

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ЯК ТЕПЛОНОСІЯ У НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНИХ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЗІ ЗВОРОТНИМ ЗАКАЧУВАННЯМ

Отримано 23 лист. 2025 р.; рекомендовано до публікації 09 груд. 2025 р.
Доступно онлайн 31 груд. 2025 р.

Зур'ян О. В.

Автор для кореспонденції: Зур'ян Олексій,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна

Анотація. Післявоєнне відновлення України передбачає побудову сучасної енергетичної інфраструктури на принципах сталого розвитку, енергоефективності та кліматичної нейтральності. Особливий акцент робиться на розвитку технологій теплових насосів, децентралізованих систем теплопостачання та використанні локальних відновлюваних низькопотенційних ресурсів. У цьому контексті постає необхідність всебічного дослідження екологічних аспектів геотермальних теплонасосних систем на підземних водах, визначення меж їх безпечної експлуатації та обґрунтування умов їх оптимального застосування в майбутній системі сталого енергозабезпечення України.

У роботі здійснено комплексний аналітичний огляд екологічних аспектів використання геотермальних теплонасосних систем відкритого типу, що працюють за принципом «видобуток – нагнітання» теплоносія у водоносні горизонти. Дослідження ґрунтується на узагальненні сучасних світових наукових публікацій щодо польових спостережень, лабораторних досліджень та математичного моделювання, доповнених екологічно-нормативним аналізом моделювання теплових впливів на підземні води, аналізі нормативно-правової бази України та країн Європейського Союзу. Особлива увага приділена питанням температурного та хімічного впливу на водоносні горизонти під час довготривалої експлуатації таких систем, а також оцінюванню їх екологічної безпеки в контексті українських гідрогеологічних умов. Проаналізовано чинну нормативну базу України щодо охорони підземних вод, водокористування, рекреаційного та технічного водопостачання, а також визначено прогалини, пов'язані з відсутністю спеціального регулювання геотермальних систем з реін'єкцією теплоносія.

У роботі сформовано комплекс критеріїв екологічної обережності, включно з обмеженням на температуру повернення води, вимогами до відсутності хімічних змін, контролем за рівнем та дебітом свердловин, а також необхідністю гідрогеологічного моніторингу. Запропоновано адаптацію кращих європейських практик (Нідерланди, Німеччина, Швейцарія) до умов України. Аналітичний огляд демонструє, що впровадження замкнених геотермальних систем з поверненням теплоносія може бути екологічно безпечним та ефективним рішенням для розвитку сталої енергетики України за умови дотримання визначених критеріїв та належного нормативного супроводу.

Ключові слова: геотермальні теплонасосні системи, водоносні горизонти, підземні води, екологічний ризик, реін'єкція, теплова аномалія, низькопотенційна енергетика, сталий розвиток.

Постановка проблеми

У сучасних умовах трансформації глобальної енергетики питання відмови від викопних ресурсів та переходу до відновлюваних джерел енергії набувають стратегічного значення. Європейський досвід демонструє, що саме технології низькопотенційного тепла відіграють ключову роль у декарбонізації будівельного сектору, який є одним з найбільших споживачів теплової енергії. У цьому контексті геотермальні теплонасосні системи на основі підземних вод є важливим ресурсом, що дозволяє отримувати теплову енергію незалежно від погодних умов, забезпечувати стабільність теплопостачання та знижувати навантаження на енергосистему. Геотермальні системи на підземних водах розглядаються як

одна з технологій, здатних забезпечити стабільне, дешеве і низьковуглецеве опалення для житлових, комерційних і промислових об'єктів.

Поряд з очевидними перевагами виникає комплекс екологічних, гідрогеологічних і регуляторних питань, оскільки підземні води є цінним природним ресурсом і відіграють важливу роль у забезпеченні водної безпеки країни. Особливо це стосується систем з циркуляцією води через пару свердловин – видобувну та нагнітальну, – що потребують науково обґрунтованого аналізу їх впливу на температурний режим і хімічний стан водоносних горизонтів, а також відповідності сучасним вимогам українського і європейського законодавства щодо охорони підземних вод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика використання геотермальної енергії, зокрема низькопотенційного тепла ґрунту та підземних вод, посідає помітне місце в сучасних міжнародних дослідженнях. Узагальнений огляд стану та тенденцій прямого використання геотермальної енергії подано в роботі [1], де показано, що технології теплових насосів на основі ґрунту й підземних вод є одними з найдинамічніше зростаючих сегментів сектору. А в роботах [2, 3] автори детально розглядають термогеологічні основи роботи ґрунтових і водяних теплових насосів, підкреслюючи важливість гідрогеологічних умов, властивостей порід і підземних вод для ефективності та довгострокової стійкості таких систем.

У контексті сталого розвитку та екологічної безпеки значна увага приділяється оцінці впливу геотермальних систем на довкілля. Автор [4] одним із перших системно сформулював підхід до розуміння геотермальної енергії як ресурсу, що може бути сталим за умови дотримання балансу між відбором і природним або штучним відновленням. Подальший розвиток цієї проблематики відображено в огляді [5], де наведено різні підходи до оцінювання сталості геотермальних систем, включно з екологічними, економічними та соціальними критеріями. Питання економічних аспектів сталого функціонування геотермальних станцій розглянуто в праці [6], де показано, що саме оптимізація режимів експлуатації й структури витрат дозволяє поєднати екологічні й фінансові вимоги.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з термічним використанням підземних вод та оцінкою його впливу на якість води. Автори дослідження [7] ставлять питання, чи можна вважати термічне використання ґрунтових вод «забрудненням» у нормативному та екологічному сенсі, і доходять висновку, що за дотримання певних температурних та просторових обмежень такий вплив є прийнятним і керованим. Також у роботі [8] на основі лабораторних і польових досліджень автор показує, що зміна температури в аноксичних водоносних горизонтах може впливати на мобільність деяких мікроелементів (зокрема арсену та заліза), але масштаби й значущість цих змін залежать від конкретних гідрогеохімічних умов пласта.

Чимало робіт присвячено аналізу й моделюванню процесів реін'єкції в геотермальних резервуарах. Так, наприклад, у роботі [9] розглядається температурна реакція піщаникових резервуарів на тривале нагнітання охолодженої води; на основі числового моделювання автори показують вплив відстані між свердловинами, дебітів і теплового навантаження на формування термічного фронту та можливість термічного прориву. Узагальнений огляд розвитку геотермальних систем централізованого теплопостачання, зокрема з використанням підземних вод і реін'єкції, наведено в роботі [10], де наголошується, що саме циркуляційні схеми з поверненням води в горизонт є стандартом в європейській практиці завдяки поєднанню високої енергоефективності та контрольованого впливу на довкілля.

Питання довгострокової «сталості» геотермальних систем, з з урахуванням впливу на ресурси тепла та підземних вод, додатково аналізуються в публікації [11], де окреслено ключові дослідницькі завдання, пов'язані з оцінкою відновлюваності геотермальних ресурсів. У дослідженні [12] розглядаються геотермальні технології з позицій аналізу життєвого циклу з порівнянням їхнього сумарного екологічного сліду (включно з парниковими викидами та іншими впливами) з альтернативними джерелами генерації, і обґрунтовується висновок про конкурентоспроможність геотермальних систем у низьковуглецевих сценаріях.

Формулювання мети дослідження

Враховуючи результати проведеного аналізу наукових джерел, можна зазначити, що хоча ефективність геотермальних теплонасосних систем та їх енергетичні переваги вивчені досить широко, залишається низка аспектів, які недостатньо опрацьовані в контексті гідрогеологічних умов України та вимог українського природоохоронного законодавства. Значною мірою нерозробленими залишаються питання, пов'язані зі створенням національних методичних обмежень і стандартів для проектування та експлуатації систем цього типу.

Отже, метою цього дослідження є комплексний аналітичний огляд сучасних наукових, технічних та нормативних підходів до оцінювання екологічної безпеки геотермальних теплонасосних систем з використанням підземних вод у циркуляційних схемах «видобуток – нагнітання», а також визначення умов, обмежень та критеріїв їх безпечного застосування у водоносних горизонтах, що формують ресурси питних підземних вод України. Дослідження спрямоване на інтеграцію гідрогеологічних, гідрогеохімічних та нормативно-правових аспектів з метою формування цілісного уявлення про потенційні екологічні ризики й можливості безпечної експлуатації таких систем у контексті сучасних вимог сталого розвитку.

Наукова новизна аналітичного дослідження полягає в тому, що на відміну від наявних робіт, які зазвичай фокусуються або на фізичних процесах теплоперенесення, або на глибоких геотермальних системах, це дослідження пропонує цілісний міждисциплінарний аналіз, що охоплює неглибокі прісні водоносні горизонти, характерні для умов України та важливі з погляду водної безпеки.

У дослідженні системно зіставлено міжнародний досвід з національними умовами України, включаючи сучасні стратегічні документи щодо інтеграції України до ЄС, декарбонізації, збільшення частки ВДЕ та побудови стійкої післявоєнної енергетики. Такий контекстуалізований підхід дозволяє не лише описати наукові тенденції, а й визначити їх релевантність для українських реалій.

Практична цінність роботи полягає в тому, що вона формує аналітичну основу для подальшої розробки методичних матеріалів, рекомендацій або елементів майбутнього нормативного регулювання застосування геотермальних систем з поверненням води у водоносний горизонт. Отримані узагальнення можуть бути використані як під час попереднього обґрунтування проєктів

теплопостачання на базі підземних вод, так і під час оцінки екологічних ризиків у містах та регіонах України, що прагнуть впроваджувати низьковуглецеві технології з урахуванням вимог сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу дослідження

Оцінка впливу геотермальних систем на підземні води у світовій науковій практиці базується на поєднанні трьох основних груп методів: польових спостережень, лабораторних досліджень та математичного моделювання, доповнених екологічно-нормативним аналізом.

У світовій літературі з питань неглибокої геотермії та експлуатації відкритих систем «видобуток – нагнітання» наводиться широко, але в цілому узгоджене коло значень температурних та хімічних змін у водоносних горизонтах, які виникають під час роботи геотермальних теплонасосних систем. Ці дані дозволяють сформулювати реалістичні діапазони впливів, які, з урахуванням гідрогеологічних характеристик України, можуть бути орієнтирами для попередньої екологічної оцінки.

Більшість досліджень, виконаних у Європі, Північній Америці та Азії, показують, що типове зниження або підвищення температури підземних вод під час роботи системи становить від ± 1 до ± 5 °C у зоні безпосереднього впливу свердловини. Роботи [2, 4] показують, що при дебітах 20–50 м³/год термічний фронт у неглибоких водоносних горизонтах формує локальну зону змінених температур радіусом 20–80 м залежно від параметрів пласта. Підтвердження цих значень міститься й у числових моделях, зокрема в [8], де, за умови сталого режиму відбору та нагнітання, амплітуда температурних змін не перевищує декількох градусів навіть у довгостроковій перспективі.

Характерним є також спостереження, що температурні зміни мають чітко локалізований характер і затухають у напрямку природного потоку ґрунтових вод, що підтверджено дослідженнями [12, 13] та інших авторів. Це означає, що масштаб впливу визначається насамперед гідродинамічними умовами конкретного горизонту, коефіцієнтом фільтрації, градієнтом природного потоку та водопроникністю пласта [14].

Щодо хімічного складу підземних вод, аналіз літератури показує, що при зміні температури в межах ± 2 –4 °C хімічні параметри залишаються в межах природної варіабельності, за винятком окремих випадків, де температура підвищується понад 10 °C або система працює у водах з високою мінералізацією чи специфічною мінералогією. У дослідженнях [15] простежується, що найчутливішими є компоненти, пов'язані з редокс-процесами: залізо, марганець, арсен. Проте їх мобілізація спостерігається лише за умов істотної зміни температури (понад 10 °C) або порушення гідрохімічної рівноваги за рахунок втручання у водообмін, тоді як у схемах з поверненням води в горизонт хімічна стабільність зазвичай зберігається.

Зіставлення цих даних з гідрогеологічними умовами України свідчить, що більшість експлуатаційних горизонтів у верхніх 100–150 м, які формують ресурси прісних підземних вод, мають коефіцієнти фільтрації від 1 до 10–20 м/добу, що близькі до показників водоносних горизонтів у Центральній та Північній Європі. Це означає, що

масштаб температурного впливу в українських умовах буде близьким до європейських даних, тобто з характерними амплітудами ± 1 –4 °C та радіусом поширення декілька десятків метрів за середніх дебітів.

Кліматичні умови України також сприяють стабільності таких систем, оскільки амплітуда природних сезонних змін температури ґрунту у верхніх шарах сягає 15–20 °C, але вже нижче 15–20 м вона зменшується до 1–2 °C. Це означає, що водоносні горизонти на глибинах 30–80 м є природно термостабільними, а тому зміна температури на кілька градусів у локальній зоні впливу не виходить за межі природних флуктуацій у приверхових частинах розрізу.

Слід також зазначити, що в Україні горизонтами питних вод зазвичай виступають алювіальні, лесово-алювіальні та піщано-глинисті товщі четвертинного та частково неогенового віку. У таких відкладах поширені мінеральні фази — кальцит, доломіт, глинисті мінерали, сидерит, — для яких зміни розчинності при незначних температурних градієнтах (1–4 °C) не призводять до суттєвих зрушень у pH, Eh або мінералізації, що узгоджується з концепціями термочутливості, запропонованими у [2] та [12].

Таким чином, літературні дані дають підстави стверджувати, що в межах тих температурних амплітуд, які характерні для типових геотермальних систем низького потенціалу, хімічний склад прісних підземних вод України залишається стабільним, тоді як зміни температури мають локальний і передбачуваний характер. Ця інформація формує підґрунтя для визначення критеріїв екологічної обережності та подальшої адаптації міжнародного досвіду до умов України.

Регулювання використання підземних вод у геотермальних теплонасосних системах в Україні базується на вимогах Водного кодексу України, Кодексу України про надра, Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», а також підзаконних нормативних актів, що стосуються охорони підземних вод, спеціального водокористування та геологічного вивчення надр. У контексті функціонування систем типу «видобуток – нагнітання» ключовими є питання збереження якості питних підземних вод, недопущення забруднення та дотримання екологічних обмежень під час закачування води в надра.

Нормативний аналіз показав, що чинне законодавство України ще не має спеціалізованих вимог до геотермальних систем типу «видобуток – нагнітання». Однак загальні положення Водного кодексу, Кодексу України про надра та підзаконних актів щодо охорони підземних вод дозволяють використовувати зазначені технології за умови непогіршення якості вод, дотримання вимог екологічної безпеки та проведення регулярного моніторингу параметрів підземних вод. Це створює достатню базу для адаптації кращих європейських підходів до українських умов.

Регулювання геоциркуляційних систем у країнах Європейського Союзу та Швейцарії базується на поєднанні водоохоронного законодавства та спеціальних технічних норм, що визначають екологічні критерії використання підземних вод для низькопотенційної

геотермальної енергетики. Найбільш усталені та технологічно розвинені нормативні моделі сформувалися в Нідерландах, Німеччині та Швейцарії. Аналіз їх підходів дозволяє визначити ті регуляторні елементи, що можуть бути адаптовані та імplementовані в нормативно-правове поле України.

Нідерланди вважаються європейським лідером у впровадженні систем типу ATEs (Aquifer Thermal Energy Storage), де основний акцент робиться на інтегрованому управлінні підземними водами. На рівні законодавства ця сфера регулюється Waterwet (Водним законом), який визначає загальні вимоги до охорони підземних вод та необхідність отримання водного дозволу для відбору і реін'єкції. Спеціальні регламенти – Besluit bodemenergiesystemen та Waterregeling – задають технічні та екологічні критерії роботи систем, включно з допустимими змінами температури та вимогами до моніторингу. Наприклад, у статті 6.27 і 6.29 Waterregeling [16] зазначено, що, подаючи заявку на встановлення системи, потрібно вказати «схему повернення води, її склад, температуру та заходи для запобігання негативних впливів». Ключова особливість нідерландської моделі полягає у створенні так званих інтерференційних зон, де розміщення систем координується для запобігання взаємному негативному впливу та забезпечення теплового балансу підземного середовища. Цей підхід дає змогу уникати надмірного накопичення «теплових шлейфів» і є надзвичайно ефективним у густо забудованих міських районах.

Підхід Німеччини базується на комбінації загального водного права (Wasserhaushaltsgesetz, WHG) та обов'язкового дотримання технічних стандартів Асоціації німецьких інженерів (VDI 4640) та стандартів DVGW. WHG встановлює принципову вимогу непогіршення хімічного та кількісного стану підземних вод, тоді як технічні норми регламентують конструкцію свердловин, допустимі температурні навантаження, мінімальні відстані до зон питного водопостачання та процедури контролю [17]. Порівняно з Нідерландами німецька система менш централізована й більше залежить від рішень земельних органів, проте має чіткі технічні вимоги, що забезпечують екологічну безпеку систем за рахунок стандартизації проектних рішень.

Швейцарія використовує одну з найжорсткіших у Європі моделей охорони підземних вод. Федеральні закони (GSchG, GSchV) задають суворі температурні обмеження для водних об'єктів, тоді як технічні стандарти Швейцарського товариства інженерів та архітекторів (SIA 384/6, SIA 384/7) встановлюють детальні вимоги для геоциркуляційних систем – від допустимих змін температури у водоносному горизонті до обмежень на розміщення свердловин у зонах охорони питних вод [18]. Значна роль кантональних «концепцій тепловикористання» дозволяє адаптувати регулювання до локальних гідрогеологічних умов. Швейцарська модель особливо цінна своїм чітким зонуванням територій (S1–S3), де правила експлуатації систем визначені відповідно до рівня вразливості підземних вод.

Порівняння трьох моделей дає змогу визначити низку принципів, які є релевантними для українських умов.

По-перше, ключовим елементом екологічної обережності є встановлення допустимих температурних діапазонів і максимального ΔT при відборі та поверненні води. У всіх аналізованих країнах реін'єктована вода не повинна змінювати температуру горизонту більш ніж на кілька градусів, а абсолютна температура має перебувати в межах, що унеможливають біологічну чи хімічну деградацію підземних вод. По-друге, обов'язковим є дотримання принципу, за яким якість реін'єктованої води не повинна бути гіршою за природну, що унеможливає надходження у водоносний горизонт речовин, здатних спричинити забруднення або мобілізацію небажаних компонентів (As, Fe, Mn тощо). По-третє, у Нідерландах, Німеччині та Швейцарії системи такого типу не можуть працювати без регулярного моніторингу температури, рівня та хімічного складу підземних вод, що забезпечує своєчасне виявлення ризиків. По-четверте, у всіх країнах діють просторові обмеження: системи заборонені або суттєво обмежені в зонах охорони питної води, а в Нідерландах додатково впроваджено зонування відповідно до щільності розміщення систем.

Отже, для України найперспективнішою є модель, що поєднує німецький підхід до стандартизації конструктивних і технічних рішень, швейцарське зонування територій за рівнем гідрогеологічної вразливості та нідерландські принципи управління інтерференцією й тепловим балансом. Це дозволить сформувати комплексну нормативну базу, у якій вимоги до температури, хімічного складу та моніторингу будуть чітко визначені на рівні державних стандартів, а дозвільні процедури будуть прозорими, передбачуваними та орієнтованими на захист підземних вод. *нагнітання» в Україні*

З урахуванням аналізу світових практик, гідрогеологічних особливостей України та вимог чинного законодавства доцільним є формування комплексу базових рекомендацій, спрямованих на мінімізацію екологічних ризиків під час впровадження геотермальних систем з двома свердловинами – видобувною та нагнітальною. Ці рекомендації не замінюють собою нормативних вимог, але можуть слугувати основою для національних методичних підходів, а також орієнтиром для проєктантів, екологів та органів погодження.

1. Гідрогеологічні критерії екологічної обережності

1.1. Вибір водоносного горизонту. (Перевага має надаватися горизонтам з високою проникністю та стабільним дебітом, де вплив температурних коливань швидко згасає. Недопустиме використання горизонтів, що є основним джерелом централізованого питного водопостачання, або тих, де існує ризик змішування з питними водами).

1.2. Обмеження на відстані між свердловинами. (Відстань має забезпечувати відсутність короткого гідравлічного замикання. З урахуванням європейської практики рекомендована мінімальна дистанція становить 40–80 м, однак вона має бути уточнена моделюванням).

1.3. Урахування гідродинаміки горизонту. (Обов'язкове визначення швидкості руху підземних вод, градієнтів, напрямку природного потоку. Необхідно уникати

ситуацій, коли зміна температури може поширюватися в напрямку існуючих водозаборів).

2. Температурні критерії екологічної обережності

2.1. Межі допустимого температурного впливу. (З огляду на відсутність національних норм і базуючись на практиці, як рекомендовані орієнтири можна прийняти: $\pm 2-3^\circ\text{C}$ як діапазон, що вважається екологічно нейтральним; до $\pm 5^\circ\text{C}$ – допустимий вплив за умови, що не зафіксовано змін хімічного складу; понад $\pm 5^\circ\text{C}$ – потребує спеціального обґрунтування та моделювання).

2.2. Контроль сезонних коливань. (Важливо не допускати накопичення теплового ефекту за роки експлуатації. Система повинна мати баланс між сезонним відбором і поверненням теплоти).

3. Хімічні та мікробіологічні критерії

3.1. Стабільність хімічного складу. (Вода, що повертається в горизонт, має відповідати вихідним параметрам за основними іонами, мінералізацією та pH. Рекомендовано проводити щонайменше кварталний моніторинг у перші два роки експлуатації).

3.2. Контроль мікробіологічних ризиків. (Підвищення температури може активувати бактеріальні процеси, тому: слід регулярно перевіряти бактеріальне число, уникати застійних зон у системі, використовувати матеріали труб з низьким біокорозійним потенціалом).

4. Технічні критерії для проектування свердловин і обладнання

4.1. Конструкційні вимоги. (Свердловини повинні мати герметичні колони для запобігання перетіканням між горизонтами. Рекомендується використання високотемпературних полімерних матеріалів, стійких до довгострокових коливань температури).

4.2. Захист від забруднення. (Нагнітальна свердловина має бути оснащена пристроями запобігання підсмоктуванню поверхневих вод. У зоні впливу забороняється розміщення об'єктів, що становлять ризик для якості підземних вод (складів ПММ, вигрібних ям, автопарків тощо).

5. Моніторинг та експлуатаційний контроль

5.1. Програма моніторингу. (Рекомендовано контролювати: температуру (постійний датчик або щомісячні заміри), рівні води, електропровідність, мінералізацію, pH, основні іони (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), показники мікробіології).

5.2. Створення довгострокових спостережних свердловин. (Ідеально – дві моніторингові свердловини: одна між видобувною та нагнітальною, друга – нижче за потоком).

6. Рекомендації щодо нормативного розвитку в Україні

На основі порівняння з регулюванням ЄС доцільними є такі пропозиції:

- Розробити чіткі температурні межі впливу (аналог DVGW W 120-2).

- Ввести поняття «геотермального впливу на підземні води».
- Розробити окремий стандарт для систем типу «видобуток – нагнітання».
- Визначити обов'язкові параметри та періодичність моніторингу.
- Інтегрувати ці системи в національні стратегії декарбонізації та енергоефективності.

Отже, використання геотермальних теплонасосних систем з поверненням води у водоносний горизонт може бути екологічно безпечним, якщо дотримуватися комплексу превентивних заходів. Запропоновані критерії екологічної обережності відображають найкращі міжнародні практики й можуть стати основою для формування українських нормативів у контексті євроінтеграції. Їх застосування дозволить мінімізувати ризики для підземних вод, забезпечити стабільність гідрогеологічного середовища та підвищити ефективність впровадження геотермальних технологій в Україні.

Висновки

Проведений аналіз наукових досліджень, нормативно-правових вимог та екологічних аспектів використання геотермальних теплонасосних систем типу «видобуток – нагнітання» дозволяє сформулювати такі основні висновки:

Геотермальні системи з поверненням води у водоносний горизонт є перспективною технологією низьковуглецевого теплопостачання, яка відповідає стратегічним цілям України щодо декарбонізації, підвищення енергоефективності та диверсифікації джерел теплоти. Їх широке застосування потенційно здатне зменшити залежність від викопних видів палива та знизити викиди парникових газів у секторі теплопостачання.

Температурний вплив геотермальних систем має локальний характер, а його масштаб визначається гідрогеологічними особливостями горизонту, дебітом і режимом роботи системи. Світові дослідження показують, що теплові збурення у межах $\pm 2-5^\circ\text{C}$ не призводять до суттєвих змін хімічного складу підземних вод, що підтверджує екологічну безпечність таких систем за умови правильного проектування.

Хімічні зміни у водоносних горизонтах під час роботи систем «видобуток – нагнітання» переважно незначні, оскільки вода, що повертається в пласт, зазвичай зберігає природний іонно-сольовий склад. Потенційні мікробіологічні ризики можуть бути мінімізовані завдяки добору відповідних матеріалів труб, відсутності застійних зон і належній експлуатації системи.

Українське законодавство поки що не містить спеціалізованих норм, які б регламентували допустимі температурні зміни або вимоги для систем реін'єкції підземних вод у контексті геотермальних технологій. Однак загальні положення Водного кодексу України та Кодексу України про надра формують правову основу, що дозволяє впроваджувати такі системи за умови непогіршення якості підземних вод та недопущення порушення їх природного режиму.

Адаптація європейських регуляторних практик (зокрема вимог Німеччини, Нідерландів, Австрії та Данії) до українських умов може стати основою для створення національних стандартів. Рекомендованими є введення температурних меж впливу, формування єдиних правил для проєктування свердловин та встановлення чітких процедур моніторингу якості підземних вод.

На основі аналізу сформульовано комплекс критеріїв екологічної обережності включно з гідрогеологічними, температурними, хімічними, мікробіологічними та технічними вимогами. Дотримання цих критеріїв є ключовою умовою для забезпечення екологічної безпеки систем «видобуток – нагнітання». І ці критерії можуть бути використані для створення методичних рекомендацій для формування нормативної бази.

Запропонований аналітичний підхід створює основу для подальшого розвитку регуляторних документів у сфері підземної геотермальної енергетики, а також визначає напрями подальших наукових досліджень – удосконалення моделей теплопереносу, аналіз мікробіологічних процесів, опис тривалих циклів експлуатації та інтеграція геотермальних систем у розподілені енергетичні комплекси.

У цілому результати роботи підтверджують, що технологія геотермальних теплонасосних систем з реін'єкцією підземних вод є екологічно безпечною та перспективною для України, а сформовані в дослідженні підходи мають важливе науково-методичне і практичне значення для її подальшого впровадження.

ПОСИЛАННЯ

- Lund J. W., Freeston D. H., Boyd T. L. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*. 2011. Vol. 40. No. 3. P. 159–180. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.07.004>
- Banks D. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. 2nd ed. Wiley-Blackwell, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118447512>
- Zurian, O. Technical, economic and environmental analysis of the implementation of a geothermal heat pump system. *Ecological Sciences*. 2023. No. 50. P. 37–47. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.6>
- Rybach L. Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*. 2003. Vol. 32. P. 463–470. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00057-9)
- Shortall R., Davidsdottir B., Axelsson G. Geothermal energy for sustainable development: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 44. P. 391–406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.020>
- Hackstein F. V., Madlener R. Sustainable operation of geothermal power plants. *Geothermal Energy*. 2021. Vol. 9. P. 10. <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00183-2>
- Blum P. et al. Is thermal use of groundwater a pollution? *Journal of Contaminant Hydrology*. 2021. Vol. 239. Article 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103791>
- Bonte M. Temperature-induced impacts on groundwater quality. *Water Research*. 2013. Vol. 47. P. 5088–5100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.049>
- Li J. et al. Geo-temperature response to reinjection. *Geothermal Energy*. 2023. Vol. 11. P. 35. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00277-z>
- Kassem M. A., Moscariello A. Geothermal-powered district heating and cooling networks: a systematic review. *International Journal of Sustainable Energy*. 2024. <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2417436>
- Rybach L., Mongillo M. Geothermal sustainability – research needs. *GRC Transactions*. 2006. Vol. 30. P. 1083–1090. https://www.researchgate.net/publication/283177278_Geothermal_sustainability-A_review_with_identified_research_needs
- Tomasini-Montenegro C. et al. Life cycle assessment of geothermal power generation technologies. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 1119–1136. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.112>
- Bonte, M., Stuyfzand, P. J., van den Berg, G. A., Hijnen, W. A. Environmental impacts of aquifer thermal energy storage investigated by field and laboratory experiments. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(3–4), 457–470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.00>
- Zurian, O. V., & Barilo, A. A. (2022). Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2022. 31(3). 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>
- Blum, P., Campoyo-Moreno, M. I., Zhu, K., Bauer, S. Temperatures in aquifers: Heat transport processes, development of geothermal technology and impacts of climate change. *WIREs Water*, 2021, 8(2), e1507. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1507>
- Special regulations «Waterkwantiteit». URL: <https://repository.officiële-overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2017-573/1/bijlage/exb-2017-573.pdf?utm>
- Water law. Wasserhaushaltsgesetz, WHG. URL: <https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/vdi-4640-blatt-1-thermal-use-of-the-underground-fundamentals-approvals-environmental-aspects?utm>
- Burkhard Sanner. Standards and Guidelines for UTE/GSHP wells and boreholes. 14th International Conference on Energy Storage. 25-28 April 2018, Adana, TURKEY. URL: <https://sanner-geo.de/media/82adf22b1ec3dfecffff8010ffffff1.pdf?utm>

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF USING GROUNDWATER AS A HEAT CARRIER IN LOW-TEMPERATURE GEOTHERMAL SYSTEMS WITH REINJECTION

Received Nov. 23, 2025; accepted Dec. 09, 2025
Available online Dec. 31, 2025

Zurian O.¹

Author for correspondence: Zurian Olekcii,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ Dr. of Sciences (Eng)
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

¹ Institute of Renewable Energy of NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

The post-war recovery of Ukraine envisions the development of a modern energy infrastructure based on the principles of sustainable development, energy efficiency, and climate neutrality. Particular emphasis is placed on the advancement of heat pump technologies, decentralized heating systems, and the use of local renewable low-grade energy resources. In this context, there arises the need for a comprehensive study of the environmental aspects of geothermal heat pump systems operating on groundwater, the determination of the limits of their safe operation, and the justification of conditions for their optimal application within the future sustainable energy supply system of Ukraine.

This work presents a comprehensive analytical review of the environmental aspects of using open-loop geothermal heat pump systems operating on the “extraction–injection” principle, in which the heat carrier is extracted from and reinjected into aquifers. The study is based on a synthesis of current global scientific publications involving field observations, laboratory research, and mathematical modeling, complemented by environmental-regulatory analysis of thermal impacts on groundwater and an examination of the regulatory frameworks of Ukraine and European Union countries. Special attention is devoted to issues of thermal and chemical impacts on aquifers during long-term operation, as well as to assessing their environmental safety within the context of Ukrainian hydrogeological conditions. The current regulatory framework of Ukraine concerning groundwater protection, water use, recreational and technical water supply is analyzed, and gaps related to the absence of specific regulations for geothermal systems with reinjection of the heat carrier are identified.

The work proposes a set of environmental precaution criteria, including limits on groundwater return temperature, requirements to prevent chemical alterations, monitoring of water levels and well discharge, and the necessity of hydrogeological monitoring. Adaptation of the best European practices (Netherlands, Germany, Switzerland) to Ukrainian conditions is suggested. The analytical review demonstrates that the implementation of closed-loop geothermal systems with heat-carrier reinjection can be an environmentally safe and efficient solution for the development of sustainable energy in Ukraine, provided that the defined criteria are met and appropriate regulatory support is ensured.

Keywords: geothermal heat pump systems, aquifer thermal energy storage, groundwater, environmental assessment, reinjection, thermal plume, low-grade energy, sustainable development.

Problem Statement

In the modern context of global energy transformation, the issues of phasing out fossil fuels and transitioning to renewable energy sources are becoming strategically significant. European experience demonstrates that low-grade heat technologies play a key role in decarbonizing the building sector, which is one of the largest consumers of thermal energy. In this regard, geothermal heat pump systems based on groundwater represent an important resource, enabling the extraction of thermal energy independent of weather conditions, ensuring a stable heat supply, and reducing the load on the energy system. Groundwater-based geothermal systems are considered one of the technologies capable of providing stable, low-cost, and low-carbon heating for residential, commercial, and industrial facilities.

Alongside their obvious advantages, a range of environmental, hydrogeological, and regulatory challenges arises, as groundwater is a valuable natural resource and plays a critical role in ensuring the country's water security. This is particularly relevant for systems that circulate water through a pair of wells—production and injection—which require scientifically grounded analysis of their impacts on the temperature regime and chemical state of aquifers, as well as their compliance with modern Ukrainian and European legislation on groundwater protection.

Analysis of Recent Studies and Publications

The issue of geothermal energy utilization, particularly low-grade heat from soil and groundwater, occupies a prominent place in contemporary international research. A

comprehensive overview of the status and trends in the direct use of geothermal energy is presented in study [1], which shows that heat pump technologies based on soil and groundwater are among the most rapidly growing segments of the sector. In works [2, 3], the authors examine in detail the thermogeological foundations of ground and groundwater heat pumps, emphasizing the importance of hydrogeological conditions, rock properties, and groundwater characteristics for the efficiency and long-term sustainability of such systems.

In the context of sustainable development and environmental safety, considerable attention is devoted to assessing the environmental impacts of geothermal systems. Author [4] was among the first to systematically articulate an approach to understanding geothermal energy as a resource that may remain sustainable, provided that a balance is maintained between extraction and natural or artificial replenishment. Further development of this topic is reflected in review [5], which presents various approaches to assessing the sustainability of geothermal systems, including environmental, economic, and social criteria. The economic aspects of sustainable operation of geothermal plants are examined in [6], where it is shown that optimization of operating modes and cost structures plays a decisive role in reconciling ecological and financial requirements.

A separate line of research concerns the thermal use of groundwater and the assessment of its impact on water quality. The authors of study [7] raise the question of whether the thermal use of groundwater may be considered “pollution” in a regulatory and environmental sense, concluding that, under certain temperature and spatial limitations, such impacts are acceptable and manageable. Furthermore, study [8], based on laboratory and field experiments, demonstrates that temperature changes in anoxic aquifers may affect the mobility of certain trace elements (particularly arsenic and iron), though the magnitude and significance of these effects depend on the specific hydrogeochemical conditions of the formation.

A substantial body of research is devoted to analyzing and modeling reinjection processes in geothermal reservoirs. For example, study [9] examines the thermal response of sandstone reservoirs to long-term injection of cooled water; numerical modeling shows how well spacing, flow rates, and thermal load influence the development of a thermal front and the potential for thermal breakthrough. A comprehensive overview of the development of geothermal district heating systems, including those using groundwater and reinjection, is presented in [10], which emphasizes that circulation schemes with reinjection into the aquifer have become the standard in European practice due to their combination of high energy efficiency and controlled environmental impact.

Issues of the long-term sustainability of geothermal systems, including their impact on heat and groundwater resources, are further analyzed in publication [11], which identifies key research tasks related to assessing the renewability of geothermal resources. Study [12] considers

geothermal technologies from the perspective of life-cycle assessment, comparing their overall environmental footprint (including greenhouse gas emissions and other impacts) with alternative energy sources, concluding that geothermal systems remain competitive under low-carbon development scenarios.

Analysis of Recent Studies and Publications

The issue of utilizing geothermal energy, particularly low-grade heat from soil and groundwater, occupies a prominent place in contemporary international research. A comprehensive overview of the current state and trends in the direct use of geothermal energy is presented in study [1], which shows that heat pump technologies based on soil and groundwater are among the fastest-growing segments of the sector. In works [2, 3], the authors examine in detail the thermogeological foundations of ground and groundwater heat pumps, emphasizing the importance of hydrogeological conditions, rock properties, and groundwater characteristics for the efficiency and long-term sustainability of such systems.

In the context of sustainable development and environmental safety, considerable attention is devoted to assessing the environmental impacts of geothermal systems. Author [4] was among the first to systematically articulate an approach to understanding geothermal energy as a resource that may remain sustainable provided that a balance is maintained between extraction and natural or artificial replenishment. Further development of this topic is reflected in review [5], which presents various approaches to assessing the sustainability of geothermal systems, including environmental, economic, and social criteria. The economic aspects of sustainable operation of geothermal plants are examined in [6], where it is shown that the optimization of operating regimes and cost structures plays a decisive role in harmonizing ecological and financial requirements.

A separate research direction concerns the thermal use of groundwater and the assessment of its impact on water quality. The authors of study [7] pose the question of whether the thermal use of groundwater can be considered “pollution” in normative and environmental terms, concluding that under certain temperature and spatial limitations, such impacts are acceptable and manageable. Furthermore, in work [8], based on laboratory and field experiments, the author shows that temperature changes in anoxic aquifers may affect the mobility of certain trace elements (particularly arsenic and iron), though the scale and significance of these changes depend on specific hydrogeochemical conditions of the formation.

A substantial body of work is dedicated to analyzing and modeling reinjection processes in geothermal reservoirs. For example, study [9] examines the thermal response of sandstone reservoirs to long-term injection of cooled water; numerical modeling demonstrates the influence of well spacing, flow rates, and thermal load on the formation of a thermal front and the potential for thermal breakthrough.

A comprehensive overview of the development of geothermal district heating systems, including those using groundwater and reinjection, is provided in [10], which emphasizes that circulation schemes with water returned to the aquifer have become the European standard due to their combination of high energy efficiency and controlled environmental impact.

Issues of long-term “sustainability” of geothermal systems, including their impact on heat and groundwater resources, are further analyzed in publication [11], which identifies key research tasks associated with assessing the renewability of geothermal resources. Study [12] examines geothermal technologies from the perspective of life-cycle analysis, comparing their overall environmental footprint (including greenhouse gas emissions and other impacts) with alternative energy sources, concluding that geothermal systems remain competitive under low-carbon development scenarios.

Presentation of the Main Research Material

The assessment of the impact of geothermal systems on groundwater in global scientific practice is based on a combination of three principal methodological groups: field observations, laboratory studies, and mathematical modeling, complemented by environmental and regulatory analysis.

International literature on shallow geothermal energy and the operation of open-loop “extraction–injection” systems presents a wide, yet generally consistent, range of temperature and chemical changes in aquifers that occur during the operation of geothermal heat pump systems. These data make it possible to define realistic ranges of impacts which, considering the hydrogeological characteristics of Ukraine, may serve as benchmarks for preliminary environmental assessment.

Most studies conducted in Europe, North America, and Asia indicate that typical temperature increases or decreases in groundwater during system operation range from ± 1 to ± 5 °C within the zone of direct well influence. Studies [2, 4] show that at flow rates of 20–50 m³/h, the thermal front in shallow aquifers forms a local zone of altered temperature with a radius of 20–80 m, depending on the properties of the formation. These values are also confirmed by numerical models, including those in [8], which demonstrate that under stable extraction and injection conditions, the amplitude of temperature changes does not exceed several degrees even in the long term.

Another characteristic observation is that temperature changes are highly localized and dissipate in the direction of natural groundwater flow, as confirmed by studies [12], [13], and others. This indicates that the scale of impact is primarily determined by the hydrodynamic conditions of the specific aquifer—its hydraulic conductivity, natural flow gradient, and transmissivity [14].

Regarding the chemical composition of groundwater, the literature review shows that when temperature changes remain within ± 2 –4 °C, chemical parameters typically fall

within the range of natural variability, except in cases where temperature increases exceed 10 °C or where the system operates in highly mineralized waters or aquifers with specific mineralogy. Studies [15] indicate that the most sensitive components are those associated with redox processes: iron, manganese, and arsenic. However, their mobilization is observed only under conditions of significant temperature alteration (over 10 °C) or disruption of hydrochemical equilibrium due to interference with groundwater flow, whereas in systems with reinjection into the aquifer, chemical stability is generally preserved.

Comparison of these findings with the hydrogeological conditions of Ukraine shows that most productive aquifers within the upper 100–150 m, which constitute the primary reserves of fresh groundwater, have hydraulic conductivity values ranging from 1 to 10–20 m/day—similar to aquifers in Central and Northern Europe. This implies that the scale of thermal impact under Ukrainian conditions will be comparable to that in Europe, with typical amplitudes of ± 1 –4 °C and a radius of influence of several tens of meters at moderate flow rates.

Ukraine’s climatic conditions also support the stability of such systems, as the amplitude of natural seasonal soil temperature fluctuations in the upper layers reaches 15–20 °C, but below 15–20 m it decreases to 1–2 °C. This means that aquifers at depths of 30–80 m are naturally thermally stable, and thus a temperature change of several degrees within the local zone of influence does not exceed the natural fluctuations typical for the shallow subsurface.

It should also be noted that in Ukraine, drinking-water aquifers are typically represented by alluvial, loess–alluvial, and sandy–clayey sequences of Quaternary and partly Neogene age. These deposits commonly contain mineral phases such as calcite, dolomite, clay minerals, and siderite, whose solubility changes under minor temperature gradients (1–4 °C) do not lead to significant shifts in pH, Eh, or mineralization. This is consistent with the concepts of thermal sensitivity proposed in [2] and [12].

Thus, the literature data provide grounds to assert that within the temperature amplitudes characteristic of typical low-temperature geothermal systems, the chemical composition of fresh groundwater in Ukraine remains stable, whereas temperature variations are localized and predictable. This information forms the basis for defining environmental precaution criteria and for further adapting international experience to Ukrainian conditions.

The regulation of groundwater use in geothermal heat pump systems in Ukraine is based on the requirements of the Water Code of Ukraine, the Code of Ukraine on Subsoil, the Law of Ukraine “On Environmental Protection,” as well as subordinate regulatory acts concerning groundwater protection, special water use, and geological exploration of subsoil. In the context of operating “extraction–injection” systems, the key issues include preserving the quality of potable groundwater, preventing contamination, and

complying with environmental restrictions during water reinjection into the subsurface.

Regulatory analysis has shown that current Ukrainian legislation does not yet contain specialized requirements for “extraction–injection” geothermal systems. However, the general provisions of the Water Code, the Code on Subsoil, and subordinate acts on groundwater protection allow the use of such technologies provided that water quality is not degraded, environmental safety requirements are met, and regular monitoring of groundwater parameters is conducted. This creates an adequate foundation for adapting the best European approaches to Ukrainian conditions.

Regulation of geocirculation systems in the European Union and Switzerland is based on a combination of water protection legislation and specialized technical norms that define environmental criteria for the use of groundwater in low-temperature geothermal energy. The most established and technologically advanced regulatory models have been developed in the Netherlands, Germany, and Switzerland. An analysis of their approaches makes it possible to identify regulatory elements that can be adapted and implemented within the legal framework of Ukraine.

The Netherlands is considered the European leader in the development of ATEs (Aquifer Thermal Energy Storage) systems, where the primary emphasis is placed on integrated groundwater management. At the legislative level, this sphere is regulated by the Water Act (Waterwet), which defines general requirements for groundwater protection and the obligation to obtain a water permit for extraction and reinjection. Specialized regulations—*Besluit bodemenergiesystemen* and *Waterregeling*—set technical and environmental criteria for system operation, including allowable temperature changes and monitoring requirements. For example, Articles 6.27 and 6.29 of the *Waterregeling* [16] specify that an application for system installation must include “a scheme of water reinjection, its composition, temperature, and measures to prevent adverse impacts.” A key feature of the Dutch model is the creation of so-called interference zones, where system placement is coordinated to avoid mutual negative impacts and to maintain the thermal balance of the subsurface environment. This approach helps prevent excessive accumulation of thermal plumes and is highly effective in densely built urban areas.

Germany’s approach is based on a combination of general water law (*Wasserhaushaltsgesetz*, WHG) and mandatory compliance with technical standards issued by the Association of German Engineers (VDI 4640) and the German Technical and Scientific Association for Gas and Water (DVGW). WHG establishes a fundamental requirement that groundwater’s chemical and quantitative status must not deteriorate, whereas technical standards regulate well construction, permissible thermal loads, minimum distances to drinking-water protection zones, and monitoring procedures [17]. Compared to the Netherlands, the German system is less centralized and more dependent on decisions of regional (Land) authorities, yet it has clear technical requirements that ensure environmental safety through standardized design practices.

Switzerland employs one of the strictest groundwater protection frameworks in Europe. Federal laws (GSchG, GSchV) impose stringent temperature limits for water bodies, while technical standards of the Swiss Society of Engineers and Architects (SIA 384/6, SIA 384/7) establish detailed requirements for geocirculation systems—from permissible temperature changes in aquifers to restrictions on well placement within drinking-water protection zones [18]. The significant role of cantonal “thermal use concepts” allows the regulation to be adapted to local hydrogeological conditions. The Swiss model is particularly valuable due to its clear zoning system (S1–S3), where operational rules for geothermal systems are defined in accordance with groundwater vulnerability levels.

A comparison of the three models makes it possible to identify several principles that are relevant to Ukrainian conditions.

First, a key element of environmental precaution is the establishment of permissible temperature ranges and maximum ΔT for both extraction and reinjection. In all analyzed countries, reinjected water must not alter the aquifer temperature by more than a few degrees, and its absolute temperature must remain within limits that prevent biological or chemical degradation of groundwater.

Second, it is mandatory that the quality of reinjected water must not be worse than the natural groundwater quality, preventing the introduction of substances that could cause contamination or mobilize undesirable components (As, Fe, Mn, etc.).

Third, in the Netherlands, Germany, and Switzerland, such systems cannot operate without regular monitoring of groundwater temperature, levels, and chemical composition, ensuring timely detection of potential risks.

Fourth, spatial restrictions are applied in all three countries: systems are prohibited or strongly limited within drinking-water protection zones, and in the Netherlands, additional zoning is implemented depending on system density.

Thus, for Ukraine, the most promising model is one that combines the German approach to standardizing design and technical solutions, the Swiss system of zoning territories according to hydrogeological vulnerability, and the Dutch principles of managing interference and thermal balance. This would make it possible to develop a comprehensive regulatory framework in which requirements for temperature, chemical composition, and monitoring are clearly defined at the level of national standards, while permitting procedures remain transparent, predictable, and oriented toward groundwater protection.

Preliminary Recommendations and Environmental Precaution Criteria for “Extraction–Injection” Systems in Ukraine

Considering the analysis of global practices, the hydrogeological features of Ukraine, and current legal requirements, it is advisable to formulate a set of basic recommendations aimed at minimizing environmental risks when implementing geothermal systems with two wells—production and injection. These recommendations do not replace formal regulatory requirements but may serve as a foundation for

national methodological guidelines and as a reference for designers, environmental specialists, and permitting authorities.

1. Hydrogeological Criteria for Environmental Precaution

1.1. Selection of the aquifer. Preference should be given to aquifers with high permeability and stable yield, where the effect of temperature fluctuations dissipates rapidly. The use of aquifers that serve as primary sources of centralized drinking water supply, or that pose a risk of mixing with potable groundwater, is not permissible.

1.2. Restrictions on the distance between wells. The distance must ensure that there is no short-circuiting of hydraulic flow. Based on European practice, a recommended minimum separation is 40–80 m; however, it must be refined through modeling.

1.3. Consideration of aquifer hydrodynamics. It is mandatory to determine groundwater flow velocity, gradients, and natural flow direction. Situations in which thermal changes could propagate toward existing water intakes must be avoided.

2. Temperature Criteria for Environmental Precaution

2.1. Limits of permissible thermal impact. Given the absence of national standards and based on international practice, the following ranges may be used as recommended benchmarks: ± 2 – 3 °C — considered environmentally neutral; up to ± 5 °C — acceptable provided no changes in chemical composition are detected; beyond ± 5 °C — requires detailed justification and modeling.

2.2. Control of seasonal variations. It is important to prevent long-term accumulation of thermal effects over the years of operation. The system must maintain a balance between seasonal heat extraction and reinjection.

3. Chemical and Microbiological Criteria

3.1. Chemical stability. Water reinjected into the aquifer must correspond to the initial parameters in terms of major ions, mineralization, and pH. At least quarterly monitoring is recommended during the first two years of operation.

3.2. Control of microbiological risks. Temperature increases may activate bacterial processes; therefore, total bacterial count must be monitored regularly, stagnant zones in the system should be avoided, and piping materials with low biocorrosion potential should be used.

4. Technical Criteria for Well Design and Equipment

4.1. Structural requirements. Wells must have sealed casings to prevent inter-aquifer flow. High-temperature, long-term temperature-fluctuation-resistant polymer materials are recommended.

4.2. Protection against contamination. The injection well must be equipped with devices preventing the intrusion of surface water. No facilities posing a risk to groundwater quality (fuel storage, septic tanks, vehicle depots, etc.) may be located within the zone of influence.

5. Monitoring and Operational Control

5.1. Monitoring program. It is recommended to include the following parameters: temperature (continuous sensor or

monthly measurements), water levels, electrical conductivity, mineralization, pH, major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), and microbiological indicators.

5.2. Establishment of long-term observation wells. Ideally, two monitoring wells should be constructed: one located between the production and injection wells, and another positioned downstream relative to natural groundwater flow.

6. Recommendations for Regulatory Development in Ukraine:

- Based on comparison with EU regulatory frameworks, the following proposals are advisable:
- Develop clear temperature impact limits (analogous to DVGW W 120-2).
- Introduce the concept of “geothermal impact on groundwater.”
- Develop a dedicated standard for “extraction–injection” geothermal systems.
- Define mandatory monitoring parameters and monitoring frequency.
- Integrate these systems into national decarbonization and energy efficiency strategies.

Thus, the use of geothermal heat pump systems with reinjection into the aquifer can be environmentally safe if a comprehensive set of preventive measures is followed. The proposed environmental precaution criteria reflect best international practices and may serve as a foundation for shaping Ukrainian regulations in the context of European integration. Their implementation will help minimize risks to groundwater, ensure the stability of the hydrogeological environment, and enhance the effectiveness of deploying geothermal technologies in Ukraine.

Conclusions

The analysis of scientific research, regulatory frameworks, and environmental aspects of using “extraction–injection” geothermal heat pump systems allows the following key conclusions to be formulated:

Geothermal systems with reinjection into the aquifer represent a promising low-carbon heating technology that aligns with Ukraine’s strategic goals of decarbonization, energy efficiency improvement, and diversification of heat sources. Their widespread adoption has the potential to reduce dependence on fossil fuels and lower greenhouse gas emissions in the heating sector.

The thermal impact of geothermal systems is localized, and its extent is determined by the hydrogeological characteristics of the aquifer, system flow rate, and operational regime. Global studies indicate that thermal disturbances within ± 2 – 5 °C do not lead to significant changes in groundwater chemistry, confirming the environmental safety of such systems when properly designed.

Chemical alterations in aquifers during the operation of extraction–injection systems are generally minimal, since the reinjected water typically retains its natural ionic and saline composition. Potential microbiological risks can be minimized through the appropriate selection of piping materials, prevention of stagnant zones, and proper system operation.

Ukrainian legislation currently lacks specialized norms regulating permissible temperature changes or requirements for groundwater reinjection in the context of geothermal technologies. However, the general provisions of the Water Code of Ukraine and the Code of Ukraine on Subsoil provide a legal foundation that allows the implementation of such systems, provided groundwater quality is not degraded and natural hydrogeological conditions are not disrupted.

Adapting European regulatory practices—particularly the requirements used in Germany, the Netherlands, Austria, and Denmark—to Ukrainian conditions can serve as a basis for establishing national standards. Recommended measures include introducing temperature impact thresholds, defining unified rules for well design, and establishing clear procedures for groundwater quality monitoring.

A comprehensive set of environmental precaution criteria has been formulated, including hydrogeological, thermal, chemical, microbiological, and technical requirements. Compliance with these criteria is essential for ensuring the environmental safety of extraction–injection systems and can serve as methodological guidance for the development of regulatory documents.

The proposed analytical approach provides a foundation for further development of regulatory documents in the field of subsurface geothermal energy and outlines directions for future research, including improved heat-transfer modeling, analysis of microbiological processes, long-term operational cycle assessment, and integration of geothermal systems into distributed energy networks.

Overall, the results confirm that geothermal heat pump systems with groundwater reinjection are environmentally safe and promising for Ukraine. The approaches developed in this study have significant scientific, methodological, and practical value for their further implementation.

REFERENCES

- Lund, J. W., Freeston, D. H., & Boyd, T. L. (2011). Direct utilization of geothermal energy: 2010 worldwide review. *Geothermics*, 40(3), 159–180. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.07.004>
- Banks, D. (2012). *An introduction to thermogeology: Ground source heating and cooling* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118447512>
- Zurian, O. (2023). Technical, economic and environmental analysis of the implementation of a geothermal heat pump system. *Ecological Sciences*, 50, 37–47. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.6>
- Rybach, L. (2003). Geothermal energy: Sustainability and the environment. *Geothermics*, 32, 463–470. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00057-9)
- Shortall, R., Davidsdottir, B., & Axelsson, G. (2015). Geothermal energy for sustainable development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 391–406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.020>
- Hackstein, F. V., & Madlener, R. (2021). Sustainable operation of geothermal power plants. *Geothermal Energy*, 9, 10. <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00183-2>
- Blum, P., et al. (2021). Is thermal use of groundwater a pollution? *Journal of Contaminant Hydrology*, 239, Article 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103791>
- Bonte, M. (2013). Temperature-induced impacts on groundwater quality. *Water Research*, 47, 5088–5100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.049>
- Li, J., et al. (2023). Geo-temperature response to reinjection. *Geothermal Energy*, 11, 35. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00277-z>
- Kassem, M. A., & Moscariello, A. (2024). Geothermal-powered district heating and cooling networks: A systematic review. *International Journal of Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2417436>
- Rybach, L., & Mongillo, M. (2006). Geothermal sustainability – Research needs. *GRC Transactions*, 30, 1083–1090. https://www.researchgate.net/publication/283177278_Geothermal_sustainability-A_review_with_identified_research_needs
- Tomasini-Montenegro, C., et al. (2017). Life cycle assessment of geothermal power generation technologies. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1119–1136. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.112>
- Bonte, M., Stuyfzand, P. J., van den Berg, G. A., & Hijnen, W. A. (2011). Environmental impacts of aquifer thermal energy storage investigated by field and laboratory experiments. *Journal of Hydrology*, 409(3–4), 457–470. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.00>
- Zurian, O. V., & Barilo, A. A. (2022). Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 31(3), 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>
- Blum, P., Campoyo-Moreno, M. I., Zhu, K., & Bauer, S. (2021). Temperatures in aquifers: Heat transport processes, development of geothermal technology and impacts of climate change. *WIREs Water*, 8(2), e1507. <https://doi.org/10.1002/wat2.1507>
- Special regulations “Waterkwantiteit.” (2017). <https://repository.officiële-overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2017-573/1/bijlage/exb-2017-573.pdf>
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG). (n.d.). German Water Law. <https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/vdi-4640-blatt-1-thermal-use-of-the-underground-fundamentals-approvals-environmental-aspects>
- Sanner, B. (2018). Standards and guidelines for UTEs/GSHP wells and boreholes. 14th International Conference on Energy Storage, Adana, Turkey. <https://sanner-geo.de/media/82adf22b1ec3dfecffff8010ffffff1.pdf>