H. Koshlak. – Oradea: University Press, 2015. – С. 164-193.

41. Газогідрати. Гідратоутворення та основи розробки газових гідратів: монографія / [В. І. Бондаренко, О. Ю. Вітязь, М. Л. Зоценко [та ін.]; під ред. Г. Г.

Півняка, Є. І. Крижанівського, В. О. Онищенко. – Дніпропетровськ : Літограф, 2015. – 219 с.

АНОТАЦІЯ

Кошлак Г. В. Розвиток наукових основ утилізації відходів теплових електричних станцій для зменшення техногенного навантаження на довкілля – рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями: 21.06.01 – Екологічна безпека; 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України, м. Полтава, 2016.

Дисертацію присвячено теоретичному узагальненню нового вирішення важливої прикладної наукової проблеми утилізації промислових відходів теплових електричних станцій для зменшення техногенного навантаження на довкілля на прикладі впливу Бурштинської ТЕС на територію Галицького району.

У роботі досліджено якісний і кількісний вплив забруднень відходами Бурштинської ТЕС на екологічний стан довкілля. На основі отриманих даних запропоновані нові технології утилізації відходів Бурштинської ТЕС. Розроблено технологію рекультивзації золовідвалів. Експериментально та теоретично обґрунтовано нові технології утилізації золи шляхом створення ефективних пористих теплоізоляційних матеріалів (ТІМ); експериментально досліджено основні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в золі Бурштинської ТЕС під час її зберігання та впливу на неї вологи і температур, для обґрунтування нових технологій виробництва ТІМ. Експериментально та теоретично досліджено вплив складу золи на процеси гідратації цементних компонентів, встановлено кількісні характеристики цього впливу для обґрунтування технології утилізації сухої золи із золосховищ. На основі нових наукових результатів розроблено наукові принципи створення технологій виробництва будівельних матеріалів із вторинної сировини (золи).

Виконані дослідження дозволили створити науково-методологічні основи підвищення рівня екологічної безпеки виробництва енергії тепловими електричними станціями та одержання синергетичного ефекту захисту довкілля, а також – створення інноваційних матеріалів для теплового захисту енергетичних установок, будівель та споруд.

Ключові слова: утилізація техногенних відходів, технології термічного структуроутворення, теплопровідність пористого середовища, теплоізоляційні матеріали з керованими теплофізичними характеристиками, технології захисту навколишнього середовища.

АННОТАЦИЯ

Кошлак А. В. Развитие научных основ утилизации отходов тепловых электрических станций для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду – рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 21.06.01 – Экологическая безопасность; 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка Министерства образования и науки Украины, г. Полтава, 2016.

Диссертация посвящена экспериментальному обоснованию и теоретическому обобщению нового решения важной прикладной научной проблемы утилизации твердых промышленных отходов тепловых электрических станций для уменьшения техногенной нагрузки на окружающую среду (на примере влияния Бурштынской ТЭС на территорию Галицкого района).

В данной работе проведены исследования состояния окружающей среды и влияния отходов Бурштынской тепловой электрической станции на территории Галицкого района и здоровье населения. Исследованы состав золы-уноса и золы в хранилищах, проанализированы перспективы использования твердых отходов Бурштынской ТЭС в технологиях производства пористых теплоизоляционных материалов. На основе полученных данных предложены новые технологические схемы утилизации отходов Бурштынской ТЭС. Экспериментально и теоретически обоснованы технологии утилизации золы путем создания новых эффективных пористых теплоизоляционных материалов (ТПМ). Экспериментально исследованы основные физико-химические процессы, происходящие в золе Бурштынской ТЭС при ее хранении, воздействии на нее влаги и температур для обоснования новых технологий производства ТПМ. Экспериментально и теоретически исследовано влияние состава золы на процессы гидратации цементных компонентов, установлены количественные характеристики этого влияния для обоснования нового метода утилизации сухой золы в золохранилищах. Разработана технология рекультивации золоотвалов.

С помощью дифференциально-термического анализа исследованы основные физико-химические процессы, происходящие в золе Бурштынской ТЭС, а также закономерности реализации этих процессов в сырьевых смесях на основе золы Бурштынской ТЭС при ее гидратации, вспучивании, кристаллизации и твердении. Оптимизированы параметры технологического воздействия на указанные процессы. Полученная информация использована в предложенных технологиях утилизации золы.

На основе полученных результатов разработаны научные принципы создания технологий производства строительных материалов из вторичного сырья (золы).

Выполненные исследования позволили создать научно-методологические основы повышения уровня экологической безопасности производства энергии тепловыми электрическими станциями и получения синергетического эффекта защиты окружающей среды, а также создания инновационных материалов для тепловой защиты энергетических установок, зданий и сооружений.

Ключевые слова: утилизация техногенных отходов, технологии термического структурообразования, теплопроводность пористой среды, теплоизоляционные материалы с управляемыми теплофизическими характеристиками, технологии защиты окружающей среды.

ABSTRACT

Koshlak H.V. Development of scientific bases of thermal utilization of solid waste thermal power - Manuscript.

Thesis for scientific degree of doctor of technical sciences on specialties: 21.06.01 – Ecological safety; 05.14.06 – Technical thermal physics and industrial power. Poltava National Technical University named Yuri Kondratyuk Ministry of Education and Science of Ukraine, Poltava, 2016.

The dissertation is devoted to experimental and theoretical substantiation of the generalization of the new solution of important applied scientific problem of disposing of industrial solid waste thermal power plants to reduce the anthropogenic impact on the environment (for example, the influence of the Burshtyn TPS territory in the Galician region).

In this study we investigated the qualitative and quantitative impact of pollution waste Burshtyn thermal power plant on the environment Galitsky district, the ecological state of the environment, the impact of pollution on human health. The composition zolounosa and ash storage, analyzed the prospects of using BuTPS solid waste in technology production of porous insulating materials. Based on the data offered new technological schemes for recycling waste BuTPS. Theoretically and experimentally proved new technologies by creating ash disposal on the basis of new efficient ash porous heat-insulating materials (TPM). Experimentally studied the basic physical - chemical processes occurring in the ash BuTPS during storage and exposure to moisture and temperature to support the new TMP production technologies. Theoretically and experimentally investigated the influence of the composition of the ash on the hydration process of cement components to quantitative characteristics of this influence to justify the new method of utilization of dry ash in ash storages. A technology for reclamation of ash dumps.

This research will provide the scientific basis on which developed the scientific and methodological basis for improving the level of environmental safety of power generation by thermal power stations and produce a synergistic effect protect the environment on the basis of theoretical and experimental study of anthropogenic impact of TPS.

Key words: recycling of ash dumps, the thermal pattern formation technology, the thermal conductivity of the porous medium, heat-insulating materials with controlled thermal characteristics, environmental technology.

Кошлак Ганна Володимирівна

**Розвиток наукових основ утилізації відходів
теплових електричних станцій для зменшення техногенного
навантаження на довкілля**

Видавництво Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
тел. (03422) 42453, факс (03422) 42139,
<http://nung.edu.ua>, e-mail: public@nung.edu.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців
ІФ № 18 від 12.03.2002 р.

Підписано до друку 18.11. 2016 р. Формат 60x84 1/16 Папір офсетний

Ум. друк. арк. 2,8 Тираж 100 прим. Замовлення № 188