ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»
з науково-педагогічної і навчально-виховної роботи
Юрій ХОМЕНКО

_____
(підпис)
М.П.

# АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
**про виконану роботу в рамках реалізації проєкту**
**із виконання наукових досліджень і розробок**
«Наукові основи екобезпечної трансформації енергетичного профілю вугледобувних регіонів із забезпеченням стійкості гідрогеосфери»
(назва Проєкту)

**Назва конкурсу:** «Наука для безпеки людини та суспільства»
**Реєстраційний номер Проєкту**: 2020.01/0528
**Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проєкту)**
Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу протокол від **«16-17» вересня 2020 року № 21**
Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України про схвалення звіту та продовження надання грантової підтримки проєкту від **«21» грудня 2020 року № 39**.

## 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проєкту
Початок – 03.11.2020 р.;
Закінчення – грудень 2021 р.

Загальна вартість Проєкту, грн 1 611 350,00.
Вартість Проєкту по роках, грн.:
1-й рік 471 750,00
2-й рік 1 139 600,00

## 2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

1. Рудаков Дмитро Вікторович, зав. кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», д-р. техн. наук, професор;
2. Інкін Олександр Вікторович, проф. кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», д-р. техн. наук, професор;
3. Ковров Олександр Станіславович, проф. кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», д-р. техн. наук;
4. Деревягіна Наталія Іванівна, доц. кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», канд. техн. наук, доцент;
5. Шерстюк Євгенія Анатоліївна, асистент кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

## 3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Грантоотримувач Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"
Організаційно-правова форма підприємства/установи/організації Державна організація (установа, заклад,підприємство)
Підпорядкованість підприємства/установи/організації Міністерство освіти і науки України
Код ЄДРПОУ 02070743
Код(и) КВЕД 85.42, 85.32, 85.59, 86.21, 72.19, 72.20
Стратегічні напрями наукової діяльності Екологічна безпека, охорона навколишнього середовища, промислова санітарія, загосподарування поствиробничих теренів
ПІБ керівника підприємства/установи/організації Азюковський Олександр Олександрович
Юридична адреса підприємства/установи/організації 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19
Поштова адреса 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19
Фактична адреса 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19
Телефон +380567441411
Адреса електронної пошти rector@nmu.org.ua
Посилання на веб-сторінку підприємства/установи/організації http://www.nmu.org.ua/ua/

Участь субвиконавців не планується

## 4. ОПИС ПРОЄКТУ

**4.1. Мета Проєкту** (до 200 знаків) – створення параметричної основи для переходу шахт від вугілля до системи інноваційних геотермальних модулів для раціонального використання теплового ресурсу відпрацьованого породного масиву при забезпеченні гідробезпеки прилеглих територій.

**4.2. Основні завдання Проєкту** (до 400 знаків)

Обґрунтувати технологічні схеми енергоефективних геотермальних модулів для умов глибоких шахт Донбасу з використанням наявної інфраструктури і матеріально-технічної бази для використання тепла гірських порід і шахтних вод на виробничі та місцеві потреби з підтримкою гідродинамічно безпечного рівня шахтних вод.

Дослідити геотехнологічні, термодинамічні та гідрогеологічні чинники вугільних шахт Донбасу для екологічно безпечного освоєння теплового ресурсу відпрацьованого вуглепорідного масиву.

**4.3. Детальний зміст Проєкту:**

Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Закордонний досвід показує можливість ефективного використання теплової енергії шахтних вод та породного масиву геотермальними модулями теплової потужності до 4,6 МВт. Зважаючи на величезний ресурс низькопотенційного тепла закритих шахт України, його раціональне використання за умов підтримання екобезпеки прилеглих територій представляє важливу науково-практичну проблему, вирішення якої буде сприяти зміцненню енергетичної безпеки країни.

Новизна Проєкту (до 400 знаків)

Уперше буде проведено ранжування вугільних шахт Україні з виділенням найбільш перспективних об’єктів з найбільшим потенціалом використання низькотемпературної геотермальної енергії відповідно до гідрогеологічних умов та існуючої інфраструктури (підземного виробленого простору, геотермального та водного ресурсу, наявних ємностей). В рамках проекту планується розробити методику оцінювання придатного до використання енергетичного потенціалу окремої шахти чи їх групи.

Методологія дослідження (до 400 знаків)

Для вирішення поставлених завдань буде застосовано комплексний підхід, що включає збір, систематизацію й аналіз фактичних даних про гідродинамічні, геотермальні та геотехнічні властивості відпрацьованих породних масивів; математичне моделювання із застосуванням спеціального програмного забезпечення; статистичні оцінки та факторний аналіз теплоперенесення та відновлення рівня шахтних вод; інженерний аналіз запропонованих геотехнологічних рішень і модулів.

## 5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

### 5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

На прикладі закритих шахт Донецького вугільного басейну проаналізовані гідрогеологічні, інженерно-геологічні, геотехнологічні та термодинамічні чинники, які визначають параметри експлуатації геотермальних модулів: водоносні горизонти підробленого масиву, фізико-хімічний склад підземних вод, фільтраційні, ємнісні, теплофізичні властивості порід, техногенна порушеність, об'єми виробленого простору, рівень шахтних вод, швидкість затоплення п виробок, розподіл геотермічного градієнту за площею, температура шахтних вод.

У зв'язку з тим, що значна частина шахт Донбасу знаходиться на неконтрольованій території, дані щодо більшості з них неповні. Були зібрані та проаналізовані дані для 27 закритих шахт Донбасу, де можливе встановлення та експлуатація геотермальних модулів. Глибина виробок змінюється від 320 м до 1200 м, глибина до рівня шахтних вод – від 50 м до 1000 м, потужність зони обводнення – від 50 м до 900 м. Оцінювані шахти розташовані в районах зі значеннями геотермічного потоку від 45 мВт/м$^2$ на північному сході, 50-55 мВт/м$^2$ на шахтах Селидівської групи поблизу м. Покровськ до понад 65 мВт/м$^2$ у центральному Донбасі. Ці чинники є визначальними для обґрунтувань типу та конструкції геотермальних модулів з використання тепла шахтних вод та породного масиву.

На підставі аналізу енергетичного профілю вугільної шахти встановлено зменшення її енергетичних потреб в пост-експлуатаційний період у кілька разів за рахунок припинення видобутку вугілля та роботи потужного (до 5 МВт) гірничодобувного обладнання. При цьому виникає дефіцит теплової енергії і зростає частка електроенергії в енергобалансі непрацюючої шахти, яка витрачається переважно на водовідлив для підтримання гідродинамічно безпечного рівня шахтних вод. Показана можливість покриття частини теплоенергетичних потреб за рахунок освоєння теплового ресурсу геотермальними модулями, інтегрованими до системи опалення.

Запропоновано енергетичні та вартісні критерії оцінки ефективності геотермальних модулів різного типу, які базуються на зіставленні отриманої теплової енергії з енергетичними витратами; ці критерії можуть визначати пріоритетність та етапність встановлення геотермальних модулів серед значної кількості потенційних ділянок.

Максимальна оцінена теплова потужність геотермальних модулів, які можуть бути встановлені на базі водовідливів непрацюючих шахт Донбасу, становить кілька МВт з коефіцієнтом перетворення тепла *COP* 4,1 – 6,8, що узгоджується з фактичними даними про модулі такого типу, які вже експлуатуються за кордоном. Потужність циркуляційних геотермальних модулів для затоплених шахт Селидівської групи, де наявні споживачі теплової енергії, складає до 150 кВт при *COP* = 3,5 – 4,5. Для запропонованих геотермальних модулів та їх теплової потужності на прикладі шахт Селидівської групи оцінені параметри відбору шахтних вод, які забезпечують їх гідродинамічно безпечний рівень. Розраховане підвищення рівня шахтних вод не досягає підошви водоносного горизонту, який може використовуватися для місцевого водопостачання.

Для розробки моделей теплоперенесення навколо геотермальних модулів було проведено аналіз результатів наявних на цей час лабораторних досліджень, натурних вимірювань щодо гідродинамічного режиму та термодинамічного стану породного масиву та шахтних вод за різних технологічних та природних умов.

Показано, що основними чинниками для модулів відкритого типу є мінералізація води, розташування ставків-накопичувачів, рельєф, наявність доступних вертикальних виробок, величини водовідбору та геотермічного градієнту. Модулі закритого типу на основі геотермальних зондів можуть бути встановлені у верхній частині стволів непрацюючих шахт з відбором тепла від гірських порід і у свердловинах в зоні затоплення з відбором тепла від шахтних вод. Завдяки незначному діаметру труб (до 0,07 м) U-подібні зонди можуть бути розміщені майже у всіх доступних вертикальних виробках, тоді як використання коаксіальних зондів з більшою тепловою потужністю обмежено їх більшим діаметром (понад 0,14 м).

З метою обґрунтування моделей теплоперенесення було проведено аналіз добре задокументованих натурних вимірювань показників роботи геотермальних зондів на типових прикладах експериментальних ділянок на полігоні у м. Вілліх і шахті «Едуард» біля м. Ахен (Німеччина) і біля м. Ізмір (Туреччина). Зокрема, оцінено вплив теплопровідності матеріалів-заповнювачів та оточуючих ґрунтів і шахтних вод, їх теплоємності на перебіг геотермального тестування або експлуатації зондів для вироблення тепла.

Для оцінки показників експлуатації геотермального модуля відкритого типу розроблені дві математичних моделі, засновані на різних підходах. Перший підхід реалізовано на основі співвідношень гідравліки та теплообміну для розрахунку температури води, яка відбирається водовідливом з шахтного ствола, сполученого з горизонтальними виробками, які транспортують воду з горизонтів відпрацювання на різній глибині. На відміну від існуючих така модель дозволяє без дискретизації затопленого породного масиву з достатньою для практики точністю визначати діапазон очікуваної температури води, що відбирається, та його довготривалі зміни у часі. Другий підхід засновано на чисельному моделюванні течії підземних і шахтних вод та переносу тепла у порушеному масиві в зоні впливу геотермального модулю, що доцільно для кількісного аналізу та прогнозу температурного режиму породного масиву і шахтних вод у разі значної варіації технологічних та природних умов. Верифікація розроблених моделей проведена для закритих шахт Селідівської групи у Донбасі. Показано домінуючий вплив гідравлічного опору виробок на різних глибинах над глибиною відбору шахтних вод при формуванні їх температури, що має важливе практичне значення при оптимізації водовідливу з точки зору максимального відбору тепла.

Розроблені моделі теплоперенесення в геотермальних модулях закритого типу базуються на застосовуванні диференціальних рівнянь перенесення тепла в трубах при теплообміні з оточуючим середовищем та детальним визначенням термічних опорів елементів зондів відповідно до їх геометрії. Верифікація моделей теплоперенесення в геотермальних модулях закритого типу на прикладах трьох експериментальних ділянок показала хорошу збіжність з результатами вимірювань та переважно незначне відхилення від них, прийнятне для практики: середня абсолютна й відносна похибка розрахунків температури теплоносія на виході з зонду становить 0,1 °C або 1,28 %. Досягнута збіжність розрахунків з результатами експериментів підтверджує адекватність розробленої моделі і можливість її застосування для оцінок енергетичної ефективності геотермальних зондів.

Розроблено комплексний критерій для ранжування шахт – потенційних ділянок виробництва геотермального тепла стосовно ефективності виробництва теплової енергії. Ранг ділянки за цим критерієм визначається усередненням рангів ділянок, розрахованих за існуючими параметрами та критеріями, які включають коефіцієнт перетворення теплових насосів, уведений авторами звіту енергетичний критерій, теплову потужність систем, прибуток від експлуатації та обсяг скорочення викидів. Ранжування закритих шахт Донбасу за окремими критеріями та загальним критерієм дозволило визначити найбільш перспективні ділянки у разі експлуатації на них геотермальних модулів відкритого та закритого типів і оцінити діапазони техніко-економічних та екологічних показників їх експлуатації.

Для обґрунтувань щодо створення та експлуатації геотермальних модулів на виділеній за результатами ранжування території Селідівської групи шахт був виконаний комплексний аналіз результатів натурних вимірювань гідродинамічних та фільтраційних характеристик порушеного масову, визначені діапазони значень коефіцієнту фільтрації, шахтних водоприпливів, ємності порушених порід, швидкості водної міграції речовин та тепла в умовах дренованих шахт.

В результаті моделювання визначені параметри технічних рішень щодо відбору тепла з шахтних вод при водовідливі з дренованої шахти №1-3 «Новогродівська». Розроблена концепція геотермального модулю з сезонним використанням підземного сховища теплої (холодної) води і її термічним використанням з можливістю вироблення електричної енергії при скиданні нагрітої води влітку до підземних виробок.

**5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами**

На відміну від геотермальної енергетики на основі використання глибоких термальних вод запропоновані геотермальні модулі частково або повністю використовують інфраструктуру і матеріально-технічну бази закритих шахт, створену під час видобутку: водовідливи, насосні станції, підземні виробки, що значно скорочує капітальні витрати.

Так, у геотермальних модулях застосовується система водовідливу шахти, яка працює для підтримання гідродинамічно безпечного рівня шахтних вод, розташовані на денній поверхні трубопроводи та пруди-відстійники, окремі ємності для теплоносіїв та гірничі виробки різного розмиру для відбору шахтних вод та їх скиду після термічного використання. Встановлення геотермальних зондів у дегазаційних та інших свердловинах на території шахти та найближчих населених пунктів дозволяє залучити фактично невикористовуваний тепловий ресурс. Теплова енергія може використовуватися як безпосередньо на шахті для опалення адміністративних та інших будівель, так і подаватися до найближчих населених пунктів через існуючу або модернізовану систему водопроводів шахти, що дозволяє зменшити споживання викопного палива при виробництві теплової енергії та зменшити шкідливі викиди в атмосферу.

Експлуатація геотермальних модулів у діапазоні невисоких температур до 35 °С зменшує інтенсивність випадіння твердого осаду в теплообмінниках та трубах порівняно з високотемпературними геотермальними системами, що дозволяє збільшити період безремонтної експлуатації. Крім того, для обслуговування геотермальних модулів та забезпечення їх стабільної роботи може бути частково залучений персонал шахти, що дозволить зберегти частину робочих місць після її закриття.

На відміну від існуючих методик розрахунку термогідродинамічних параметрів геотермальних модулів розроблені й верифіковані в ході виконання проекту математичні моделі враховують зміну температури теплоносія при його русі в зондах, особливості їх внутрішньої геометрії та обумовлені цим додаткові термічні опори. Це дозволяє обґрунтовано визначати параметри енергоефективності систем (температура теплоносія і сумарний тепловий потік, коефіцієнт перетворення теплового насоса і його потужність).

Запропонований критерій ефективності геотермальних систем, що визначається енергетичним балансу геотермального модулю, на відміну від існуючих критеріїв, дозволяє дати комплексну оцінку з урахуванням енергетичної, техніко-економічної, та екологічної складових.

**5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)**

Для оцінки ефективності запропонованих геотермальних модулів проведено зіставлення їх розрахованої теплової потужності з потребами споживачів теплової енергії в кліматичних умовах Донбасу. Показано, що теплове навантаження, яке необхідне протягом року в будівлях з офісними приміщеннями для перебування до 600 осіб (до 120 кВт та житловими приміщеннями до 2000 осіб (до 1,8 МВт), може бути покрите за рахунок геотермальних модулів відповідної потужності, створення яких є цілком реалістичним на основі теплового ресурсу закритих шахт. Для охолодження цих приміщень влітку замість традиційних кондиціонерів доцільно використання теплових насосів з передачею надлишку тепла до шахтних вод.

Обґрунтовані технологічні схеми та раціональні параметри геотермальних модулів відкритого та закритого типів в межах території непрацюючої шахти з урахуванням сезонних коливань температури повітря. Очікуване зменшення емісії $CO_2$ за рахунок експлуатації модулів та відповідної економії вугілля залежно від їх потужності становитиме кілька тисяч тонн за опалювальний сезон.

Розроблені математичні моделі дозволяють визначати енергетичні параметрі геотермальних модулів при різних технологічних режимах, що може бути використане для оптимізації експлуатаційних параметрів з урахуванням існуючої інфраструктури, скорочення витрат на виробництво теплової енергії, та визначення безпечних діапазонів рівня шахтних вод при захисті прилеглих територій від підтоплення і засолення поверхневих вод.

Шляхом аналізу можливих проектних рішень стосовно закриття шахт встановлено тепловий потенціал території шахт Селидівської групи із забезпеченням прийнятного еколого-гідрогеологічного режиму. Термічне використання усіх шахтних вод дозволить задовільнити теплові потреби близько 5 тис. мешканців з місцевих громад.

Для шахти № 1-3 «Новогродівська» розроблено технологічну схему геотермального модулю на основі підземного кільцеподібного сховища тепла (холоду) об'ємом до 63 тис. $м^3$ у існуючих виробках. Запропонована система може експлуатуватися: 1) із заміщенням теплої води на холодну відповідно до сезону, 2) з повним осушенням накопичувача взимку і скидом теплої води влітку з виробленням електричної енергії; при цьому обидва варіанти показують позитивний річний енергетичний баланс з виробленням 450–750 МВт·год тепла.

На основі аналізу ефективності шахт – потенційних ділянок для геотермальних модулів виконано ранжування, що визначає пріоритетність їх розміщення на закритих шахтах Донбасу.

**5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.**

Обґрунтовані у проекті технічні рішення щодо використання шахтних вод на базі шахт Селідівської групи у Донбасі планується подати органам місцевої влади вуглевидобувних регіонів як пропозиції щодо пілотного проекту зі створення геотермального модулю для місцевого теплозабезпечення.

Можливості практичного використання результатів проекту, що були представлені від НТУ «Дніпровська політехніка» на Хакатоні вугледобувних міст у грудні 2021 р. (https://hub-synchro.space /coalhack-ukr), будуть розширені та подані у вигляді пропозицій компетентним органам, відповідальним за реалізацію «Концепції Державної цільової програми справедливої трансформації вугільних регіонів України на період до 2030 року».

Набутий досвід планується висвітлити у монографії з практики раціонального використання геотермальної енергії у закордонному видавництві, на сайті Грантоотримувача, та у розробленому навчальному курсі з гідрогеотермальної енергетики з можливістю дистанційного навчання на базі СУН Moodle.

Спільно з партнерами з Рурського університету м. Бохум (факультет геонаук) планується подати пропозиції компаніям відповідного профілю в Німеччині та інших країнах ЄС з можливістю раціонального та екобезпечного використання теплових ресурсів закритих шахт.

Примітка: Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування

**Науковий керівник Проєкту**

Зав. кафедри гідрогеології та інженерної геології
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка», д-р техн. наук, проф. Дмитро РУДАКОВ