

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

ІНКІН ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК [622.272.6(477):622.278]:622.691/.692

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ГЕОТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ
ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ РЕСУРСІВ ВУГІЛЬНИХ РОДОВИЩ**

05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Дніпропетровськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гідрогеології та інженерної геології Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України

**САДОВЕНКО
Іван
Олександрович**

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент, начальник відділу з науки та інновацій компанії ДТЕК Енерго (м. Київ)

**ПЛЮГІН
Віталій
Іванович**

доктор технічних наук, професор, проректор з навчально-виховної роботи Рівненського державного гуманітарного університету Міністерства освіти і науки України

**ПЕТРІВСЬКИЙ
Ярослав
Борисович**

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри розробки родовищ корисних копалин Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (м. Красноармійськ) Міністерства освіти і науки України

**САХНО
Іван
Георгійович**

Захист відбудеться 1 липня 2016 р. о 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.03 у Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19, тел. (0562) 47-24-11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19, тел. (0562) 47-24-11).

Автореферат розісланий 1 червня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук

М.В. Петльований

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Займаючи 0,45 % загальносвітової поверхні суші, Україна за обсягами гірничодобувних робіт, які тривають понад 200 років і супроводжуються значним впливом на навколишнє середовище, входить до першої десятки країн світу. Для старих вугледобувних регіонів характерна суттєва техногенна перебудова геологічних структур і критична екологічна ситуація, що з урахуванням існуючої гострої проблеми нестачі та несинхронності споживання енергоносіїв свідчить про технологічне відставання країни у використанні природно-техногенних ресурсів зосереджених на відпрацьованих ділянках. До цих ресурсів відносяться залишені після відпрацювання шахтних полів залишкові та некондиційні запаси вугілля, підземні води, які знаходяться в затоплених гірничих виробках, і горючі гази слабопроникних вуглевмісних порід. Крім того, змінений в результаті гірничих робіт масив містить потужний ємнісний ресурс, здатний акумулювати рідкі та газоподібні енергоносії в обсязі, достатньому для згладжування сезонних коливань їх споживання.

Основною причиною такої ситуації є неузгодженість різних стадій розвідки, розробки і згортання гірничих робіт на вугільних родовищах. У техніко-економічних і геологічних прогнозах ефективності відпрацювання шахтних полів недостатньо розглядаються передумови формування й обсяги супутніх корисних компонентів і колекторів, гідротермальний ресурс яких оцінюється як негативний на етапі розробки вугільних пластів, а на етапі завершення гірничих робіт взагалі не враховується.

Для визначення умов формування та потенціалу техногенних гідротермальних родовищ, технологічного обґрунтування комплексного освоєння енергоємного ресурсу вугленосних площ та ліквідованих гірничодобувних підприємств, здатного на сучасному рівні економічної ефективності задовольнити потреби ринку країни у тепловій енергії, необхідні відповідні кількісні оцінки. Тому поєднання етапів відпрацювання вугільних родовищ на єдиній теоретичній основі, з визначенням параметрів геотехнологічних модулів з використання природно-техногенного ресурсу енергії та ємнісних властивостей підробленого масиву і суміжних площ, є актуальною і стратегічно важливою *науково-практичною проблемою*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень кафедри гідрогеології та інженерної геології Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» відповідно до «Енергетичної стратегії України до 2030 р.» і є складовою частиною держбюджетних і госпдоговірних НДР: «Геолого-гідрогеологічне та геофізичне обґрунтування параметрів експлуатації та акумуляції теплової енергії техногенних газогідротермальних родовищ Донбасу» (№ ДР 0111U002813); «Оптимізація параметрів гідро- і термодинамічних процесів в теплонасосних установках для утилізації геотермального тепла гір-

ничих підприємств» (№ ДР 0113U000409); «Експертно-аналітична оцінка формування водопритоків до проектної шахти «Любельська» (дог. № 040825); «Обґрунтування комплексу геотехнологічних модулів з використання природно-техногенного ресурсу родовищ корисних копалин України» (№ ДР 0115U002300), в яких автор є відповідальним виконавцем, а також грантів Дніпропетровської обласної та міської рад для молодих вчених за участю автора як наукового керівника.

Мета і завдання дослідження. *Метою дослідження є теоретичне та технологічне обґрунтування параметрів і схем формування та використання природно-техногенного теплового й ємнісного ресурсів відпрацьованих вугільних родовищ за допомогою комплексу геомодулів, які забезпечують їхню активізацію, відбір і зберігання синхронно з сезонною нерівномірністю споживання енергоносіїв.*

Поставлена мета досягається шляхом вирішення таких *завдань дослідження:*

1. Систематизація світового науково-практичного досвіду і встановлення балансу співвідношень природних і технологічних чинників відносно закономірностей формування енергетичного й ємнісного потенціалу вугленосних формацій в природних і техногенних умовах.

2. Розробка методики моделювання змін термодинамічного режиму водоносних колекторів при закачуванні, акумуляції та відборі теплоносіїв для обґрунтування параметрів тепло- і холодопостачання будівель.

3. Обґрунтування методики чисельної оцінки розмірів, форми і стійкості тріщин гідророзриву в щільних вуглевмісних породах з метою збільшення їх проникності та газовіддачі.

4. Визначення діапазону зміни параметрів напружено-деформованого стану і фільтраційних властивостей водонасичених колекторів при тривалому термобаричному впливі газоподібних вуглеводнів. Виконання балансово-гідродинамічної оцінки експлуатації газосховища в перспективному пласті-колекторі та розрахунок безповоротних втрат газу.

5. Обґрунтування геотехнології збільшення теплового ресурсу водоносних вуглевмісних порід за рахунок підземного спалювання некондиційних запасів вугілля з урахуванням необхідності підтримання заданого температурного режиму підземних вод.

6. Виконання кількісної оцінки теплоємнісного ресурсу затопленої шахти за допомогою чисельного моделювання й обґрунтування технологічних способів його освоєння для опалення та охолодження будівель.

7. Розробка геотехнологічних схем багатоцільового використання теплоенергетичного ресурсу вугільних родовищ у природних і техногенно змінених умовах.

Ідея роботи полягає в кількісній оцінці факторів і процесів утворення природно-техногенного ресурсу вугільних родовищ на завершальному етапі їх розробки для обґрунтування геотехнологічних схем його освоєння.

Об'єкт дослідження – термодинамічні, геологічні та технологічні фактори і процеси, які супроводжують формування та техногенні перетворення вугільних родовищ.

Предмет дослідження – геотехнологічні параметри нагнітання, зберігання та відбору енергоносіїв у відпрацьованих вугільних родовищах синхронно періодам їх зниженого та підвищеного споживання.

Методи дослідження. Для досягнення мети і вирішення поставлених завдань застосовано комплексний підхід, що містить: збір, систематизацію й аналіз фактичних даних про фільтраційні та фізико-механічні властивості вміщуючих порід і гірничотехнічні умови розробки пластів, які впливають на формування природно-техногенного ресурсу вугільних родовищ; аналітичні та чисельні методи рішення рівнянь гідрогазодинаміки та тепломасопереносу; математичне моделювання із застосуванням спеціального програмного забезпечення («Mathcad», «ANSDIMAT», «MODLOW», «Surfer»); методи статистики; стабілометричні випробування зразків водоносних порід на приладі тривісного стиснення (TriSCAN); проведення комплексу спеціальних лабораторних експериментів із вивчення впливу вуглеводневого газу на фільтраційні властивості колекторів; інженерний аналіз запропонованих геотехнологічних рішень і модулів.

Достовірність отриманих результатів і висновків підтверджується використанням фундаментальних законів гідрогазодинаміки та тепломасопереносу; коректним застосуванням методів математичної статистики; показниками моніторингу в гірничопромислових регіонах України та інших країнах; узгодженістю теоретичних положень з результатами експериментальних досліджень; подібністю виконаних прогнозів з фактичними даними при вирішенні обернених задач (відносна похибка близько 10 %); результатами апробації розробок і рекомендацій на реальних об'єктах.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Уперше:

– розроблена і протестована просторова нестационарна модель переносу тепла, яка відтворює напрямок фільтрації, швидкість і температуру підземних вод при нагнітанні та відборі теплоносіїв з водоносного горизонту, для опалення й охолодження будівель з урахуванням температури зовнішнього повітря;

– виконана аналітична та експериментальна оцінка зміни об'ємної деформації, фізико-механічних і фільтраційних властивостей водоносних колекторів при їх тривалому контакті з вуглеводневим газом під необхідним технологічним тиском;

– досліджений механізм теплопереносу в затопленому гірничому масиві ліквідованої шахти, що супроводжується періодичним закачуванням та відбором шахтних вод різних горизонтів, а також їх нагріванням природним геотермічним теплом і підземним спалюванням залишкових запасів вугілля.

2. *Удосконалено* кількісний опис механізму формування і закріплення тріщин гідравлічного розриву в щільних вуглевмісних породах Донбасу на основі вивчення закономірностей руху рідини і пропантів, які закачуються в тріщину.

3. *Дістала подальшого розвитку* концепція збільшення теплового ресурсу водоносних горизонтів за рахунок підземного спалювання вугілля (ПСВ) з кількісними оцінками температури підземних вод у різних гірничотехнічних і геолого-гідрогеологічних умовах.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Чисельна модель фільтраційного теплопереносу у водоносному горизонті збігається з класичним рішенням термодинаміки з точністю до 2 °С, що дозволило для гідрогеологічних і кліматичних умов Донбасу встановити коефіцієнт акумуляції теплової енергії геоциркуляційної системи, за рахунок збереження літнього тепла і зимового холоду в порушених водоносних пластах у діапазоні 0,8 – 0,9, що задовольняє світовим нормативам ефективного застосування теплообмінників у геологічних структурах.

2. Нетоксичні розклинювальні матеріали, які нагнітаються в тріщину гідророзриву в слабопроникних вугленосних породах з перевищенням критичної швидкості їх руху, дозволяють нелінійно збільшити дебіт газу від 1,9 до 2,8 разів для умов Новомосковського кам'яновугільного родовища, що в комплексі з оціненим ємнісним ресурсом Левенцовської структури забезпечує регіональне регулювання газоспоживання.

3. При спалюванні некондиційного вугільного пласта затопленої шахти у водоносному горизонті основної покрівлі накопичується понад 60 % тепла, яке надходить з реакційного каналу, що дозволяє залежно від потужності розділюючого шару порід безпосередньої покрівлі і стадії спалювання підвищити температуру підземних вод до 40 – 90 °С і шляхом їх відбору збільшити коефіцієнт корисної дії запатентованої геотехнології на 18 – 25 %.

4. Сумарні тепловтрати в процесі відбору, накопичення і зберігання шахтних вод не перевищують 15 %, а їх застосування з температурою 26 – 28 °С реалізується з коефіцієнтом перетворення тепла до 7,5, що дозволяє ефективно використовувати тепловий та ємнісний ресурси затоплених шахт за рахунок сезонного відбору та закачування вод різних горизонтів за двома технологічними варіантами: перший – шляхом використання шахтних вод як низкопотенційного джерела енергії в теплових насосах; другий – підвищенням їх температури шляхом підземного спалювання залишкових запасів вугілля.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей перебігу геотехнологічних процесів при розробці вугільних родовищ, які призводять до формування природно-техногенного ємнісного і енергетичного ресурсів, а також визначенні схем їх використання на основі розроблених моделей теплопереносу та гідрогазодинаміки в порушеному породному масиві.

Практичне значення роботи:

1. Обґрунтований алгоритм оцінки параметрів роботи геоциркуляційної системи, яка забезпечує опалення і охолодження будівель за рахунок збереження літнього тепла і зимового холоду у техногенно змінених водоносних пластах.

2. Розроблена методика розрахунку розмірів, форми і параметрів закріплення тріщини гідророзриву в слабопроникних метанонасичених породах, що дозволяє прогнозувати збільшення їх газовіддачі і дебітів свердловин з урахуванням специфіки вітчизняного обладнання.

3. Обґрунтована методика оцінки напружено-деформованого стану і фільтраційних властивостей водоносних колекторів при закачуванні, зберіганні та відборі газоподібних вуглеводнів, яка більш точно визначає геотехнологічні параметри роботи сховищ газу.

4. Виконана балансово-гідродинамічна оцінка заповнення перспективного пермсько-тріасового водоносного горизонту Левенцовської структури природним газом у кількості, достатній для синхронізації сезонної нерівномірності споживання в регіоні.

5. Розроблений і запатентований спосіб підземного спалювання малопотужних вугільних пластів, що дозволяє нагрівати підземні води покриваючих порід і використовувати їх як теплоносії.

6. Обґрунтовані параметри експлуатації геотехнологічного модуля для багаторазового використання теплового ресурсу затоплених виробок шляхом відбору та закачування шахтних вод різних горизонтів для тепло- і холодопостачання будівель.

Реалізація результатів досліджень. Розробки автора використано при складанні «Методики оцінки термодинамічних показників підземних вод при підземному спалюванні вугілля», затвердженої міжнародним центром проблем надрокористування «Геополітика», у технічних завданнях із обґрунтування раціональних параметрів і режимів роботи гідротермального модуля в умовах шахти «Новгородівська 2» та оцінки термодинамічного ресурсу шахтних вод шахти «Благодатна» для теплопостачання інженерних споруд, затверджених інститутом «Дніпродіпрошахт» та компанією ДТЕК, а також запатентовані у «Способі отримання теплової енергії при підземній газифікації вугілля». Результати дисертаційної роботи застосовувалися в навчальному процесі Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» при проведенні лекційних і практичних занять з курсів «Гірничопромислова гідрогеологія» та «Моделювання гідрогеологічних та інженерно-геологічних процесів», у курсовому і дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Автором сформульовано мету, ідею і наукові положення роботи. Обґрунтована методологія прогнозування формування природно-техногенного ресурсу вугільних родовищ, створені й апробовані на реальних об'єктах моделі гідрогазодинаміки та теплопереносу для вугільних родовищ, проведені лабораторні дослідження з оцінки впливу акумульованого вуглеводневого газу на фільтраційні та фізико-механічні властивості пласта-

колектора. Запропоновані технічні рішення, спрямовані на освоєння енергетичного й ємнісного ресурсів геологічних структур, які розробляються.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на наукових конференціях і симпозіумах: «Наукова весна» (Дніпропетровськ, 2010, 2011); «Исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, Росія, 2010); «Географія, геоекологія, геологія: досвід наукових досліджень» (Дніпропетровськ, 2010); «Неделя горняка» (Москва, Росія, 2010); «Інновації та трансфер технологій: від ідеї до прибутку» (Дніпропетровськ, 2011); «Сталий розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2012); «Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту» (Дніпропетровськ, 2014); «Сучасні технології ведення буропідривних робіт, їх економічна ефективність і техногенна безпека» (Кременчук – Бургас, Україна – Болгарія, 2014); «Розвиток інформаційно-ресурсного забезпечення освіти і науки у гірничо-металургійній галузі і на транспорті» (Дніпропетровськ, 2014); «Проблеми теоретичної і прикладної мінералогії, геології, металогенії гірничодобувних регіонів» (Кривий Ріг, 2014); «Colloque International Hydrogéologie & Géothermie» (Гельма, Алжир, 2014); «Молодь: наука та інновації» (Дніпропетровськ, 2014, 2015); «Форум гірників» (Дніпропетровськ, 2015).

Публікації. Основні наукові положення опубліковані у 39 наукових працях, у тому числі: статей у фахових виданнях – 27, з яких 9 – у закордонних виданнях; монографія – 1; матеріалів конференцій – 10, патент на винахід – 1.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 221 найменування і містить 117 рисунків, 47 таблиць та 4 додатки. Загальний обсяг роботи 322 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність обраної теми, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами; поставлена мета і сформульовані завдання дослідження; викладена ідея, об'єкт, предмет і методи дослідження; представлені наукові положення, які виносяться на захист; зазначена наукова новизна отриманих результатів, їх достовірність, наукове і практичне значення роботи; розкрита реалізація результатів роботи, а також особистий внесок автора, висвітлена апробація роботи та публікації за напрямками досліджень.

Розділ 1. Паливно-енергетичні особливості і геологічна оцінка невикористовуваних теплових, газових і ємнісних ресурсів вугільних родовищ, присвячений оцінюванню об'єкта і предмета дослідження, а також рівня вивчення наукової проблеми, за якими поставлені мета і завдання дослідження. Шляхом проведеного детального аналізу екологічного навантаження, динаміки споживання і дефіциту теплової енергії у вугледобувних регіонах України показано, що сучасна ситуація зумовлює необхідність пошуку альтернативних енергоносіїв, які мінімізують вплив на навколишнє середовище, та резервуарів, зда-

тних синхронізувати сезонну нерівномірність їх споживання. Разом з тим, встановлено, що у сформованому в результаті тривалого ведення гірничих робіт природно-техногенному породному масиві зосереджена велика кількість герметичних колекторів (геологічні структури, гірничі виробки) і теплоносіїв, які умовно можна поділити за агрегатним станом на газоподібні (газ щільних вуглевмісних порід), рідкі (шахтні і підземні води) і тверді (некондиційні та забалансові запаси вугілля).

Вугільні родовища, будучи основною паливно-енергетичною базою країни, останніми роками розглядаються ще і як великі газові райони, які містять значні ресурси вуглеводневого газу у слабопроникних породах. Україна посідає третє місце в Європі та тринадцяте в світі за ресурсами цього виду палива. Його кількість сягає 8 трлн м³, у той час як запаси традиційного газу не перевищують 1 трлн м³. У затопленому відпрацьованому масиві зосереджено значні запаси теплової енергії, до яких належать накопичена в шахтних водах геотермальна енергія і некондиційні та малопотужні вугільні пласти, залишені після відпрацювання шахтного поля. Кількість невикористаного вугілля може сягати 30 – 50 % розвіданих запасів шахти, а температура підземних вод, які заповнюють її глибокі горизонти, доходять до 33 – 35 °С. Крім того, відпрацьовані вугільні родовища володіють потужним ємнісним ресурсом, представленим проникними пластами-колекторами та затопленими гірничими виробками, здатними акумулювати значні обсяги теплоносіїв. При цьому кількість планованих до закриття вугільних підприємств у відповідності з різними реструктуризаційними програмами постійно збільшується.

Питання розробки і використання природно-техногенного ресурсу вугільних родовищ досліджувались у роботах великої кількості науковців, серед яких особливої уваги заслуговують праці В.Ж. Аренса, Ю.В. Крейнїна, П.В. Скафи, Р.М. Пітіна, І.Д. Юдіна, І.Л. Фарберова, Г.О. Нусінова, М.К. Реви, І.О. Садовенка, В.І. Бондаренка, Я.Б. Петрівського, Р.О. Дичковського, В.І. Пілюгіна, І.Г. Сахна, О.В. Колоколова, М.М. Табаченка та ін.

Особливості акумуляції теплоносіїв у геологічних структурах, багатозафазної фільтрації та стійкості водно-газового контакту в анізотропних гірських породах знайшли відображення у роботах І.А. Чарного, Є.В. Левикіна, А.Л. Хейна, М.В. Лур'є, К.С. Баснеєва, Р.Д. Канівської, М.М. Дмитрієва, В.М. Максимова, Д.В. Рудакова, В.В. Лукінова, К.А. Безручка, Р.М. Кондрата, М.Д. Середюка, Чень Чжунь-Сяна та ін.

На основі аналізу робіт встановлено, що більшість способів розробки та зберігання природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ спрямовані на окремі види енергоносіїв, у той час як для економічно ефективного освоєння вугленосних площ необхідне обґрунтування комплексної геотехнології, яка забезпечує видобуток енергоносіїв в єдиному технологічному циклі з їх сезонним на-

копиченням у природних колекторах. Це вимагає розробляти нові та вносити доповнення в існуючі фізико-хімічні способи розробки рідких, газоподібних і твердих енергоносіїв, зосереджених у відпрацьованих та суміжних шахтних полях, встановлювати характеристики, які відображають кількісні взаємозв'язки між інтенсивністю видобутку енергоносіїв, динамікою їх споживання та зберігання у відповідності із зовнішньою температурою. Також необхідне врахування зміни фільтраційних і фізико-механічних властивостей гірських порід при тривалому акумулюванні газоподібних вуглеводнів для виконання балансово-гідродинамічної оцінки експлуатації водоносних газосховищ у перспективних пластах-колекторах.

Напрямок технологічного удосконалення в освоєнні природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ слід зосереджувати на підвищенні коефіцієнту корисної дії існуючих геотехнологій, більш повному використанні теплових і ємнісних ресурсів вуглевмісних порід, а також на узгодженні стадії і інтенсивності розробки енергоносіїв з необхідними обсягами їх споживання та зберігання. Отримані технологічні рішення повинні відповідати світовим нормативам раціонального застосування геомодулів на шахтних полях і забезпечити видобуток енергоносіїв в єдиному циклі з їхнім сезонним зберіганням у природних колекторах, що сприятиме зміцненню енергетичної безпеки країни і тому є важливою науково-технічною проблемою та основою формулювань наукових завдань роботи.

Розділ 2. Розробка й обґрунтування моделей акумуляції теплоносіїв у водоносних горизонтах і активізації газовиділення з слабопроникних колекторів, містить вирішення 2 і 3-го завдань роботи. Поставлені у дисертаційній роботі завдання показали необхідність розробки математичної моделі переносу тепла при закачуванні та відборі теплоносіїв з водоносних порід. Дана модель заснована на двовимірних рівняннях фільтрації підземних вод і перенесення тепла в них за рахунок конвекції та кондукції

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Km \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Km \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q_{\Sigma} - \frac{K_1}{m_1} (H_1 - H) - \frac{K_2}{m_2} (H - H_2) = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda m}{C_w \rho_w n} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{v_x m}{n} T \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda m}{C_w \rho_w n} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{v_y m}{n} T \right) + \frac{mq_{\Sigma} - q_b - q_t}{C_w \rho_w n} = m R_T \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

$$H_{\Gamma} = H_0; T_{\Gamma} = T_0; H(x, y, 0) = H_0; T(x, y, 0) = T_0; \quad (3)$$

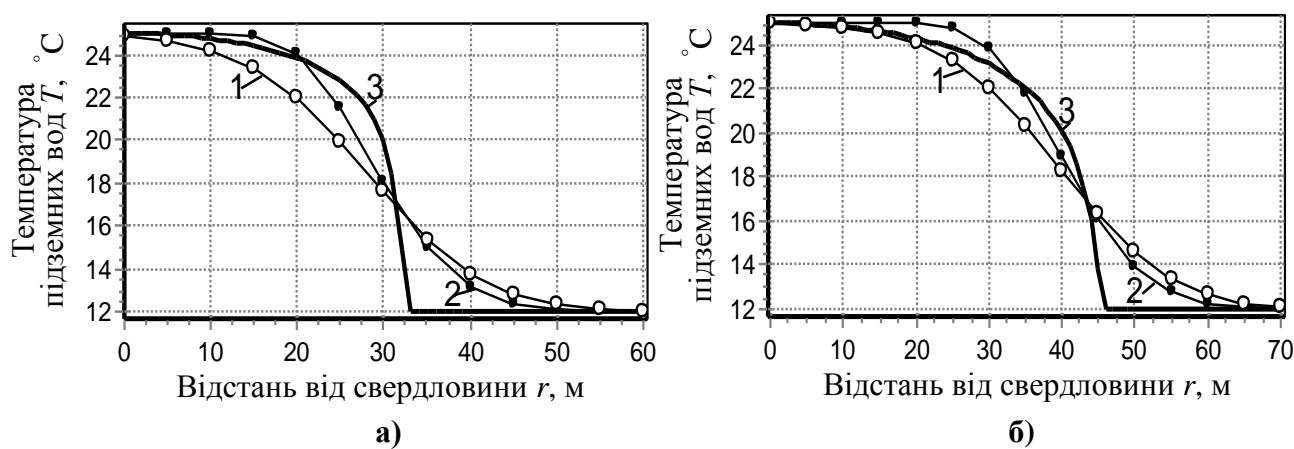
які враховують витоки тепла через покрівлю і підшову акумулюючого пласта

$$q_t = - \frac{\lambda}{n} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=m}; \quad q_b = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (4)$$

де $R_T = 1 + ((1 - n) / n) \cdot (\rho_{sk} C_{sk}) / (\rho_w C_w)$; K – коефіцієнт фільтрації, м/с; m – потужність водоносного горизонту, м; K_1 і m_1 , K_2 і m_2 – відповідно ті ж параметри його покрівлі та підшови; H , H_1 і H_2 – напір в акумулюючому горизонті, вер-

хньому та нижньому водоносних пластах, м; Q_{Σ} – змінна в часі і розподілена за площею сумарна інтенсивність відбору і нагнітання води свердловинами, м/с; λ – коефіцієнт теплопровідності порід акумулюючого горизонту, Вт/(м·К); S_s – пружноємність пласта, ч. од; ρ_w , ρ_{sk} – густина води і щільність скелета порід, кг/м³; C_w , C_{sk} – питома теплоємність води і скелета порід, Дж/(кг·К); T – температура води, К; q_t і q_b – теплові потоки з горизонту в його покрівлю і підошву, Вт/м²; q_{Σ} – розподілена в обсязі пласта інтенсивність джерел і стоків тепла, Вт/м³; n – пористість порід, ч. од.

Обчислювальна реалізація моделі переносу тепла виконана за допомогою програми Modflow 2009, призначеної для скінченно-різницевого розв'язку рівнянь фільтрації і перенесення у водоносних горизонтах. Коректність моделі доведена на основі аналітичного рішення Ловерьє для окремої свердловини. У розрахунках розглядалася наступна схема акумуляції та відбору теплової енергії: у водоносний пласт потужністю 20 м протягом 3 місяців через одну свердловину виконується закачування води з температурою 25 °С і дебітом 300 м³/доб, потім, після паузи тієї ж тривалості, проводиться відкачка теплої води з свердловини з тим же дебітом. Початкова температура підземних вод приймалася рівною 12 °С. Порівняння результатів показує узгодженість чисельної моделі з аналітичним рішенням, при цьому максимальні відхилення між профілями температури по відстані від свердловини, розрахованими двома методами, не перевищують 2 °С (рис. 1).



1 – чисельне рішення при значенні $\lambda = 1,73$ Вт/(м · К);
2 – чисельне рішення при $0,02 \lambda$; 3 – аналітичне рішення

Рисунок 1 – Розподіл температури підземних вод навколо нагнітальної свердловини в моменти часу 90 (а) і 180 (б) діб

За допомогою розробленої моделі проведена термогідродинамічна оцінка роботи геоциркуляційної системи, яка призначена для тепло- і холодопостачання будівель у кліматичних умовах Донбасу і складається з трьох «теплих» і «холодних» свердловин. Шляхом моделювання оцінено зміну температури і рівня підземних вод при їх відборі і нагнітанні з пласта колектора. Аналіз отриманих результатів показав, що температура теплоносіїв у періоди простою системи практично не змінюється, однак у період відбору в «теплій» свердловині вона

зменшується на 20 % і до його закінчення знижується до 19 °С. При цьому коефіцієнт акумуляції тепла в середньому складе 0,85, що перевищує зарубіжний промисловий досвід зберігання теплової енергії у водоносних породах (рис. 2). Стрілками показані напрямки течії підземних вод.

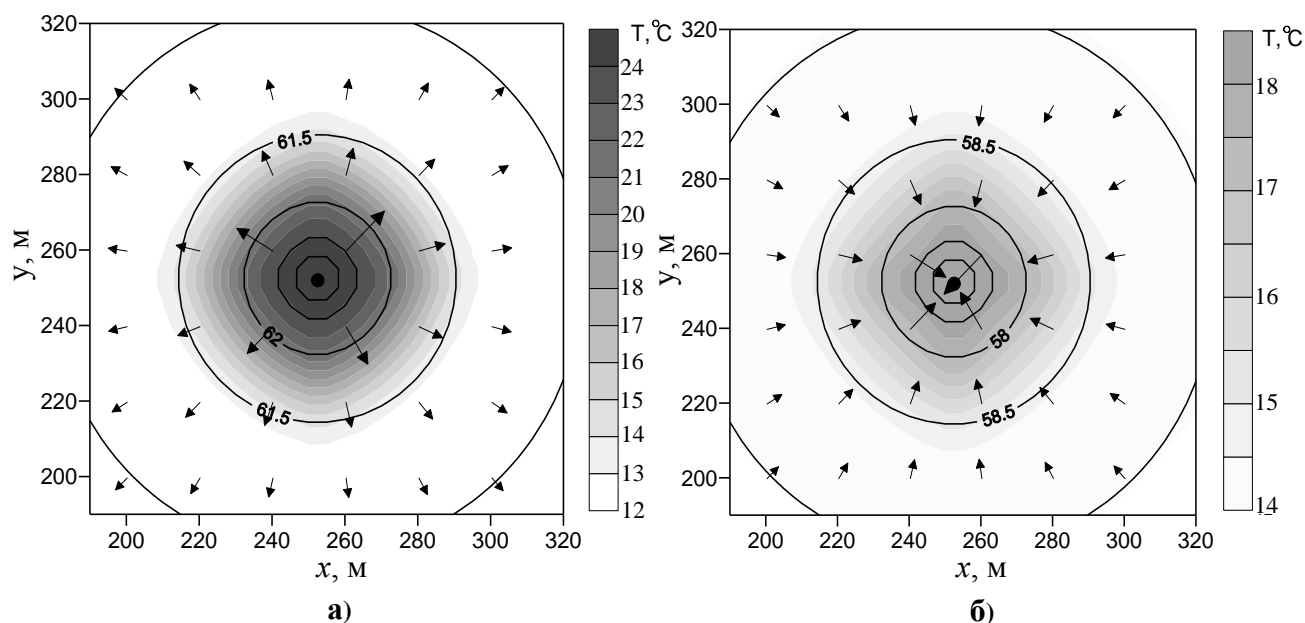


Рисунок 2 – Розподіл рівня підземних вод (ізолінії абсолютних відміток) та їх температури T (відтінки сірого кольору) по площі (x Ч y) водоносного горизонту: на момент закінчення закачування (а) та після паузи та відкачування води (б)

Співвідношення розрахованих параметрів показує, що система підземного акумулювання в опалювальний період у середньому покриває 20 % теплових навантажень, які виникають в мікрорайоні з 3 тис. мешканців. Однак температура отриманих теплоносіїв не задовольняє вимогам, що необхідні для теплопостачання будівель, але дозволяє використовувати їх як низькопотенційне джерело енергії в теплових насосах. У період охолодження система спільно зі зрошувальними форсуночними камерами покриває 90 % виникаючих навантажень.

До практично невикористаних природно-техногенних ресурсів вугленосних площ належать горючі гази, які насичують слабопроникні вміщуючі породи. Ефективна розробка цього енергоносія може бути здійснена шляхом обґрунтування комплексної технологічної інфраструктури його вилучення з щільних порід із застосуванням сучасних технологій активізації газовиділення й адаптації цих технологій до вітчизняного обладнання. Для виконання розрахункових оцінок було вибрано Новомосковське кам'яновугільне родовище, в геологічній будові якого беруть участь докембрійські кристалічні породи, комплекс девону, карбону, пермі та юри, а також четвертинні утворення. Найважливішими характеристиками цих порід як колекторів природних газів є їх пористість і проникність, що визначають ємність відкладень. За наявними даними встановлено, що

максимальний вміст вуглеводневого газу на досліджуваній площі зосереджений в пісковиках на глибині 700 – 800 м.

Для збільшення проникності та газовіддачі виділеного колектора необхідно провести його гідравлічний розрив, оснований на механічній дії на пласт рідини, яка закачується через свердловину під надлишковим тиском. Оскільки на цих глибинах найменші напруження в породному масиві орієнтовані горизонтально, то тріщина розриву матиме вертикальну спрямованість, а її розміри і форма можуть бути визначені за аналітичними залежностями (Желтов, Гертсман, Перкінс-Керн). Згідно з розрахунками, залежно від витрати рідини ($Q_{pid.} = 0,01 - 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$), в даних гірничо-геологічних умовах довжина тріщини змінюється від 10 до 40 м, а ширина – від 2 до 5 см. Отримані розміри використовувалися для оцінки проникності та газовіддачі пласта-колектора після проведення гідравлічного розриву. Для порівняння у проведених розрахунках контур живлення свердловини приймався у формі кола (рис. 3, криві 1, 2) і еліпса (рис. 3, криві 3, 4) з початковою проникністю вуглевміщуючих порід 10^{-14} і $5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ відповідно. Результати розрахунків за обома схемами добре узгоджуються і дозволили встановити для умов Новомосковського родовища збільшення інтенсивності відбору газу (Q_2 / Q_0) від 1,9 до 2,8 разів.

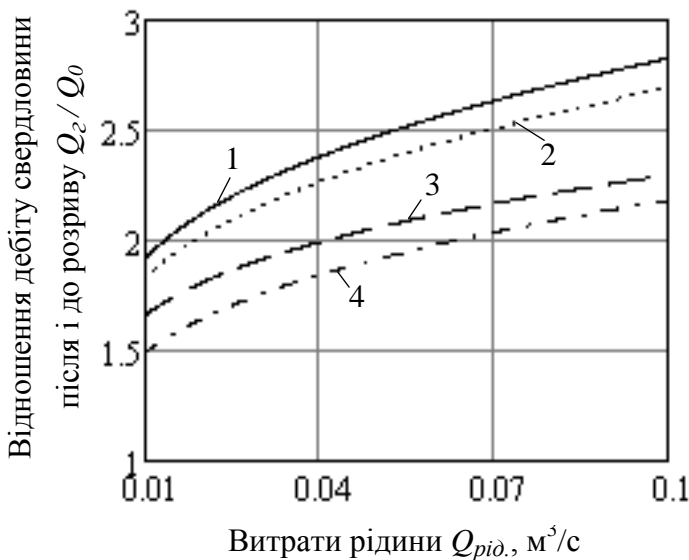


Рисунок 3 – Залежність збільшення дебіту вуглеводневого колектора від витрати рідини при гідравлічному розриві

З метою утримання тріщини після розриву в розкритому стані необхідне її заповнення нетоксичними розклинювальними матеріалами. Для сталого нагнітання матеріалів потрібно встановити критичну швидкість їхнього руху. Це було виконано шляхом вирішення рівняння гідротранспортування чисельним та аналітичним методами. Розрахунки за обома методами добре узгоджуються і дозволили встановити залежності критичної швидкості перенесення пропантів від їх діаметра та густини, а також фізико-хімічних властивостей рідини, яка їх транспортує.

Розділ 3. Дослідження гідродинамічних і геомеханічних параметрів зберігання газу у водоносних структурах, складається з вирішення 4-го завдання роботи. На основі аналізу геолого-структурних і гідрогеодинамічних умов визначені регіональні та локальні критерії оцінки можливості закачування вуглеводневого газу в обводнені породи. З їх допомогою, для зберігання передбачуваного до видобування з Новомосковського родовища горючого газу і згладжування сезонних коливань його споживання на південному сході України,

було проведено районування Західного Донбасу за умов акумулювання газоподібних вуглеводнів. Згідно з проведеними дослідженнями, перспективний ємнісний ресурс має Левенцовська геологічна структура, в розрізі якої знаходиться пермсько-тріасовий водоносний горизонт, представлений однорідним за гранулометричним складом кварц-польовошпатовим піщаником. Обробка даних дослідно-фільтраційних робіт показала, що води виділеного колектора непридатні для будь-якого виду водопостачання, а його коефіцієнти фільтрації та п'єзопрвідності змінюються в межах 1,5...3,6 м/добу і 4...9·10⁶ м²/добу, що дозволяє розглядати цей водоносний пласт як перспективне газосховище.

З метою оцінки зміни фільтраційних властивостей виділеного колектора в результаті закачування і відбору газу була проведена чисельна й експериментальна оцінка його об'ємної деформації

$$\frac{dV_n}{V_n} = \beta_n d(\sigma - P) + \beta_{m\epsilon} dP; \quad (5)$$

$$\frac{dV_{m\epsilon}}{V_{m\epsilon}} = \frac{1}{(1-n)} \beta_{m\epsilon} d(\sigma - P) + \beta_{m\epsilon} dP, \quad (6)$$

де V_n , $V_{m\epsilon}$ – об'єм порового простору і твердої фази пласта, м³; β_n , $\beta_{m\epsilon}$ – коефіцієнти стиснення пор і скелета породи, Па⁻¹; σ – нормальне напруження, Па; P – поровий тиск, Па.

Через те, що в процесі експлуатації газосховища зміна тиску в колекторі не перевищує 60 МПа, коефіцієнт стиснення твердої фази приймався постійним, а порового простору – встановлювався за емпіричними залежностями, а також шляхом стабілометричних випробувань на приладі тривісного стиснення TriSCAN. Об'ємна деформація пласта (dV) при заданому тиску знаходилася як сума деформацій порового простору і твердої фази, після чого проводився розрахунок його фільтраційних і дифузійних властивостей.

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільш точно з експериментальною кривою зміни об'ємної деформації збігається крива, побудована з використанням коефіцієнта стиснення пор, встановленого за залежністю Щелкачова. Значення цього коефіцієнта використовувалося в подальших розрахунках. Доказано, що в діапазоні тисків від 2,5 до 3,5 МПа, характерному для експлуатації газосховищ у водоносних пластах, відбувається 4 % збільшення об'єму і проникності колектора (рис. 4). При цьому щільність порід, їх наведена ємність поглинання й адсорбційна активність зменшуються відповідно на 2; 1,5 і 1 %.

Для визначення конструктивно-

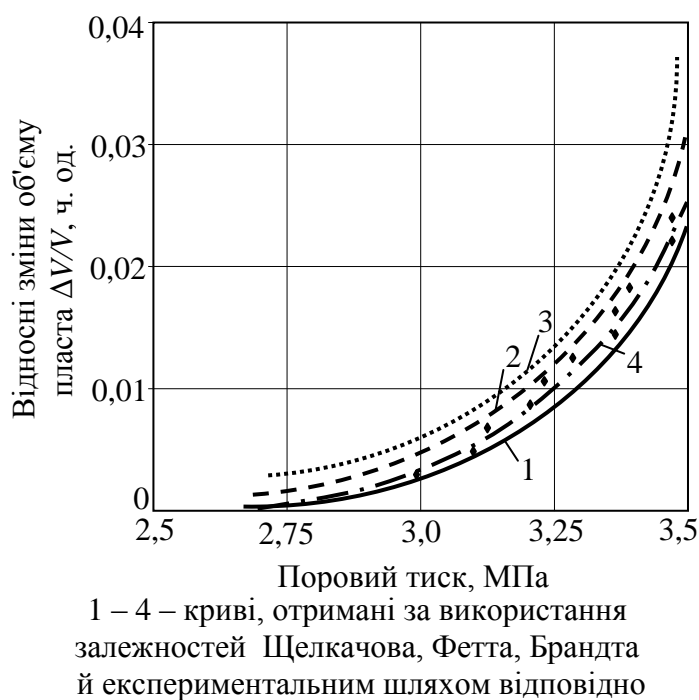
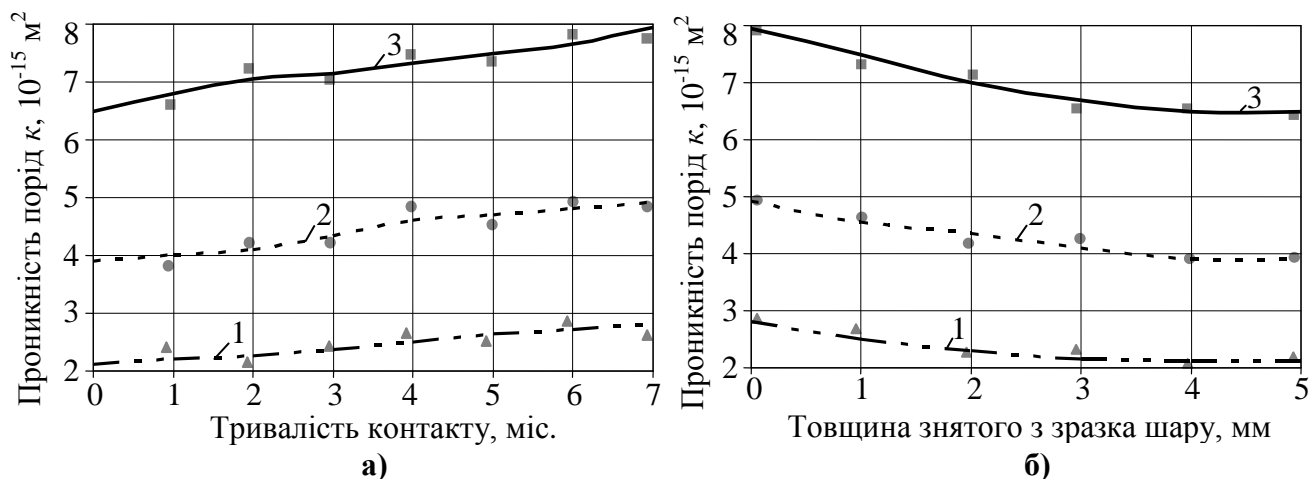


Рисунок 4 – Залежність об'єму пласта-колектора від зміни порового тиску

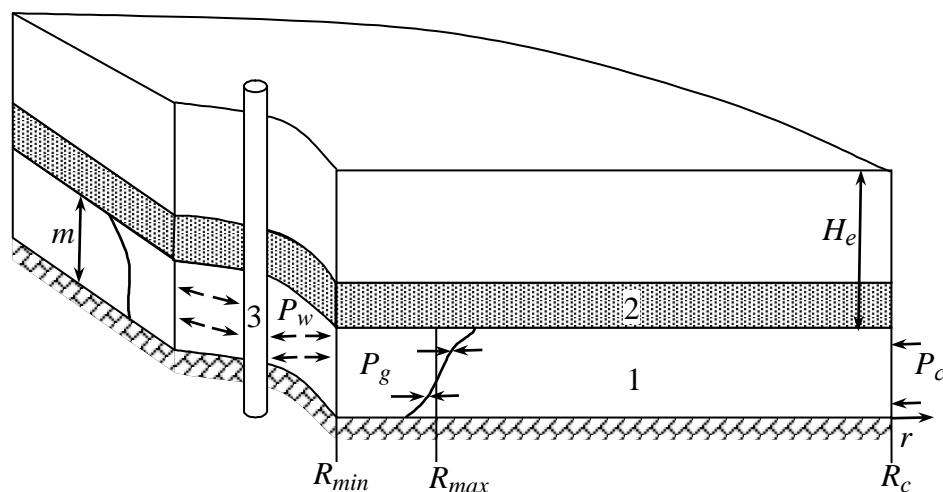
го впливу вуглеводневого газу на акумулюючі породи був проведений комплекс спеціальних лабораторних досліджень, який полягав у тривалому впливі пропан-бутанової суміші на літотипні аналоги пласта-колектора, його покрівлі та підшви. Перед розміщенням зразків у герметичну камеру і після цього періодично проводилося визначення їх абсолютної проникності на стабілометрі. Визначено, що проникність більшої частини зразків збільшилася на 15 – 20 %. При цьому деструктивні зміни відбуваються в приповерхневій зоні порід, товщина якої не перевищує перших одиниць міліметрів, що не створює загрозу розгерметизації сховища (рис. 5).



1 – 3 – відповідно глинистих пісків, крупнозернистих і алевролітових пісковиків

Рисунок 5 – Зміна проникності зразків порід Левенцовської структури при контакті з вуглеводневим газом (а) і рівномірному видаленні породи з їх поверхні після цього (б)

Встановлені зміни фільтраційних і фізико-механічних властивостей колектора використовувалися при виконанні балансової оцінки його заповнення газоподібними вуглеводнями. Для геологічних умов Левенцовської площі застосована схема пласта-колектора потужністю (m) 120 м, перекритого зверху і знизу слабо-проникними відкладеннями, що обумовлює напір у підземних водах (H_e). Газова зона наближено приймає форму циліндра, радіус якого при закачуванні та відборі газу змінюється від R_{max} до R_{min} . Більш точно форма цієї зони схожа на усічений конус, розширений зверху через різницю густин газу і води (рис. 6).



1 – пласт-колектор; 2 – водотрив; 3 – свердловина

Рисунок 6 – Розрахункова схема газосховища у горизонтальному водоносному пласті

У процесі експлуатації водоносного газосховища тиск у газовій зоні в період нагнітання буде змінюватися від P_w (тиск у свердловині) до $P_{g, min}$ (тиск на межі розділу фаз). При цьому для стабільного газо-водовитіснення необхідно постійне дотримання умови $P_{g, min} > P_c$ (тиск на контурі живлення пласта), яка забезпечує розширення газової зони. Тиск у свердловині має у 2 – 3 рази перевищувати тиск у пласті, що для розглянутого випадку дає $P_w = 5 - 6$ МПа. У процесі відбору тиск у газовій зоні повинен бути трохи більше, ніж у свердловині для підтримки стабільного дебіту.

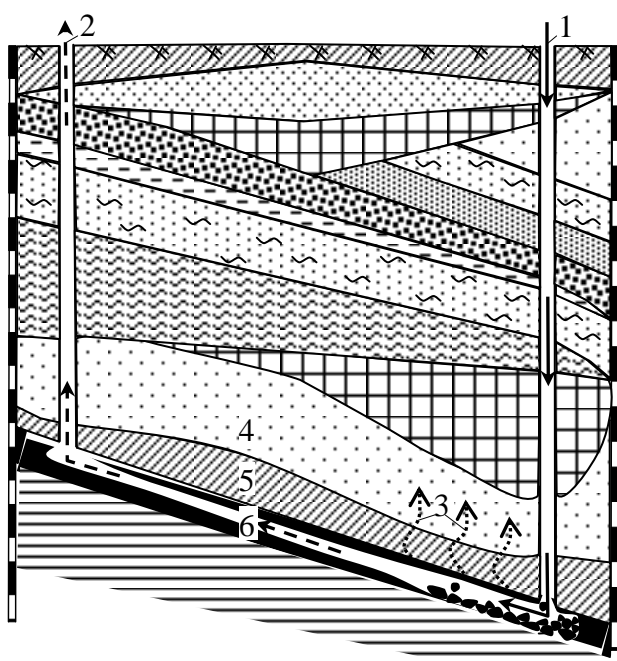
Відповідно до розрахунків, які ґрунтуються на рівняннях фільтрації газу і динаміки підземних вод, при закачуванні 150 млн м³ активного і буферного газу радіус (R) і площа (S) утворюваної газової зони не перевищують 560 м і 1 км². Отримані розміри значно менші території Левенцовської площі (1930 км²) і свідчать про можливість локалізації газосховища в її межах. При цьому мінімальний та максимальний об'єм водоносного газосховища складе 5,82 млн. м³ та 11,6 млн. м³, що не перевищує 0,05 % активних пор у пласті-колекторі (табл. 1).

Таблиця 1 – Оцінені розміри газової зони у Левенцовській структурі

| Пористість, ч. од. | Радіус газової зони, м | | Площа газової зони, км ² | |
|--------------------|------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| | R_{min} | R_{max} | S_{min} | S_{max} |
| $n_{min} = 0,1$ | 395 | 555 | 0,48 | 0,98 |
| $n_{max} = 0,3$ | 248 | 350 | 0,19 | 0,38 |

Оцінка безповоротних втрат газу на всіх етапах роботи водоносного газосховища виконана згідно з методикою, яка базується на комплексному врахуванні гірничо-геологічних, фізико-хімічних і технологічних чинників. Встановлено, що максимальні величини втрат газу відповідають періодам його нагнітання у сховище, а мінімальні – періодам відбору. Сумарний об'єм втрат газу відповідає світовому досвіду експлуатації газосховищ і не перевищує 4,5 % його кількості в пласті-колекторі.

Розділ 4. Обґрунтування можливості активізації теплового ресурсу водоносних вуглевміщуючих порід за рахунок підземного спалювання вугілля, стосується вирішення 5-го наукового завдання. Перспективним способом розробки зосереджених на відпрацьованих ділянках залишкових та некондиційних запасів вугілля є підземне спалювання, що незважаючи на віковий досвід розвитку і істотні переваги (ліквідація небезпечної праці гірників, скорочення зростання обсягу породних відвалів і підвищення стійкості природного середовища) не отримало широкого поширення через низький ККД, який визначається як відношення зосередженого у горючому газі тепла до загального тепла спалюваного палива. Для підвищення цього показника у дисертаційній роботі розроблений спосіб який заснований на відборі підземних вод, що нагріваються при підземному спалюванні вугілля і розроблена математична модель, яка описує даний процес (рис. 7).



1 – 3 – відповідно напрямок руху дуття, горючого газу і теплового потоку;
4 – 6 – водоносний, розділяючий і вугільний пласти

Рисунок 7 – Проектна схема нагріву підземних вод при ПСВ

ρ_g – густина газу, кг/м^3 , C_g – теплоємність газу, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; μ_g – в'язкість газу, $\text{Па}\cdot\text{с}$; T_g – температура газу, К ; P_g – тиск газу у реакційному каналі, Па ; κ – проникність порід покрівлі, м^2 ; λ_p – коефіцієнт теплопровідності порід покрівлі, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; T_w – природна температура води у водоносному горизонті, К ; L_g – довжина шляху фільтрації газу до рівня, де підтримується атмосферний тиск, м .

Реалізований принцип збільшення площі конвективного (S_{cv}) і кондуктивного (S_{cd}) теплообміну за рахунок розвитку зони спалювання в часі адекватно відображає зміни теплового потоку залежно від потужності водотриву і стадії

Розроблена модель фільтрації та теплопереносу в обводнених породах покрівлі при спалюванні вугільного пласта дозволяє визначати конвективну і кондуктивну складові теплового потоку, який надходить з реакційного каналу у водоносний горизонт основної покрівлі

$$q_0(t) = q_{cv}(t) + q_{cd}(t); \quad (7)$$

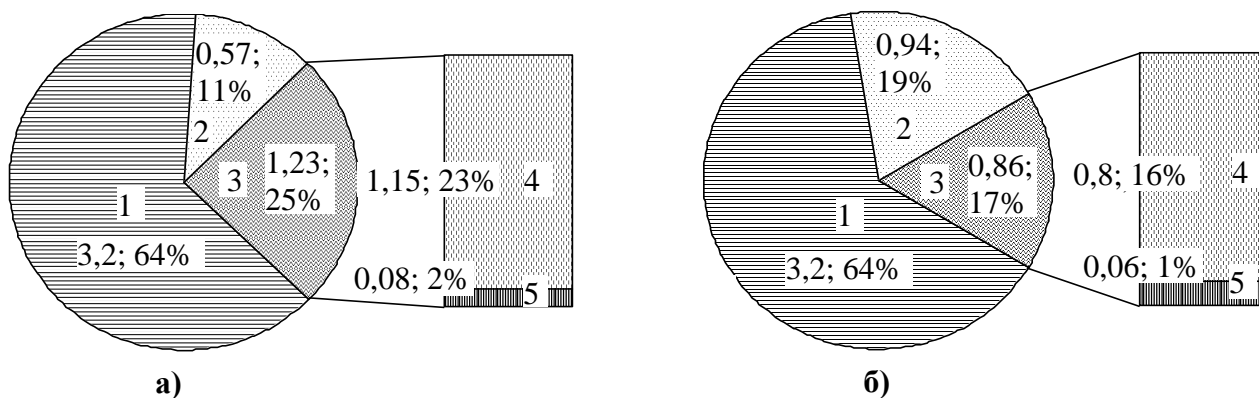
$$q_{cv} = Q_g C_g \cdot \rho_g (T_g - T_w); \quad (8)$$

$$Q_g = \frac{\kappa}{\mu_g} \cdot \frac{P_g^2 - P_{atm}^2}{2P_{atm} \cdot L_g} \cdot S_{cv}; \quad (9)$$

$$q_{cd}(t) = S_{cd} \lambda_p \cdot \left. \frac{\partial T(t)}{\partial z} \right|_{z=m_0}, \quad (10)$$

де $q_{cv}(t)$ і $q_{cd}(t)$ – конвективна і кондуктивна складові теплового потоку, Вт ; Q_g – об'ємний потік газу в трищинах і порах порід покрівлі, $\text{м}^3/\text{с}$;

спалювання вугілля. Чисельним аналізом теплового балансу встановлено, що до завершення спалювання вугільного пласта у розташований вище водоносний горизонт покрівлі пласта може надійти понад 60 % тепла, акумульованого вміщуючими породами (рис. 8). Цифрами вказана кількість тепла (ГДж) і його частка (%) від теплової енергії спалюваного вугілля.



1, 2 – хімічне (яке міститься в газі) і фізичне (поглинене породним масивом) тепло; 3 – тепло, яке надходить у водоносний горизонт кондуктивним (4) і конвективним (5) шляхами

Рисунок 8 – Баланс теплової енергії при ПСВ з потужністю водотриву 3 (а) і 7 (б) м

Для визначення температури підземних вод у розташованому над реакційним каналом водоносному горизонті на його підшві виділявся об'ємний блок порід у вигляді паралелепіпеда (рис. 9). Баланс тепла у блоці встановлювався на основі рівності кількості тепла (U_{Σ}), що надходить до блоку чи виноситься з нього за проміжок часу τ та кількості тепла, яке витрачається на нагрівання підземних вод і гірських порід безпосередньо в блоці ($U_{нагр.}$):

$$U_{\Sigma} = (q_0 + q_1 - q_2 - q_3)\tau = U_{нагр.} = (T_1 - T_0) \cdot B; \quad (11)$$

$$q_1 = AT_w; \quad q_2 = A \cdot \frac{T_1 + T_0}{2}; \quad q_3 = D \cdot \left(\frac{T_1 + T_0}{2} - T_w \right);$$

$$A = \Delta y \cdot \Delta z \cdot v \cdot C_w \rho_w; \quad B = \rho_w C_w V_w + \rho_{sk} C_{sk} V_{sk}; \quad D = \frac{\lambda \Delta x \Delta y}{\Delta z},$$

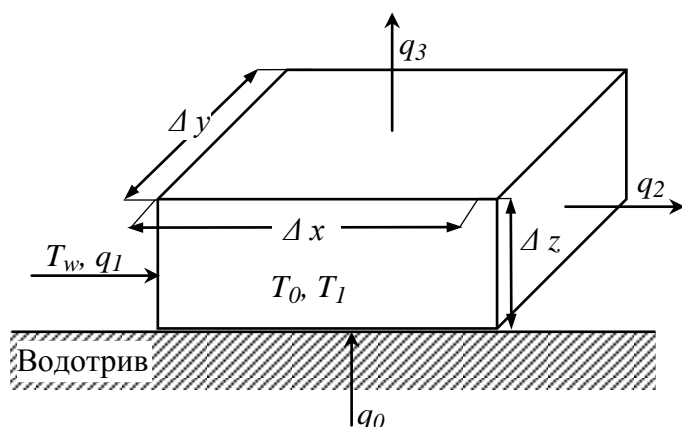


Рисунок 9 – Схема балансу тепла у блоці водоносного пласта над покрівлею реакційного каналу

де T_0 , T_1 – відповідно температура води і порід у блоці сітки розмірами $\Delta x \Delta y \Delta z$ на початку і в кінці проміжку часу τ , К; n – швидкість фільтрації, м/с; V_w , V_{sk} – об'єм води і порід у блоці, м³; q_0 – тепловий потік від реакційного каналу, Вт; q_1 і q_2 – конвективні потоки тепла уздовж напрямку фільтраційного потоку, Вт; q_3 – кондуктивний тепловий потік від блоку до сусіднього блоку, розташованого вище, Вт.

За умови балансу часовий ряд температур у блоці порід визначається наступним чином

$$T_i = T_{i-1} + \frac{q_0 - (A + D) \cdot (T_{i-1} - T_w)}{B + (A + D)\tau/2} \cdot \tau, \quad (12)$$

де T_i – температура в блоці сітки протягом i -го періоду осереднення.

У результаті послідовних розрахунків за запропонованою формулою можна встановити зміну температури блока водоносних порід, які залягають над покрівлею реакційного каналу. При цьому попередньо необхідно розрахувати сумарну величину теплового потоку з каналу і швидкість фільтрації підземних вод шляхом вирішення гідродинамічної задачі. Для знаходження розподілу температури у водоносних породах встановлена температура блоку задається в елементі скінченно-різницевої сітки чисельної моделі переносу тепла в програмі ModFlow, що протестована у другому розділі. В інших елементах цієї моделі (поза реакційного каналу) встановлюються відповідні граничні умови.

Верифікація запропонованої моделі була проведена на основі масштабного науково-промислового експерименту з ПСВ на ділянці «Нанпа – 1» родовища вугілля Rocky Mountain у США. Оцінена динаміка зміни рівня підземних вод, під дією модулів спалювання, узгоджується з фактичними даними протягом більшої частини періоду епігнозу з абсолютною похибкою 2 – 6 м при адекватному відображенні воронки депресії. Зіставлення натурних і модельних даних температури води в свердловинах показало, що результати розрахунку відповідають фактичній зміні температури у водоносному горизонті, який залягає над реакційним каналом, при цьому абсолютна похибка розрахунків не перевищує 5 °C (рис. 10).

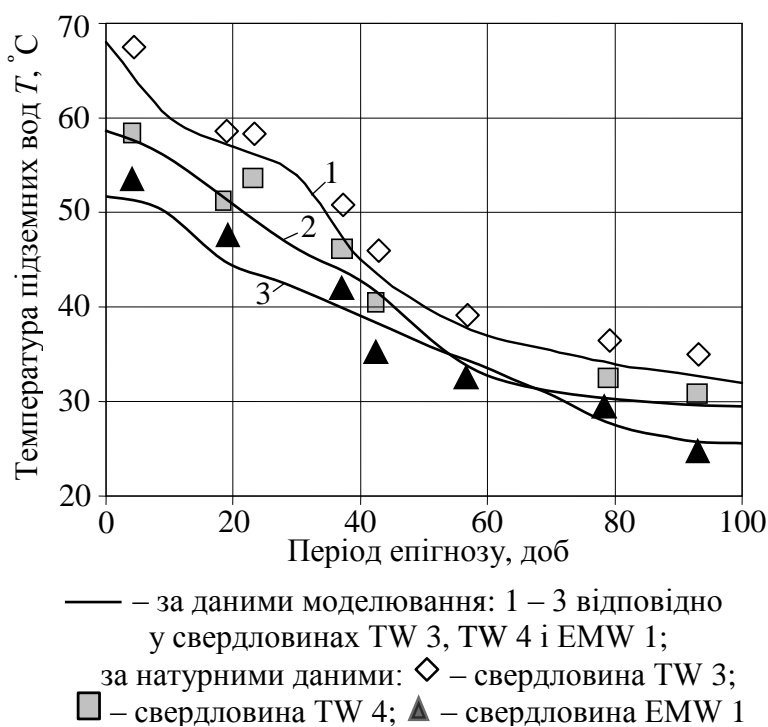


Рисунок 10 – Динаміка зміни температури підземних вод на ділянці «Нанпа – 1»

За допомогою відомих критеріїв придатності вугільних пластів для підземного спалювання, і оцінених параметрів водоносних пластів – для накопичення теплової енергії проведено геолого-гідрологічне діагностування ділянки «Ольхова Нижня» Чистяково-Сніжнянського гірничо-промислового району Донбасу. Визначено, що на досліджуваній території найбільш раціональне підземне спалювання некондиційного вугільного пласта h_{10}^1 з використанням як теплоносій підземних вод верхніх «бабаковських» пісковиків $h_{10}Sh_{11}$ потужністю до 60 м.

Шляхом моделювання теплопереносу оцінено розміри, форму і температуру теплових зон які формуються в «бабаковських» пісковиках залежно від кута їх падіння та стадії спалювання вугілля. Показано, що температурні аномалії у водоносних породах непостійні у часі та просторі, можуть сягати 70 $^{\circ}\text{C}$ і потребують розробки геотехнологічних схем освоєння (рис. 11).

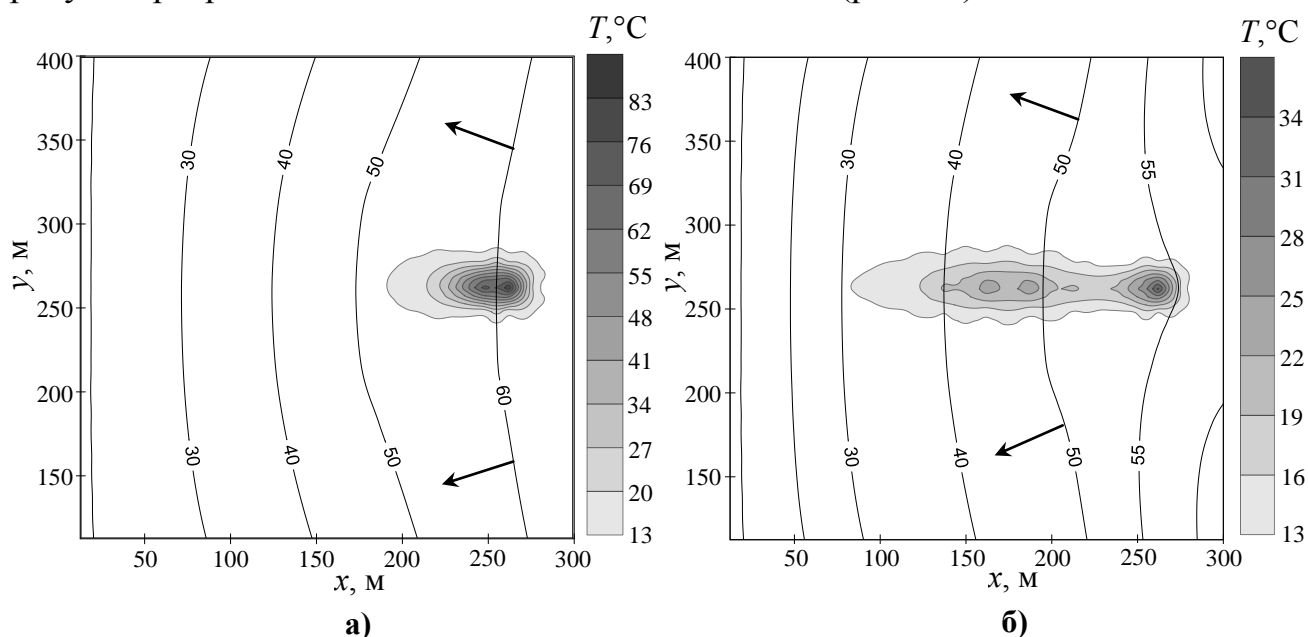


Рисунок 11 – Розподіл рівня підземних вод на площі x Ч y (ізолінії) і їх температури (відтінки) у «бабаковських» пісковиках при спалюванні вугільного пласта h_{10}^1 : по закінченні спалювання 30 діб (а) і завершенні відбору нагрітих вод 180 діб (б)

Розділ 5. Термогідродинамічна оцінка ефективності використання теплового й емісійного потенціалів затопленого шахтного поля висвітлює результати виконання 6-го завдання, де з метою оцінки можливості створення геотермального модуля в межах затопленої шахти був проведений аналіз геолого-гідрологічних та гірничотехнічних умов шахти «Новгородівська 2», що ліквідується Красноармійського вуглепромислового району Донбасу. Встановлено, що площа шахтного поля, представленого в орогідрографічному плані вододільним плато, складає 20 km^2 . Його межами на півночі є Новгородівський скид, на заході – виходи пласта k_8 під палеогеново-неогенові відклади, на сході – ізогіпса пласта k_8 –350 м. Абсолютна позначка максимальної глибини ведення гірничих робіт –370,3 м, а устя стволів +205 м. У межах шахтного поля промисловими є два вугільних пласти, які залягають під гідравлічно зв'язаними водоносними горизонтами на відстані 25 – 30 м один від одного. У межах шахти знаходиться понад 8 млн тонн вугілля, зосередженого в залишкових і некондиційних запасах, придатних за своїми фізико-хімічними характеристиками для розробки способом підземного спалювання. Водоносні породи представлені вапняком L_1 потужністю до 5 м і пісковиками L_1sl_1 і l_1sl_3 з середньою потужністю 15 і 20 м відповідно. Верхнє розташування вугільного пласта l_1 , який відпрацьовувався раніше пласта k_8 , зумовило надходження водопритоків у розташовані вище гірничі ви-

робки. Такий характер залягання вугільних пластів формував водопритоки в кожну з розглянутих вугільних пачок і визначав наступний підхід до геофільтраційної схематизації шахтного поля.

Геофільтраційна модель шахти «Новгородівська 2», створена в ліцензійному програмному комплексі ModFlow, відображає два промислових пласти, міжпластя що їх розділяє, а також покрівлю пласта l_1 і підшову пласта k_8 . В результаті чого модель містить п'ять шарів з кутами падіння які відповідають їхнім гірничо-геологічним умовам та має площу 20 км^2 ($4000 \times 5000 \text{ м}$). Потужності продуктивних товщ на моделі приймалися у відповідності із залежністю проникності подробленого породного масиву від кратності його подробки, у середньому рівними 10 – 40 потужностям вугільного пласта (рис. 12).

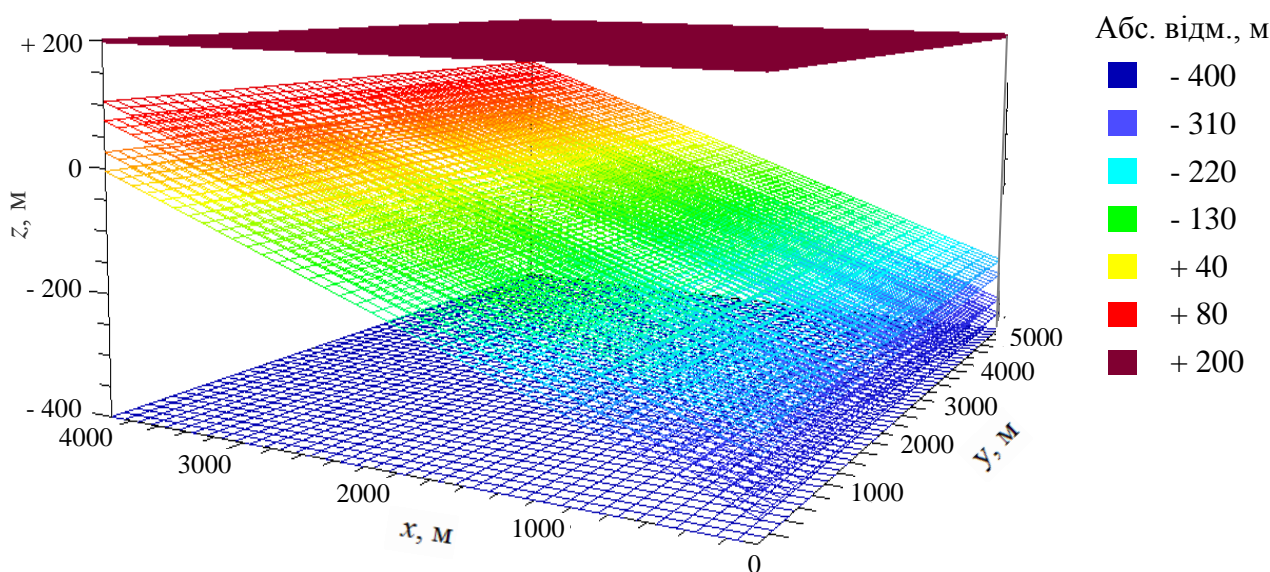


Рисунок 12 – Тривимірне уявлення геометрії геофільтраційної моделі шахти «Новгородівська 2»

При завданні зовнішніх меж модельованої області тектонічне порушення (Новгородівський скид) приймалося у вигляді непроникної в гідродинамічному відношенні межі. На південному заході та південному сході, де вугільні пласти мають безпосередній гідравлічний зв'язок з водоносними палеогеново-неогеновими відкладами, задавалася гранична умова третього роду, яка відображала взаємозв'язок величини витрати потоку підземних вод цих відкладень у продуктивну товщу з різницею гідродинамічних напорів у них. У місцях перетоків підземних вод між шахтами «ім. Коротченка» – «Новгородівська 2» і «Новгородівська 2» – «Новгородівська 1» встановлювалися граничні умови другого роду з витратами, відповідними їх питомим значенням.

Внутрішніми межами геофільтраційної моделі шахти є очисні виробки, які відображаються граничними умовами першого роду з величиною гідродинамічного рівня, що відповідає абсолютній відмітці підшови вугільних пластів. Положення цих меж визначалося шляхом побудови плану гірничих виробок у програмному середовищі AutoCAD і перенесення контурів виїмкових ділянок на шари моделі. При моделюванні затоплення шахти внутрішні граничні умови виключались.

Для оцінки адекватності розробленої геофільтраційної моделі шахти необхідне рішення оберненої задачі, мета якої полягає у коригуванні гідродинамічної ролі зовнішніх меж водоносних пластів і їх фільтраційних властивостей. Основою для її вирішення були спостереження за графіком затоплення ствола шахти і гідродинамічні виміри. Обчислення задачі проводилося в умовах нестационарного режиму фільтрації, основним критерієм адекватності рішення якої було співпадання фактичних і модельних графіків затоплення шахтного ствола. Аналіз результатів показує, що на моделі вдалося практично повністю відобразити динаміку підйому рівня води в системі гірничих виробок і масиву у процесі ліквідації шахти. При цьому абсолютна похибка розрахунків рівнів знаходиться в межах 3 – 11 м, а відносна не перевищує 10 %.

За допомогою запропонованої та протестованої геофільтраційної моделі шахти було встановлене прогнозне положення рівня підземних вод на заданий момент часу і передбачувану дату запуску в роботу геотермального модуля. Отримані результати дозволили оцінити природний тепловий потенціал вод шахти «Новгородівська 2». При цьому приймалося, що в обводнений масив надходить тепловий потік q , обумовлений виділенням тепла в земних надрах. Зверху, нижче 6 – 7 м від денної поверхні, залягає нейтральний шар порід, температура якого постійна і дорівнює середньорічній температурі в регіоні (приблизно +10 °С). При цих умовах диференціальне рівняння теплопровідності відносно вертикальної осі H з урахованням конвекції має вигляд

$$\frac{\partial^2 T}{\partial H^2} - \frac{v_g}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial H} = 0, \quad (13)$$

при наступних граничних умовах:

$$T = T_1 \text{ при } H = H_1; \quad q = -\lambda \partial T / \partial H \text{ при } H = H_2. \quad (14)$$

Загальне рішення цього рівняння має вигляд

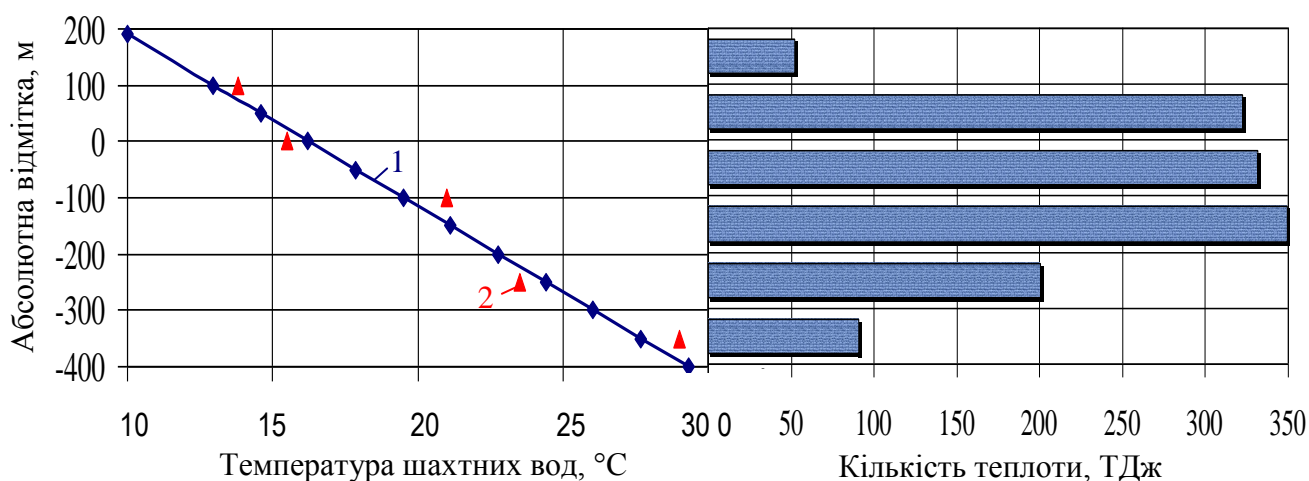
$$T = T_1 + \frac{q}{\lambda B} [\exp B(H - H_2) - \exp B(H_1 - H_2)]; \quad B = \frac{v_g}{a}. \quad (15)$$

При цьому тепловий потенціал шахтних вод, які містяться в затопленому масиві, визначається з виразу

$$Q = C \cdot \rho \cdot T \cdot V_{об}, \quad (16)$$

де T_1 , H_1 – температура і відстань до нейтрального шару; H – глибина залягання, м; a – температуропровідність водонасичених порід, м²/с; v_g – вертикальна швидкість фільтрації; Q – кількість теплоти, Дж; C , ρ , T , $V_{об}$ – відповідно питома теплоємність, густина, температура й об'єм шахтних вод.

Результати розрахунків температури шахтних вод за запропонованими рівняннями добре узгоджуються з фактичними даними, отриманими в результаті моніторингу за гідродинамічним режимом шахти. Сумарний тепловий ресурс вод, які знаходяться у затопленому масиві, визначався погоризонтно залежно від обсягу виробленого простору, і складає 1300 ТДж (рис. 13).

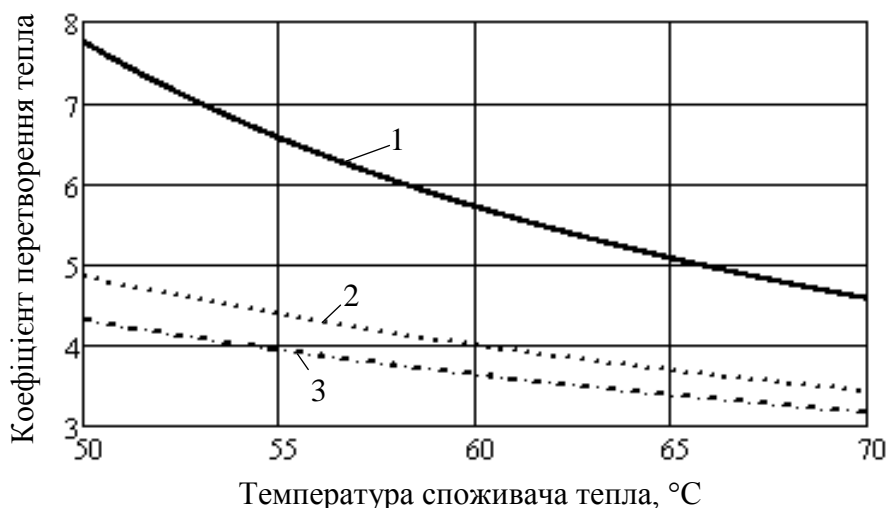


1 – 2 відповідно розрахункові і фактичні дані

Рисунок 13 – Зміна температури та кількості теплоти вод, які знаходяться у затопленому масиві шахти «Новгородівська 2»

Освоєння теплового ресурсу вод шахти «Новгородівська 2» для тепло- і холодопостачання будівель пов'язане з періодичною зміною їх температури через її відмінності у затопленому масиві і на денній поверхні, а також втрат тепла під час руху води по свердловинах. Проведені термодинамічні розрахунки геофільтрації у виробленому масиві, основані на результатах числового моделювання та аналітичних рішеннях, показали, що сумарні тепловтрати в процесі відбору, накопичення і зберігання шахтних вод не перевищують 15 %.

Отримані результати зміни температури шахтних вод під час охолоджувального та опалювального періодів дають можливість оцінити рентабельність їх застосування в теплових насосах (рис. 14).



1 – 3 відповідно шахтні води, ґрунт і поверхневі водотоки

Рисунок 14 – Ефективність роботи теплового насоса при використанні різних низкопотенційних джерел енергії

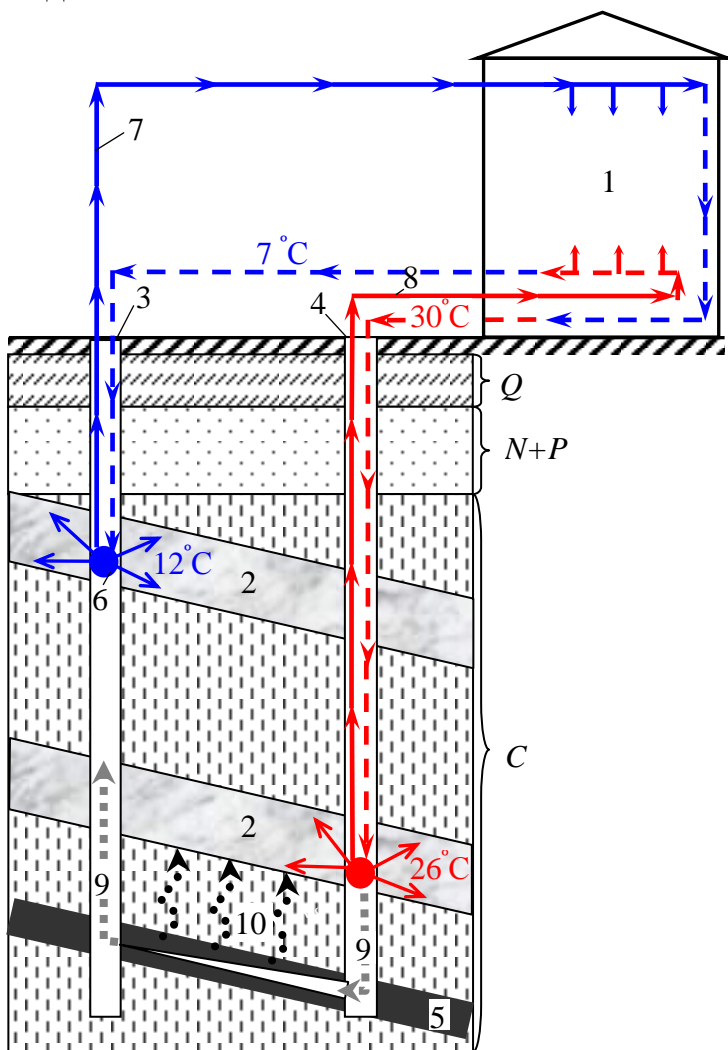
При цьому за основний показник ефективності насосів приймалися коефіцієнти перетворення тепла K_T і холоду K_X , що являють собою відношення теплопродуктивності насосів до споживаної ними електроенергії та визначаються таким чином

$$K_T = h \cdot \frac{T_1}{T_1 - T_2}; K_X = h \cdot \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \quad (17)$$

де h – коефіцієнт термодинамічної досконалості; T_1, T_2 – температура конденсації (споживача тепла) і випаровування холодоагенту (джерела низькопотенційної енергії), К.

Аналіз отриманих результатів показує, що при застосуванні шахтних вод у тепловому насосі досягаються найбільші коефіцієнти перетворення тепла в порівнянні з іншими альтернативними варіантами.

Розділ 6. Практична реалізація наукових основ розробки ємнісних і теплоенергетичних ресурсів вугільних родовищ присвячений вирішенню 7-го завдання.



1 – будівля; 2 – продуктивна товща із затопленими гірничими виробками; 3, 4 – «холодна» і «тепла» свердловини; 5 – некондиційний вугільний пласт; 6 – пакер; 7, 8 – шлях руху шахтних вод з «холодної» та «теплої» свердловин; 9, 10 – напрямки течії дуттьового і теплового потоків при спалюванні вугілля

Рисунок 15 – Технологічна схема геомодуля на території шахтного поля

На основі отриманих результатів зміни температури шахтних вод розроблена технологічна схема освоєння теплового ресурсу затопленого шахтного поля, основана на періодичному відборі та закачуванні вод різних горизонтів у відповідності з температурою зовнішнього повітря, а також його періодичної активізації шляхом підземного спалювання залишкових вугільних запасів (рис. 15).

Згідно з запропонованою схемою в літній період, зосереджені в затоплених гірничих виробках шахти «Новгородівська 2» в інтервалі $\pm 0 \dots +100$ м води, які мають середню температуру $+12^\circ\text{C}$, через куц «холодних» свердловин відкачуються на денну поверхню і надходять в теплові насоси. Після чого вони, нагріті в результаті кондиціонування будівель до температури зовнішнього повітря ($\approx 30^\circ\text{C}$), через куц «тепліх» свердловин повертаються в затоплені виробки, але вже на горизонт $-300 \dots -400$ м з середньою температурою 26°C . Через два місяці після припинення охолодження приміщень (закінчення літа) вода з нижніх горизонтів через

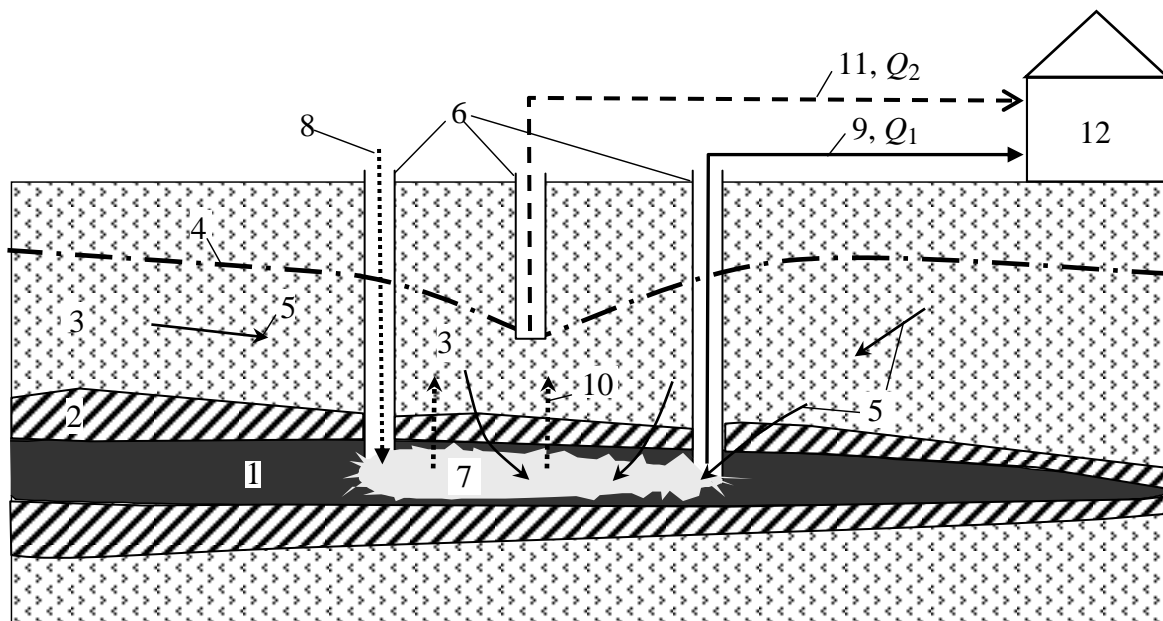
«теплі» свердловини знову подається на денну поверхню і використовується як джерело низькопотенційної енергії в теплових насосах для обігріву будівель. Віддавши тепло й охолонувши до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, відпрацьовані води через «холодні» свердловини знову надходять на горизонт $\pm 0\dots+100$ м. Тривалість цього етапу експлуатації геомодуля становить п'ять місяців (листопад – березень), після чого наступає двомісячний період простою, упродовж якого можуть проводитися ремонтно-профілактичні роботи.

Область використання запропонованого технологічного рішення обмежується температурою шахтних вод, що нижче вимог які ставляться для теплопостачання будівель. Це обумовлює можливість їх застосування в якості низькопотенційного джерела енергії в теплових насосах та системах опалення «тепла підлога», які потребують значних капітальних витрат на їх монтаж й обслуговування. Разом з тим, нагрів вод (наприклад шахти «Новгородівська 2») до кондиційного стану можливий при роботі геомодуля за другим технологічним варіантом, який припускає підвищення їх температури за рахунок підземного спалювання некондиційних пластів вугілля (k_7^5 , k_8^H , l_4 і l_5) протягом 100 діб (листопад – січень) і відкачування вод з верхніх затоплених виробок за регламентом, докладно описаним в розділі 4. На основі проведеного моделювання процесів фільтрації і теплопереносу встановлено, що тепловий потік у розмірі 500 – 580 ГДж/добу, який утворюється при спалюванні вугілля і відборі нагрітих вод, під час опалювального періоду практично повністю покриває теплові потреби розташованого в 10 км від шахти м. Новгородівка з населенням у 15 тис. чол.

Виконані в дисертаційній роботі дослідження стали також основою для розробки геотехнологічної схеми газосховища у Левенцовській структурі, визначення параметрів нагнітання газу, необхідної кількості експлуатаційних свердловин та оптимального порядку їх розміщення з урахуванням геоморфологічної будови території, а також дали можливість обґрунтувати моніторингові заходи, спрямовані на безпечну роботу полігону.

Для розробки ресурсів ділянки «Ольхова Нижня» запропонована технологічна схема, що дозволяє поряд з продуктивним газом отримувати нагріті підземні води. За запропонованою технологічною схемою можливий відбір нагрітих вод після завершення спалювання вугілля через свердловини на денну поверхню у відповідності з переміщенням їх температурних максимумів, положення яких визначаються за допомогою моделі переносу тепла і фільтрації, обґрунтованої та протестованої у 4 розділі. При цьому у водоносному горизонті знижується рівень і виникає воронка депресії, яка сприяє безперервному відбору теплоносіїв. Запропонований спосіб і технологічний результат який досягається полягає в тому, що відкачування нагрітих вод дає можливість суттєво підвищити ефективність ПСВ шляхом відбору теплової енергії, яка акумулюється у водоносному горизонті, локалізувати розчинення і міграцію продуктів згоряння у водоносних

горизонтах, розташованих у зоні впливу реакційного каналу, а також використовувати вуглеводневі компоненти, які містяться у підземних водах і придатні для виробництва цінних хімічних продуктів (рис. 16).



Q_1, Q_2 , – дебіт газу і нагрітих вод; 1 – вугільний пласт; 2 – породи покрівлі; 3 – водоносний горизонт; 4, 5 – рівень підземних вод і напрямок їх фільтрації; 6 – експлуатаційні свердловини; 7 – реакційний канал; 8 – 11 – напрямок руху дугтя, продуктивного газу, теплового потоку і нагрітих вод відповідно; 12 – споживач

Рисунок 16 – Схема теплоенергетичного модуля на ділянці «Ольхова Нижня»

У рамках реалізації цього технічного рішення автором був запатентований «Спосіб отримання теплової енергії при підземній газифікації вугілля». Також отримані в дисертаційній роботі результати використані при складанні «Методики оцінки зміни термодинамічних властивостей підземних вод при підземному спалюванні вугілля», затвердженої міжнародним центром проблем надрокористування «Геополітика», а також у технічних завданнях з обґрунтування раціональних параметрів і режимів роботи гідротермального модуля в умовах ліквідованої шахти «Новгородівська 2» і оцінки термодинамічного ресурсу шахтних вод шахти «Благодатна» для тепlopостачання інженерних споруд, затверджених ДП «Дніпродіпрошахт» та компанією ДТЕК.

Виконана техніко-економічна оцінка ефективності акумулювання природного газу в пермсько-тріасовому колекторі Левенцовської площі показала можливість покриття капітальних витрат і одержання прибутку від створення газосховища за умови його активного об'єму не менше 100 млн м³ і ціни за зберігання газу 160 – 180 грн/1000 м³ на рік. Встановлені тарифи значно менше західноєвропейських і забезпечують внутрішню норму рентабельності в розмірі 12 – 19 %, що в більшості випадків відповідає ставкам дисконту в Україні (табл. 2).

Таблиця 2 – Зміна коефіцієнта прибутковості Левенцовського газосховища

| Активний об'єм газу, млн м ³ | Коефіцієнт прибутковості | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|-----|
| | Вартість послуг за зберігання газу, грн/1000 м ³ | | | | |
| | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| 50 | 0,5 | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 1,4 |
| 100 | 0,7 | 0,8 | 1,2 | 1,2 | 1,5 |
| 150 | 1,0 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,7 |

Згідно з проведеними оцінками, гідрогеотермальний модуль в умовах шахти «Новгородівська 2» в опалювальний період дозволяє отримати річну економію умовного палива до 80 – 120 тонн. При цьому модуль характеризується позитивними значеннями чистої дисконтної вартості (18 – 20 тис. дол./ГДж/рік) і відповідає світовим нормативам раціонального застосування геотермальних циркуляційних систем у природних колекторах.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна науково-практична проблема освоєння природно-техногенного ресурсу вугільних родовищ на основі всебічного вивчення геотехнологічних закономірностей його формування й обґрунтування геомодулів, які забезпечують видобуток енергоносіїв в єдиному циклі з їх сезонним зберіганням у підземних колекторах, що сприятиме зміцненню енергетичної безпеки держави.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. На підставі проведеного аналізу виявлено, що тривала розробка вугільних родовищ та ліквідація шахт в Україні призвели до формування на території вугледобувних регіонів природно-техногенного середовища, яке містить великі запаси енергетичних і ємнісних ресурсів у вигляді залишкових і некондиційних запасів вугілля, теплих шахтних і підземних вод та горючих газів, які зосереджені в слабопроникних вуглевмісних породах. Порушений породний масив має значний ємнісний ресурс, здатний акумулювати рідкі та газоподібні теплоносії в об'ємі, достатнім для згладжування сезонних коливань їх споживання.

2. Розроблена у програмному середовищі ModFlow модель теплопереносу і фільтрації в обводнених породах для виконання термогідродинамічної оцінки параметрів роботи геоциркуляційної системи, яка забезпечує опалення і кондиціонування інженерних споруд за рахунок збереження літнього тепла і зимового холоду у порушених водоносних пластах. Шляхом чисельного моделювання показано, що в гідрогеологічних і кліматичних умовах Донецького басейну коефіцієнт акумуляції теплової енергії даної системи (відношення отриманого тепла

до закачаного) в середньому складає 0,85 і відповідає світовим умовам ефективного застосування теплообмінників у геологічних структурах.

3. Встановлено, що при створенні тріщини гідравлічного розриву в перспективному для видобутку вуглеводневого газу інтервалі (1,5 – 2 м³/тонна, CH₄ ≈ 44 %) щільних порід Новомосковського кам'яновугільного родовища відбувається збільшення газовіддачі (від 1,9 до 2,8 разів) залежно від витрати рідини розриву. Закріплення і підтримання заданих фільтраційних характеристик цієї тріщини досягається направленим перенесенням нетоксичних пропантів, рух яких описаний математичною моделлю, з урахуванням гранулометричного і щільного складу частинок, а також фізико-хімічних властивостей рідини, яка їх транспортує.

4. Проведеними стабілометричними випробуваннями, лабораторними експериментами й аналітичними розрахунками встановлене збільшення обсягу і проникності перспективного пермсько-тріасового горизонту Левенцовської структури Західного Донбасу до 4 % при підвищенні тиску акумульованого у ньому вуглеводневого газу з 2,6 до 3,5 МПа. При цьому щільність колектора, його ємність поглинання й адсорбційна активність зменшуються на 2; 1,5 і 1 % відповідно. Отримані залежності використані при розрахунку гідродинамічних і технологічних параметрів, які забезпечують стабільну експлуатацію газосховища в даних гірничо-геологічних умовах.

5. Встановлено, що на всіх етапах роботи газосховища з активним об'ємом 150 млн м³ у пермсько-тріасовому водоносному горизонті радіус і площа газової зони зростають зі зменшенням пористості порід, і при її мінімально можливих значеннях не перевищують, відповідно 560 м і 1 км². Отримані розміри значно менші території Левенцовської структури (1930 км²) і свідчать про можливість локалізації газосховища в її межах. Сумарний об'єм втрат газу за рахунок гірничо-геологічних, фізико-хімічних і технічних чинників дорівнює 4,5 %, що відповідає результатам експлуатації газосховищ у різних країнах світу.

6. Визначена динаміка формування і конфігурація теплових зон у водоносному горизонті, який залягає над вугільним пластом під час його спалювання, залежно від кута його падіння, стадії розробки вугілля і потужності водоупору. Проведена, на основі епігнозного моделювання промислового експерименту з ПСВ на вугільному родовищі Rocky Mountain (США), верифікація розробленої математичної моделі показала її високу точність (відносна похибка не перевищує 5 %). На основі розрахунків і чисельного аналізу теплового балансу встановлено, що до моменту завершення спалювання вугільного пласта водоносний горизонт покрівлі може накопичити понад 60 % тепла, відбір якого дозволить підвищити ККД даної геотехнології на 18 – 25 %.

7. Встановлено, що проникнення теплового потоку з підземного газогенератора в обводнені породи покрівлі призводить до формування техногенного геотермального родовища. Виконана за допомогою розробленої моделі теплове-

реносу, гідравлічного і гідродинамічного методів оцінка експлуатаційних запасів підземних вод «бабаковських» пісковиків ($h_{10}Sh_{11}$), які нагріваються при спалюванні вугільного пласта (h_{10}^I), показала можливість їх сталого відбору з температурою 40 – 90 °С протягом всього опалювального періоду. Для розробки цих теплових ресурсів запропонована і запатентована геотехнологічна схема, що дозволяє поряд з продуктивним газом отримувати нагріту воду і використовувати її як теплоносію.

8. Досліджений нерівномірний характер фільтрації та водопритоку у виробленому вугільному масиві залежно від його геологічної будови й обсягів. Запропонована і протестована на основі оберненої задачі чисельна модель геофільтрації у програмі ModFlow дозволила встановити динаміку зниження напору підземних вод та відновлення їх рівня після відключення водовідливу. При цьому абсолютна похибка між фактичними і модельними даними розподілу рівнів шахтних вод знаходиться в межах 3 – 11 м, а відносна – не перевищує 10 %.

9. Обґрунтований геотехнологічний модуль, який забезпечує ефективне освоєння теплового ресурсу затопленої шахти за рахунок відбору та закачування вод різних горизонтів для тепло- і холодопостачання будівель у відповідності з температурою зовнішнього повітря, а також його періодичну активізацію шляхом підземного спалювання залишкових вугільних запасів. На прикладі шахти «Новгородівська 2» яка ліквідується встановлено, що тепловий потік (500 – 580 ГДж/добу), який утворюється при спалюванні вугілля і відкачуванні нагрітих вод, практично повністю покриває теплові потреби найближчого населеного пункту (м. Новгородівка) з населенням у 15 тис. чол. під час опалювального періоду. Використання шахтних вод з природною температурою (26 – 28 °С) формує потік тепла 120 – 160 ГДж/добу, який можна використовувати як джерело низькопотенційної енергії в теплових насосах і системах опалення «тепла підлога».

10. Оцінена економічна ефективність сезонного зберігання природного газу в пермсько-тріасовому водоносному пласті Левенцовської структури та використання вод затоплених виробок шахти «Новгородівська 2» для обігріву і кондиціонування будівель. Згідно з проведеними розрахунками, оснований на встановленні сучасних критеріїв ефективності капітальних вкладень, геомодулі даного напрямку забезпечують покриття витрат на створення та внутрішню норму рентабельності в розмірі 12 – 19 %, що в більшості випадків відповідає ставкам дисконту в Україні. Отримані в дисертаційній роботі результати використані при складанні «Методики оцінки термодинамічних показників підземних вод при підземному спалюванні вугілля», у технічних завданнях із обґрунтування раціональних параметрів і режимів роботи гідротермального модуля в умовах шахти «Новгородівська 2» та оцінки термодинамічного ресурсу шахтних вод шахти «Благодатна» для теплопостачання інженерних споруд.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Инкин А.В. Миграция и теплоперенос вокруг подземного газогенератора: монографія / И.А. Садовенко, А.В. Инкин, С.В. Жолудев. – Д.: «Грани», 2012. – 282 с.

Статті, опубліковані у фахових виданнях України та за кордоном:

2. Инкин А.В. Динамика гидромеханических процессов пласта-коллектора водоносного газохранилища // И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 6. – С. 25 – 28.

3. Инкин А.В. Оценка гидродинамических параметров восходящего потока при лифтировании вязкой жидкости / А.В. Инкин // Вісник Національного ун-ту водного господарства та природокористування: зб. наук. праць (технічні науки). – 2010. – Вип. 3 (51). – С. 178 – 185.

4. Инкин А.В. Газогидродинамическая оценка параметров хранения газа в водоносном горизонте // И.А. Садовенко, А.В. Инкин, Д.В. Рудаков // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – Д.: Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, 2010. – Вып. 91. – С. 77 – 84.

5. Інкін О.В. Підвищення ефективності технологічного процесу підземної газифікації вугілля / І.О. Садовенко, О.В. Інкін // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 4. – С. 19 – 21.

6. Инкин А.В. Гидродинамическая модель газохранилища в водоносных пластах Кривбасса / А.В. Инкин // Зб. наук. праць НГУ. – 2010. – № 34, Т.2. – С. 216 – 221.

7. Інкін О.В. Обґрунтування ефективності зберігання енергоносіїв у водоносних пластах Західного Донбасу / О.В. Інкін // Зб. наук. праць НГУ. – 2011. – № 36, Т.1. – С. 200 – 208.

8. Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии // И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, А.В. Инкин [и др.] // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 1. – С. 40 – 45 (*наукометрична база Scopus*).

9. Оценка потерь газа при его хранении в водоносных пластах Западного Донбасса // А.В. Инкин, И.А. Садовенко, З.Н. Якубовская, Н.А. [и др.] // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 6. – С. 18 – 24 (*наукометрична база Scopus*).

10. Инкин А.В. Численное исследование особенностей теплового поля вокруг подземного газогенератора / И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, А.В. Инкин // Зб. наук. праць НГУ. – 2012. – № 39. – С. 11 – 20.

11. Инкин А.В. Термогидродинамическая оценка параметров системы подземного аккумулирования тепловой энергии / И.А. Садовенко, А.В. Инкин //

Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – Д.: Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, 2012. – Вып. 104. – С. 110 – 119.

12. Инкин А.В. Оценка эффективности теплового модуля на основе ресурсного потенциала затопленной шахты / А.В. Инкин, И.А. Садовенко, Д.В. Пилюгин // Вісник Кременчуцького Національного ун-ту імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 3 (80). – С. 123 – 127 (*наукометрична база Index Copernicus*).

13. Інкін О.В. Оцінка ефективності заходів переведення підтоплених ділянок в режим самодренування / О.В. Інкін, Д.В. Рудаков // Гірничий вісник. – 2013. – Вип. 96. – С. 191 – 195.

14. Инкин А.В. Моделирование переноса пропанта в изменяющей конфигурацию трещине гидроразрыва / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Вісник Кременчуцького Національного ун-ту імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 1 (84). – С. 119 – 123 (*наукометрична база Index Copernicus*).

15. Инкин А.В. Экологически безопасное увеличение дебита газа из слабопроницаемых пород украинских месторождений / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Сб. науч. тр. Донбасского гос. техн. ун-та. – 2014. – Вып. 1 (42). – С. 30 – 38.

16. Инкин А.В. Актуализация применения шахтных вод для тепло- и холодоснабжения зданий / А.В. Инкин // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов (Сер. Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве). – 2014. – Вып. 76. – С. 137 – 142.

17. Инкин А.В. Перспективы создания водоносного газохранилища в горно-геологических условиях Левенцовской площади / А.В. Инкин, Н.И. Деревягина, Ю.В.Хрипливец // Зб. наук. праць НГУ.– 2014. – № 44. – С. 22 – 27.

18. Инкин А.В. Экспериментальные исследования фильтрационных свойств пород-коллекторов при аккумулировании углеводородных газов / А.В. Инкин, И.А. Садовенко // Зб. наук. праць Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту (технічні науки). – 2014. – Вип. 2 (25). – С. 134 – 139.

19. Инкин А.В. Моделирование геотермических полей при подземном сжигании угольных пластов / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – Д.: Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, 2015. – Вып. 120. – С. 161 – 171.

20. Inkin O.V. Hydrogeomechanical Assessment for Parameters of Underground Gas Storage in the Aquifer / I.O. Sadovenko, D.V. Rydakov O.V. Inkin // Scientific Reports on Resource Issues (Rock Strength, Rock Fragmentation and Effective Use of Energy Potential of Geotechnical systems) // International University of Resources. TU Bergakademie Freiberg, Germany – 2012. –Vol. 2. – P. 196 – 208.

21. Инкин А.В. Термогидродинамическая оценка эффективности теплового модуля в пределах затопленной шахты / А.В. Инкин // Вестник академии наук Чеченской республики. – 2013. – № 4 (21). – С. 97 – 104.

22. Инкин А.В. Обоснование физико-химических параметров управления углеводородными зонами при подземной газификации угля / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 275 – 283.

23. Inkin O. Geotechnical schemes to the multi-purpose use of geothermal energy and resources of abandoned mines / I. Sadovenko, D. Rydakov, O. Inkin// Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. – Taylor & Francis Group, London. – 2014. – P. 443 – 450 (*наукометрична база Scopus*).

24. Моделирование процесса затопления шахты № 2 «Новгородовская» с учетом дальнейшего использования ее теплового ресурса / И.А. Садовенко, А.В. Инкин, Д.В. Рудаков [и др.] // Изв. Уральского гос. горного ун-та. – 2014. – Вып.1 (33). – С. 29 – 37.

25. Инкин А.В. Пути обеспечения благоприятного эколого-гидрогеологического режима в угледобывающих регионах / А.В. Инкин, И.А. Садовенко // Устойчивое развитие горных территорий: междунар. науч. журнал Северо-Кавказского горно-металлург. ин-та. – 2014. – № 1. – С. 19 – 23. – ISSN 1998-4502.

26. Инкин А.В. Обоснование параметров отбора тепловой энергии в условиях затопленной шахты / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Изв. вузов. Горный журнал. – 2014. – № 7. – С. 82 – 90.

27. Инкин А.В. Способы утилизации теплового ресурса и стабилизации экологической ситуации на ликвидируемых угольных предприятиях / А.В. Инкин // Изв. Томского политехн. ун-та. Ресурсы планеты. – 2014. – Т. 325, № 1. – С. 198 – 205.

28. Инкин А.В. Оценка изменения коллекторских свойств пород водоносного газохранилища / А.В. Инкин // Вестник Национального политехн. ун-та Армении (Сер. Metallurgy, Material Science, Non-Ferrous Metallurgy). – 2015. – № 2. – С.103 – 110.

Патенти на винаходи:

29. Пат. на винахід 109342 Україна, МПК E21B 43/295. Спосіб отримання теплової енергії при підземній газифікації вугілля / Садовенко І.О., Інкін О.В.; заявник і патентовласник Державний ВНЗ «НГУ». – UA 109342 C2, заявл. 11.03.14; опубл. 10.08.15, Бюл. № 15.

Основні публікації в матеріалах конференцій:

30. Инкин А.В. Гидродинамическая модель газохранилища в водоносных пластах / А.В. Инкин // Наукова весна 2010: наук.-техн. конф. молодих вчених. 25 березня 2010 р. – Д.: НГУ, 2010. (електронне видання).

31. Инкин А.В. Подземное хранение жидких углеводородов в соляных отложениях Донбасса / А.В. Инкин, Я.В. Антипович // Інновації та трансфер тех-

нологій: від ідеї до прибутку: матеріали II міжнар. наук.-практ. конф. 27 – 29 квітня 2011 р. – Д.: Державний ВНЗ «НГУ», 2011. – С. 24 – 25.

32. Inkin O. Influence of coal layers gasification on bearing rocks / O. Inkin, V. Timoshuk, V. Tishkov, E. Sherstiuk // Geomechanical Processes During Underground Mining. Proceedings of the school of underground mining. – Dnipropetrovsk – Yalta, 2012. – P. 109 – 113.

33. Инкин А.В. Моделирование работы системы подземного аккумулирования тепловой энергии / И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта: сб. науч. тр. междунар. конф. – Д.: НГУ, 2014. – С. 358 – 369.

34. Инкин А.В. Пути повышения эффективности процесса подземного сжигания угля / А.В. Инкин, Ю.В. Хрипливец // Сучасні технології ведення буровибухових робіт, їх економічна ефективність і техногенна безпека: матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. 20 – 27 червня 2014 р. Кременчук – Бургас, 2014. – С. 12 – 14.

35. Инкин А.В. Оценка возможности использования Левенцовской структуры для хранения газообразных углеводородов / А.В. Инкин, И.А. Садовенко, Н.И. Деревягина // Проблеми теоретичної і прикладної мінералогії, геології, металогенії гірничодобувних регіонів: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 27 – 29 листопада 2014 р. – Кривий Ріг, 2014. – С. 72 – 75.

36. Inkin O. Geotechnical design of geothermal energy use based on the resources of non-operated mines / I. Sadovenko, D. Rydakov, O. Inkin // 1er Colloque International Hydrogéologie & Géothermie. 11-12 novembre 2014. – Algeria – Guelma, 2014. – P. 274 – 275.

37. Инкин А.В. Определение критериев подобия при физическом моделировании процессов газо-водовытеснения / А.В. Инкин, Ю.В. Хрипливец // Молодь: наука та інновації: зб. праць II всеукраїнської наук.-техн. конф. 02 – 03 грудня 2014 р., Д.: Державний ВНЗ «НГУ», 2014. – С. 20 – 21.

38. Инкин А.В. Районирование Западного Донбасса по условиям подземного аккумулирования газообразных углеводородов и выбор потенциального пласта-коллектора / И.А. Садовенко, А.В. Инкин, Ю.В. Хрипливец // Форум гірників – 2015: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. 30.09 – 03.10 2015 р. – Д., 2015. – С. 33 – 42.

39. Инкин А.В. Оценка параметров нагнетания газообразных углеводородов в Левенцовскую структуру / А.В. Инкин, В.А. Фоменко // Молодь: наука та інновації: зб. праць III всеукраїнської наук.-техн. конф. 02 – 03 грудня 2015 р., Д.: Державний ВНЗ «НГУ», 2015. – С. 12 – 13.

Особистий внесок автора в роботи, опубліковані у співавторстві: [1] – написання 1 – 6 розділів монографії; [2, 9, 18, 21, 32] – проведення експериментальних досліджень, аналіз і обробка отриманих результатів; [4, 8, 10, 11, 14, 19] – постановка завдання і розробка математичних моделей теплопереносу і фільт-

рації в техногенно порушеному породному масиві; [5, 12, 13, 15, 20] – розробка геотехнологічних схем освоєння природно-техногенного ресурсу відпрацьованих вугільних ділянок; [17, 28, 30, 31, 35] – аналіз літературних джерел, опрацювання та систематизація даних з визначення пріоритетних чинників у створенні сховищ газу в водоносних горизонтах; [23, 34, 29] – обґрунтування методики розрахунку, технологічних схем відбору і використання теплового потоку, який надходить з реакційного каналу в покриваючі водоносні породи; [24, 27, 33] – розробка раціональних режимів роботи геомодулів на затоплених шахтних полях; [25, 36, 37, 39] – формування ідеї роботи, методики досліджень та розробка розрахункових схем, узагальнення отриманих результатів; [38] – аналіз геолого-гідрогеологічних і гірничотехнічних умов дослідної ділянки, написання вступу і висновків.

АНОТАЦІЯ

Інкін О.В. Теоретичні та геотехнологічні основи розробки природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин. – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», МОН України, Дніпропетровськ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової проблеми освоєння енергетичного й емісного потенціалів вугільних родовищ на фундаментальному термодинамічному підході, який поєднує уявлення про формування, техногенне перетворення і відбір енергоносіїв в єдиному технологічному циклі з їх зберіганням у природних колекторах. Розроблений комплекс моделей газодинамічних, фільтраційних і теплових процесів, які протікають у порушеному масиві та обумовлені розробкою його природно-техногенних ресурсів і згортанням гірничих робіт. Досліджено закономірності руху води та газів у слабопроникних вуглевмісних породах, пластах-колекторах і затоплених гірничих виробках, які дозволили обґрунтувати технологічні параметри відбору, акумуляції та використання теплоносіїв для тепло- і холодопостачання будівель. Запропоновані й обґрунтовані технологічні варіанти використання теплового ресурсу вод, які знаходяться у затопленій шахті, та його активізацію за рахунок підземного спалювання залишкових запасів вугілля.

Розроблені моделі застосовані на реальних об'єктах у гірничопромислових районах з визначенням діапазонів параметрів гідродинамічного і теплового режимів, в яких створюються умови для відбору та використання енергоносіїв на завершальному етапі відпрацювання вугільних родовищ. На основі моделей та

одержаних закономірностей обґрунтовані параметри технологічних схем розробки природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ.

Ключові слова: вугільні родовища, порушений масив, затоплена шахта, тепла енергія, ємнісний ресурс, гідророзрив, водоносне газосховище, геоциркуляційні системі, підземне спалювання вугілля, моделювання, геомодулі.

АННОТАЦІЯ

Инкин А.В. Теоретические и геотехнологические основы разработки природно-техногенных ресурсов угольных месторождений. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.15.02 – подземная разработка месторождений полезных ископаемых. – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», МОН Украины, Днепропетровск, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению научной проблемы освоения энергетического и емкостного потенциалов отработанных угольных месторождений на фундаментальном термодинамическом подходе, совмещающем представление о формировании, техногенном преобразовании и отборе энергоносителей в едином технологическом цикле с их хранением в водоносных коллекторах. Разработан комплекс моделей, описывающих газодинамические, фильтрационные и тепловые процессы, протекающие в нарушенном породном массиве и вызванные разработкой его природно-техногенных ресурсов, включая свертывание горных работ.

С помощью разработанных моделей для климатических условий Донбасса обоснована геоциркуляционная система отопления и охлаждения зданий, основанная на сохранении летнего тепла и зимнего холода в нарушенных водоносных пластах. Путем анализа теплового баланса установлено, что коэффициент аккумуляции данной системы (отношение извлеченного тепла к закачанному) в среднем составляет 0,85, что соответствует мировым стандартам.

Предложенная методика численной оценки конфигурации трещины гидроразрыва в слабопроницаемых угленосных породах позволяет прогнозировать изменение их фильтрационных свойств и газоотдачи. Для выделенного путем геологического диагностирования метанонасыщенного интервала (1,5 – 2 м³/тонн, $CH_4 \approx 44\%$) Новомосковского каменноугольного месторождения установлено нелинейное увеличение дебита газа (от 1,9 до 2,8 раз) в зависимости от расхода жидкости разрыва. Для закрепления и предотвращения смыкания сформировавшейся трещины разработана методика расчета ее заполнения нетоксичными расклинивающими материалами.

Выполнено, с помощью установленных критериев пригодности водоносных пород для хранения углеводородного газа, районирование Западного Дон-

басса с выделением Левенцовской геологической структуры. В её разрезе заключен обладающий значительным емкостным ресурсом не пригодный для водоснабжения пермско-триасовый водоносный горизонт. С целью оценки изменения его фильтрационных и физико-механических свойств в результате закачки и отбора газа была проведена численная и экспериментальная оценка объемной деформации аккумулирующих пород, а также комплекс специальных лабораторных исследований, моделирующих длительное воздействие пропанобутановой смеси на литотипные аналоги пласта-коллектора, его кровли и почвы. Установленные зависимости использовались при выполнении балансовой оценки заполнения перспективного коллектора газообразными углеводородами, согласно которой при закачке 150 млн м³ активного и буферного газа радиус и площадь образующейся газовой зоны не превысят соответственно 560 м и 1 км², что значительно меньше территории Левенцовской площади (1960 км²) и свидетельствуют о возможности локализации газохранилища в ее пределах.

Обоснованный способ подземного сжигания некондиционных угольных пластов, позволяет наряду с вырабатываемым газом получать нагреваемые в результате сжигания угля подземные воды покрывающих пород. Способ протестирован для участка «Ольхово Нижнее» Чистяково-Снежнянского горнопромышленного района Донбасса. Путем моделирования теплопереноса и фильтрации оценены размеры и формы тепловых зон, формирующихся в мощной толще обводненных «бабаковских» песчаников ($h_{10}Sh_{11}$) в зависимости от угла их падения и стадии сжигания подстилающего их угольного пласта h_{10}^1 . Показана возможность формирования в подземных водах локальных температурных аномалий, достигающих 70 °С и позволяющих применение геотехнологических схем их освоения.

Разработанная и протестированная геофильтрационная модель шахтного поля, основанная на конечно-разностном решении уравнений нестационарной плановой фильтрации в программном комплексе «Modflow», позволила установить прогнозное положение уровня подземных вод в пределах поля шахты на оцениваемый момент и планируемый срок запуска в работу геотермального модуля. Установлено, что освоение теплового ресурса ликвидируемого угледобывающего предприятия сопряжено с периодическим использованием шахтных вод и изменением их температуры ввиду ее различия в затопленных выработках и на дневной поверхности, а также потерь тепла в процессе движения воды по скважинам. Проведенные термодинамические расчеты для отработанного массива показали, что суммарные теплотери в процессе отбора, нагнетания и хранения шахтных вод не превысят 15 %. Применение шахтных вод с температурой 26 – 28 °С в качестве низкопотенциального источника энергии в тепловых насосах, по сравнению с другими альтернативными вариантами, дает наиболь-

шие коэффициенты преобразования тепла (4,5 – 7,5), позволяющие сэкономить значительное количество мощности тепловых насосов.

Для горно-геологических условий Левенцовской площади установлены изменения давления в формирующейся при создании хранилища газовой зоне, основанные на зависимости фильтрационных свойств пласта-коллектора от длительности контакта с газообразными углеводородами. Полученные результаты послужили основой для разработки технологической схемы газохранилища, определения необходимого количества эксплуатационных скважин и оптимального порядка их размещения.

Установлено, что эффективная разработка теплового ресурса затопленного породного массива достигается за счёт периодического отбора и закачки шахтных вод различных горизонтов в соответствии с температурой наружного воздуха, а также его периодической активизации путем подземного сжигания остаточных угольных запасов. На примере ликвидируемой шахты «Новгородовская 2» показано, что образующийся при сжигании угля и откачке нагретых вод тепловой поток (500 – 580 ГДж/сут) практически полностью покрывает тепловые потребности близлежащего населенного пункта (г. Новгородовка) с населением в 15 тыс. чел. во время отопительного периода.

Ключевые слова: угольные месторождения, нарушенный массив, затопленная шахта, тепловая энергия, емкостной ресурс, гидроразрыв, водоносное газохранилище, геоциркуляционные системы, подземное сжигание угля, моделирование, геомодули.

АБСТРАКТ

Inkin O.V. Theoretical and geotechnological basis for development of natural and man-made resources of coal deposits. - The manuscript.

Thesis for a degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.15.02 – «Underground mining of mineral deposits». – State Higher Educational Institution «National Mining University», Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipropetrovsk, 2016.

The thesis deals with solving the scientific problem of thermal and capacity potential development in coal deposits based on the fundamental thermodynamic approach that combines the ideas of formation, technogenic transformation of heat transfer fluids, their extraction within the whole technological cycle, and their storing in natural reservoirs. The system of gas-dynamic, fluid flow and heat transfer models has been developed for thermal processes occurring in disturbed rocks as a result of natural and man-made resource development while shutting down mining works. The studied patterns of water and gases of movement in low permeable of coaly rocks, reservoir and flooded mines allowed evaluating the technological parameters of extraction, accumulation, and utilization of these heat transfer fluids for heating and

cooling of buildings. The thesis proposed and justified technological options how to utilize the thermal water resource in a flooded mine and activate this resource by underground combustion of residual coal reserves.

The developed models applied to real objects in mining areas allowed evaluating the ranges of flow and heat transfer parameters applicable to the conditions of heat transfer fluid extraction and utilization at the final stage of mining. Based on modeling and evaluated flow patterns the thesis justified the parameters of measures aimed at the development of natural and man-made resources of coal deposits.

Keywords: coal deposits, disturbed rocks, flooded mine, thermal power, capacity resource, hydraulic fracturing, aquifer gas storage, geo-circulating systems, underground coal combustion, modeling, geo-moduli.

ІНКІН Олександр Вікторович

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ГЕОТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ
ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ РЕСУРСІВ ВУГІЛЬНИХ РОДОВИЩ**

(Автореферат)

Підписано до друку 25.05.16 р. Формат 60×90/16
Папір офсет. Різографія. Ум. друк. арк. 1,9
Обл.-вид. арк. 1,9. Наклад 100 прим. Зам. № 754

Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19

