

С. В. Гошовський, д-р техн. наук, професор, директор УкрДГПІ,
О. В. Зур'ян, завідувач лабораторії інноваційних технологій (УкрДГПІ)

ГРУНТОВІ ТЕПЛООБМІННИКИ ДЛЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ – ОПТИМАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА КОНСТРУКЦІЇ

Проведені експериментальні дослідження фізичних процесів у системі “геотермальний теплообмінник-грунтовий масив” та встановлені залежності ефективності роботи геотермальної системи теплопостачання від конструкції ґрунтового теплообмінника (ГТ) та його теплотехнічних характеристик. Виконано аналіз та зроблені висновки щодо оптимальної конструкції геотермального теплообмінника та його характеристик.

Ключові слова: альтернативна енергетика, відновлювані джерела енергії, геотермальна система, геотермальний теплообмінник, геотермальний зонд, ґрунтовий колектор.

Вступ

Суспільство у своєму розвитку досягло межі, коли нераціональне використання природних ресурсів і прогресуючий негативний вплив на навколишнє середовище призводять до багатьох криз як регіональних, так і всепланетарних, які у свою чергу викликають політичні кризи та військові конфлікти. Сьогодні людство стало серйозно замислюватися над тим, як не допустити нераціонального використання земних багатств. Усе більше вчених, інженерів як за пропозицією урядів, так і за власною ініціативою займаються пошуками нових, нетрадиційних джерел, які могли б забезпечити людство енергією та сприяти збереженню довкілля. Гостро на сьогодні стоїть питання наукового супроводження нових технологій отримання альтернативної енергії та дослідження використання альтернативних джерел у різних умовах експлуатації, адаптації до реальних умов експлуатації. До того ж, відсутні детальне районування застосування тих чи інших альтернативних джерел енергії та техніко-економічні оцінки використання як вітчизняного, так і зарубіжного обладнання.

Жодна державна наукова установа, що має інженерно-технічний потенціал, наукову базу, не може залишатися осторонь зазначених вище проблем, що є на сьогодні найбільш злободенними в Україні.

В Українському державному геолого-розвідувальному інституті було спроектовано та сконструйовано діючу експериментальну геотермальну установку для отримання теплової енергії. Як показала практика її використання та спілкування з представниками академічної й прикладної науки, подібної за своїми можливостями експериментальної установки в Україні більше ніде немає. Установка дає можливість не тільки моделювати різні теплотехнічні умови, але й вивчати в часі процеси, що супроводжують отримання відновлюваної енергії, ефективність окремих пристроїв та вплив їх характеристик на кінцеві результати й досконалість геодинамічних теплових пристроїв (ГДТП), або, як їх спрощено називають у популярній літературі, теплових насосів (ТН). Методика, яку розробили фахівці інституту, дала змогу виконати аналіз та зробити висновки щодо оптимальної конструкції геотермального теплообмінника

системи та його характеристик – одного з основних пристроїв, що входить до конструкції ГДТП.

Постановка завдання. Геотермальна систем (ГС) використовує постійно присутню у верхніх шарах Землі енергію та перетворює її в корисну теплоту для опалення. Грунт – універсальне джерело розсіяного тепла. Він акумулює сонячну енергію протягом тривалого періоду і є рівномірним джерелом первинної енергії для роботи геотермальної системи, що забезпечує високий коефіцієнт трансформації ГС.

Геотермальні теплообмінники для вилучення теплоти з ґрунту, як показують наші дослідження, мають проектуватися для кожного об'єкта окремо. Отже, під час проектування ГС тепlopостачання виникає необхідність у виборі таких оптимальних характеристик ГТ, як загальна довжина ГТ, конфігурація, діаметр, швидкість руху соляного розчину в контурі залежно від умов роботи ГТ тепlopостачання. Ці характеристики мають забезпечити оптимальний ступінь охолодження соляного розчину у випарнику ГС, що дасть змогу отримати мінімальні питомі витрати електроенергії на тепlopостачання загалом.

Метою роботи є визначення оптимальних характеристик ГТ.

Аналітичний аналіз системи. На рис. 1 наведено принципову схему експериментальної геотермальної системи УкрДГРІ низькотемпературного водяного опалення з використанням вертикальних ГТ.

Конструкція розробленої геотермальної системи складається з двох частин: підземної й наземної.

Підземна частина являє собою вісім U-подібних вертикальних зондів ґрунтового колектора, встановлених попарно в чотири свердловини завглибшки по 50 м. кожна. Усі разом вони входять до складу низькотемпературного контуру відбору тепла з ґрунтового масиву геотермальної системи. Трубами ґрунтового колектора рухається незамерзаючий теплоносіє, який нагрівається завдяки теплоті ґрунту,

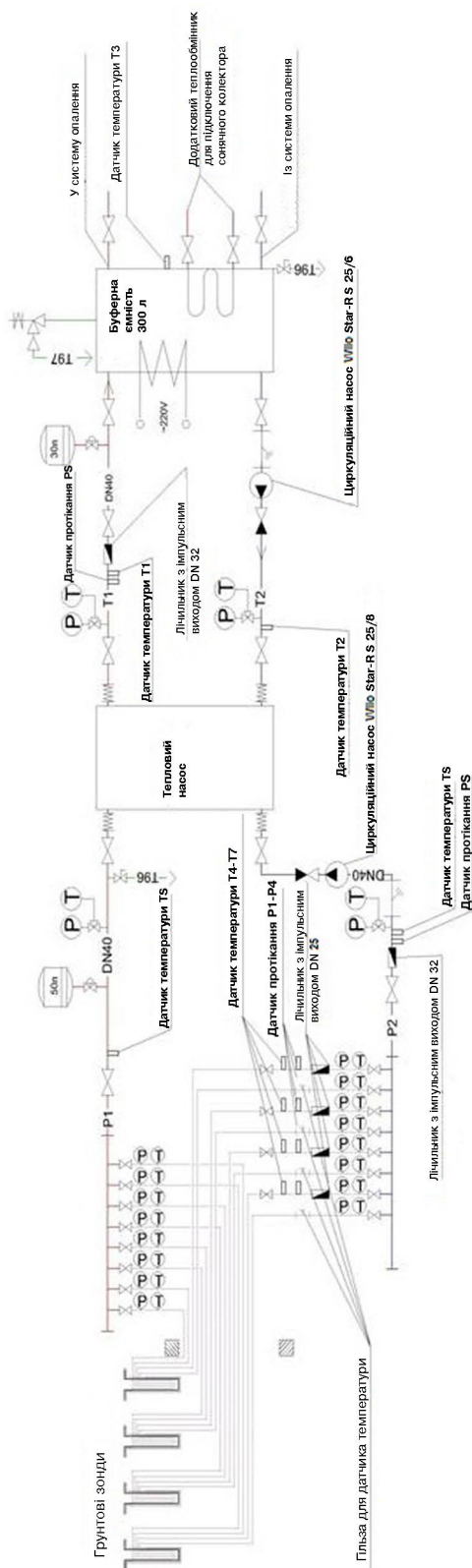


Рис. 1. Принципова схема експериментальної геотермальної системи, створеної в УкрДГРІ

а потім віддає теплоту водяній системі тепlopостачання будинку.

Наземна частина складається з високотемпературного контуру, до складу якого належить накопичувач тепла та елементи системи опалення будівлі, та проміжного контуру, який складається з двох теплообмінників (випарника й конденсатора) низькотемпературного та високотемпературного контурів, а також компресорної групи із системою автоматики (рис. 2).

Особливістю системи є те, що її конструкція дає можливість під час проведення експерименту підключати як ГТ змонтовані у свердловинах геотермальні зонди в різній конфігурації, залежно від завдання досліджень. А спеціальне програмне забезпечення дає можливість візуалізувати показники вимірювальних приладів у реальному часі (рис. 3) та створити архів отриманих даних для подальшої їх інтерпретації.

Для встановлення залежності ефективності роботи геотермальної системи тепlopостачання від конструкції ГТ та його теплотехнічних характеристик під час проведення досліджень використовувався експериментальний метод дослідження, у процесі якого проводилося вимірювання температур у контрольних точках системи та витрат теплоносія протягом циклу роботи. Експеримент проводився декілька разів за однакових вихідних даних на початку проведення дослідження та з періодичною заміною лише конструкції геотермального теплообмінника.

Заміна конструкції геотермального теплообмінника полягла в тому, що завдяки конструктивним можливостям експериментальної геотермальної установки УкрДГРІ під час проведення дослідження змінювалася як кількість задіяних у відборі тепла Землі свердловин з геотермальними теплообмінниками, так і кількість



Рис. 2. Наземна частина геотермальної системи, створеної в УкрДГРІ

геотермальних теплообмінників, змонтованих у свердловинах.

Експеримент проводився п'ять разів у таких конфігураціях геотермального теплообмінника: 1) 4×2 – чотири свердловини по два U-подібних геотермальних теплообмінники в кожній; 2) 4×1 – чотири свердловини по одному U-подібному геотермальному теплообміннику в кожній; 3) 2×2 – дві свердловини по два U-подібних геотермальних теплообмінники в кожній; 4) 2×1 – дві свердловини по одному U-подібному геотермальному теплообміннику в кожній; 5) 1×1 – одна свердловина з одним U-подібним геотермальним теплообмінником. Датчики температури, встановлені на магістралях випарника й конденсатора, дали можливість під час проведення експерименту проводити вимірювання температури теплоносія холодного й гарячого контурів системи. А лічильники про-

тікання, встановлені на цих магістралях, дали можливість отримати дані для подальшого розрахунку потужності роботи геотермальної системи. Інформація з датчиків отримувалася в автоматичному режимі з інтервалом часу в 5 с. Дослідження проводилися на геотермальному полігоні УкрДГРІ.

У процесі проведення дослідження були отримані дані, що дали змогу провести аналіз ефективності роботи геотермальної системи тепlopостачання, та виведені залежності теплотехнічних характеристик ГТ від особливостей його конструкції.

На рис. 4 наведено графік зміни температур у контрольних точках геотермальної системи протягом одного періоду нагрівання теплоносія в системі тепlopозабезпечення від початкової температури 28 °С з урахуванням того, що початкова темпе-

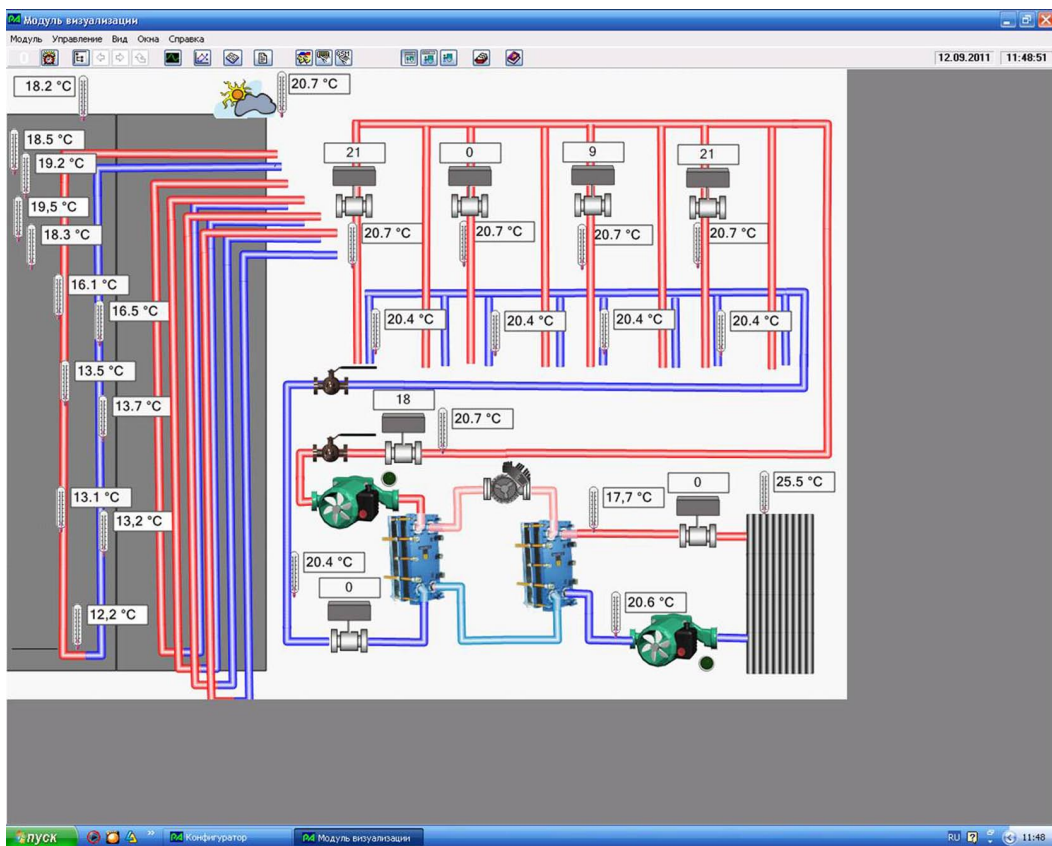


Рис. 3. Програмно-апаратний модуль візуалізації та архівації даних

ратура пропіленгліколю на вході у випарник системи становить 15 °С в умовах постійної циркуляції. При цьому, відповідно до регламенту проведення дослідження, до геотермальної системи підключено всі вісім геотермальних теплообмінників по два у кожній свердловині.

На графіку (рис. 4) за період з 14.12 по 15.00 спостерігається суттєве збільшення температури на виході з конденсатора (нагрівання теплоносія в системі опалення) та незначне зменшення температури на виході з випарника за цей само час (охолодження пропіленгліколю). Різкий перепад температур спостерігається тільки під час запуску системи, що триває декілька секунд, після чого система входить у стабільний режим роботи. Температура пропіленгліколю за час проведення експерименту на виході з ґрунтового теплообмінника (на вході у випарник) суттєво не зменшується та становить 2 °С. Температура на вході в ґрунтовий теплообмінник (на виході з випарника) за час проведення експерименту зменшується на 5 °С та не виходить за номінальну позначку 10 °С. Система працює стабільно, при цьому різниця температур теплоносія на першому контурі ΔT_1 на вході й виході в систему опалення (на виході та вході з конденсатора) на відмітці часу 14.40 становить 8,5 °С.

Водночас різниця температур пропіленгліколю на другому контурі ΔT_2 на виході й вході в геотермальний теплообмінник (на вході та виході з конденсатора) на відмітці часу 14.40 становить 2,8 °С. З урахуванням показників лічильників витрат рідини V_1 та V_2 , по першому й другому контурах, що становлять відповідно $V_1 = 1,419 \text{ м}^3$ та $V_2 = 3,004 \text{ м}^3$, можна вирахувати потужність роботи геотермальної системи по теплу й холоду за формулою

$$W = V \cdot C \cdot \Delta T / 3600, \quad [1]$$

де C – теплоємність теплоносія; V – об'єм теплоносія; ΔT – різниця температур на вході та виході із системи.

Отримані розрахункові дані свідчать, що система працює в штатному режимі. Потужність системи по теплу W_1 становить 13,46 кВт, потужність по холоду W_2 становить 9,34 кВт, що повністю відповідає запроєктованим параметрам.

На рис. 5, 6 наведено графіки зміни температур у контрольних точках геотермальної системи протягом одного періоду нагрівання теплоносія в системі теплотабезпечення, в умовах роботи, коли відповідно до регламенту проведення дослідження до геотермальної системи було підключено чотири геотермальні теплообмінники по одному в кожній свердловині

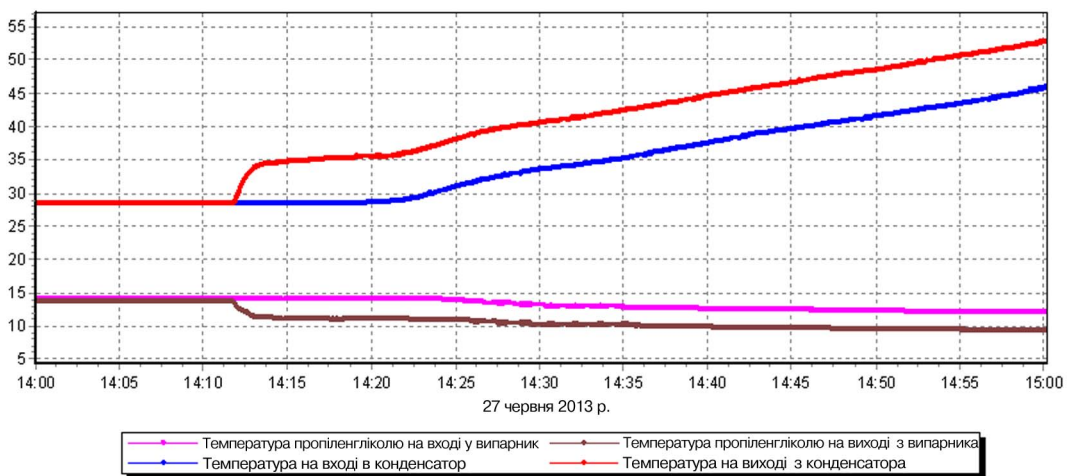


Рис. 4. Графік зміни температур у контрольних точках у разі підключення до геотермальної системи вісьмох геотермальних теплообмінників по два в кожній свердловині (режим 4x2)

ні (режим 4×1) (рис. 5) та чотири геотермальні теплообмінники по два в кожній свердловині (режим 2×2) (рис. 6).

Як і на графіку рис. 4, початкова температура теплоносія в системі теплозабезпечення під час проведення експерименту була 28 °С, а пропіленгліколю – 15 °С в умовах постійної циркуляції.

За час проведення експерименту з 15.12 по 16.00 в режимах 4×1 та 2×2 (рис. 5, 6) динаміка змін температури як високо-

температурного, так и низькотемпературного контурів збігалася з процесами, що відбувалися під час проведення експерименту в режимі 4×2, але експеримент показав і відмінності. Так температура пропіленгліколю (контур № 2) знизалася за час проведення експерименту більше й становила: в режимі 4×1 – 10,4 °С на вході у випарник, 7,6 °С – на виході з випарника; у режимі 2×2 – 10,0 °С на вході у випарник, 7,1 °С – на виході з випарника. Температура

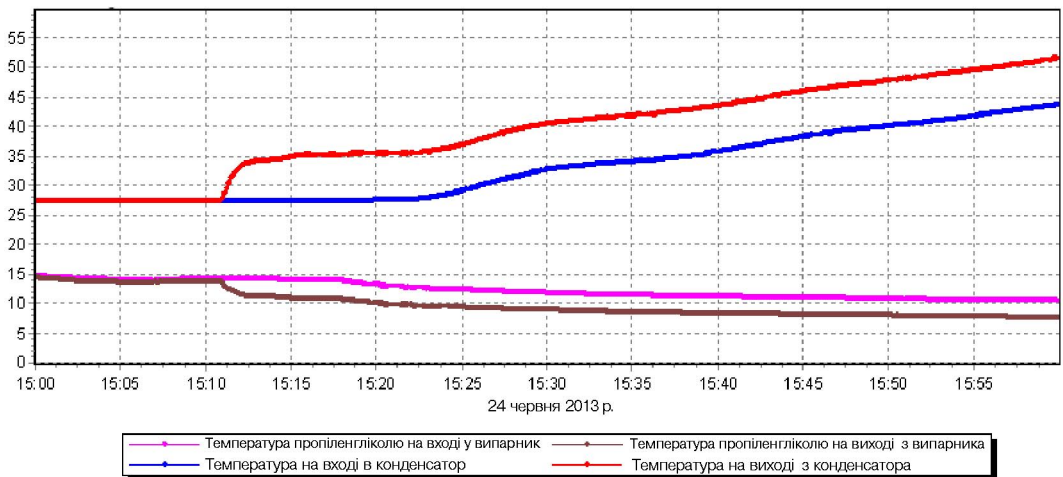


Рис. 5. Графік зміни температур у контрольних точках у разі підключення до геотермальної системи чотирьох геотермальних теплообмінників по одному в кожній свердловині (режим 4×1)

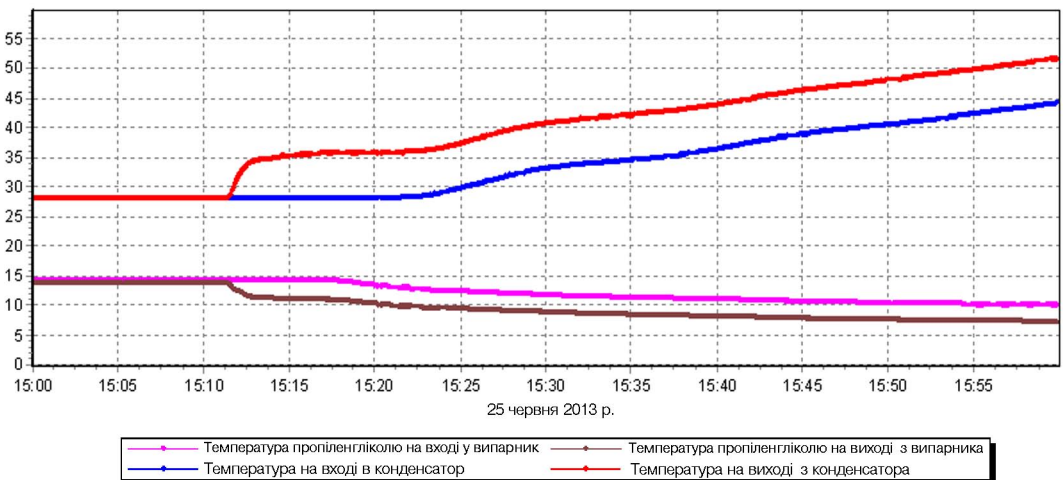


Рис. 6. Графік зміни температур у контрольних точках у разі підключення до геотермальної системи чотирьох геотермальних теплообмінників по два в кожній свердловині (режим 2×2)

теплоносія в системі теплозабезпечення (контур № 1) не досягла показників, що були під час проведення експерименту в режимі 4×4, і становила: в режимі 4×1 – 44,1 °С на вході в конденсатор, 51,9 °С – на виході з конденсатора; у режимі 2×2 – 44,7 °С на вході у випарник, 52,3 °С – на виході з випарника.

Система працює стабільно, при цьому різниця температур теплоносія на першому контурі ΔT_1 на вході й виході в систему опалення (на виході та вході з конденсатора) на відмітці часу 14.40 становить 7,8 °С у режимі 4×1 та 7,7 °С у режимі 2×2. Водночас різниця температур пропиленгліколю на другому контурі ΔT_2 на виході й вході в геотермальний теплообмінник (на вході й виході з конденсатора) на відмітці часу 14.40 становить 2,8 °С у режимі 4×1 та 2,9 °С у режимі 2×2. З урахуванням показників лічильників витрат рідини V_1 та V_2 по першому й другому контурах, що становлять відповідно $V_1=1,419 \text{ м}^3$ у режимі 4×1, $V_1=1,419 \text{ м}^3$ у режимі 2×2 та $V_2=2,848 \text{ м}^3$ у режимі 4×1, $V_2=2,874 \text{ м}^3$ у режимі 2×2, можна вирахувати потужність роботи геотермальної системи по теплу й холоду за формулою [1].

Отримані розрахункові дані свідчать, що система працює в межах допустимих технічних характеристик. Потужність сис-

теми по теплу W_1 (режим 4×1) становить 12,3 кВт, потужність по холоду W_2 (режим 4×1) становить 8,86 кВт, що відповідає запроектованим параметрам. Потужність системи по теплу W_1 (режим 2×2) становить 12,08 кВт, потужність по холоду W_2 (режим 2×2) становить 9,26 кВт, що загалом відповідає запроектованим параметрам.

На рис. 7, 8 наведено графіки зміни температур у контрольних точках геотермальної системи протягом одного періоду нагріву теплоносія в системі теплозабезпечення, в умовах роботи, коли відповідно до регламенту проведення дослідження до геотермальної системи було підключено два геотермальні теплообмінники по одному в кожній свердловині (режим 2×1, рис. 7) та два геотермальні теплообмінники, що змонтовані в одній свердловині (режим 1×2, рис. 8).

Як і під час проведення попередніх експериментів, температурні режими яких відображено на рис. 7, 8, початкова температура теплоносія в системі теплозабезпечення під час проведення експерименту була 28 °С, а пропиленгліколю 15 °С в умовах постійної циркуляції.

За час проведення експерименту з 18.12 по 19.00 в режимі 2×1 (рис. 7) та з 13.12 по 14.00 в режимі 1×2 (рис. 8) дина-

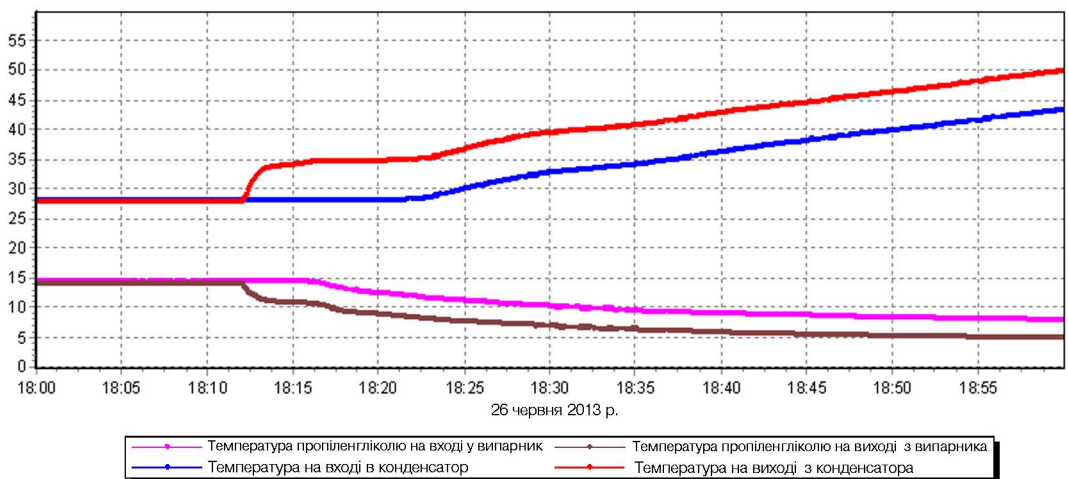


Рис. 7. Графік зміни температур у контрольних точках у разі підключення до геотермальної системи двох геотермальних теплообмінників по одному в кожній свердловині (режим 2×1)

міка змін температури як високотемпературного, так і низькотемпературного контурів збігалася з процесами, що відбувалися під час проведення експерименту в режимах 4×2, 4×1, але експеримент показав і суттєві відмінності. Так температура пропиленгліколю (контур № 2) знизалася за час проведення експерименту більше й становила: у режимі 2×1 – 7,9 °С на вході у випарник, 4,8 °С – на виході з випарника; у режимі 1×2 – 7,2 °С на вході у випарник, 4,1 °С – на виході з випарника. Температура теплоносія в системі теплозабезпечення (контур № 1) не досягла показників, що були під час проведення експерименту в режимі 4×4, і становила: у режимі 2×1 – 43,7 °С на вході в конденсатор, 50,4 °С – на виході з конденсатора; у режимі 1×2 – 43,2 °С на вході у випарник, 49,2 °С – на виході з випарника.

Система працює стабільно, при цьому різниця температур теплоносія на першому контурі ΔT_1 на вході й виході в систему опалення (на виході та вході з конденсатора) на відмітці часу 14.40 становить 6,7 °С у режимі 2×1 та 6,57 °С у режимі 1×2. Водночас різниця температур пропиленгліколю на другому контурі ΔT_2 на виході й вході в геотермальний теплообмінник (на вході та виході з конденсатора) на відмітці часу 14.40 становить 3,1 °С

у режимі 2×1 та 3,1 °С – у режимі 1×2. З урахуванням показників лічильників витрат рідини V_1 та V_2 по першому й другому контурах, що становлять відповідно $V_1=1,419 \text{ м}^3$ у режимі 2×1, $V_1=1,419 \text{ м}^3$ у режимі 1×2 та $V_2=2,364 \text{ м}^3$ у режимі 2×1, $V_2=2,4 \text{ м}^3$ у режимі 1×2, можна вирахувати потужність роботи геотермальної системи по теплу й холоду за формулою [1].

Отримані розрахункові дані свідчать, що система працює в штатному режимі. Потужність системи по теплу W_1 (режим 2×1) становить 10,56 кВт; потужність по холоду W_2 (режим 2×1) становить 8,14 кВт, що відповідає запроектованим параметрам.

Потужність системи по теплу W_1 (режим 1×2) становить 10,36 кВт; потужність по холоду W_2 (режим 1×2) становить 8,27 кВт, що загалом відповідає запроектованим параметрам.

На рис. 9 наведено графік зміни температур у контрольних точках геотермальної системи протягом одного періоду нагрівання теплоносія в системі теплозабезпечення, в умовах роботи, коли відповідно до регламенту проведення дослідження до геотермальної системи було підключено один геотермальний теплообмінник, встановлений в одну свердловину (режим 1×1).

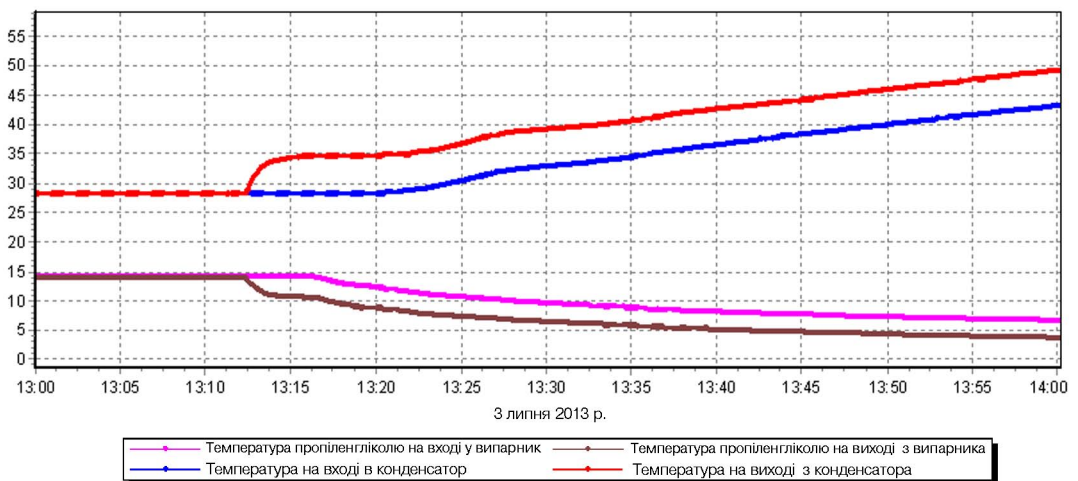


Рис. 8. Графік зміни температур у контрольних точках у разі підключення до геотермальної системи двох геотермальних теплообмінників, розміщених в одній свердловині (режим 1×2)

Як і під час проведення попередніх експериментів, початкова температура теплоносія в системі теплозабезпечення під час проведення експерименту була 28 °С, а пропиленгліколю – 15 °С в умовах постійної циркуляції.

На початку проведення експерименту з 18.12 по 18.25 у режимі 1×1 (рис. 9) динаміка змін температури як високотемпературного, так і низькотемпературного контурів збігалася з процесами, що відбувалися під час проведення експерименту в режимах 4×2, 4×1, 2×2, 2×1, 1×2, але експеримент показав, що в такому режимі система працює нестабільно. Так, температура пропиленгліколю (контур № 2) почала різко знижуватися на самому початку проведення дослідження. Динаміка підвищення температури теплоносія в системі теплозабезпечення (контур № 1) стала повільнішою.

Система пропрацювала в такому режимі недовго. На відмітці часу 18.33 температура на виході з випарника низькотемпературного контуру досягла критичної температура 2 °С. Після чого спрацювала захисна автоматика. Подальша періодична нестабільна робота геотермальної системи з 18.33 (рис. 9) пов'язана з тим, що ґрунтовий теплообмінник геотермальної системи цієї конструкції

(1×1) не в змозі забезпечити відновлення необхідної температури на вході у випарник системи при заданих параметрах потужності на виході геотермальної системи 12 кВт по теплу. Такий режим роботи геотермальної системи ми вважаємо аварійним.

До моменту входу системи в аварійний режим показники температур, кількісні показники витрат теплоносіїв низькотемпературного й високотемпературного контурів та розрахункові дані потужностей системи, що працювала в режимі (1×1), були такі:

- різниця температур теплоносія на першому контурі ΔT_1 на вході й виході в систему опалення (на виході та вході з конденсатора) на відмітці часу 18.30 становить 5,8 °С;

- різниця температур пропиленгліколю на другому контурі ΔT_2 на виході й вході в геотермальний теплообмінник (на вході та виході з конденсатора) на відмітці часу 18.30 становить 4,4 °С.

З урахуванням показників лічильників витрат рідини V_1 та V_2 по першому й другому контурах, що становлять відповідно $V_1=1,419 \text{ м}^3$ та $V_2=1,618 \text{ м}^3$, можна вирахувати потужність роботи геотермальної системи по теплу й холоду за формулою [1].

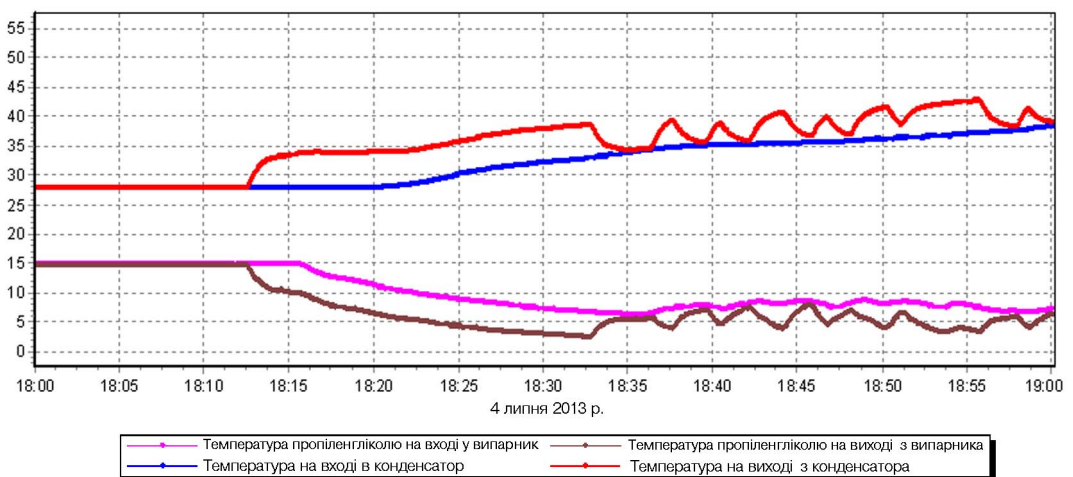


Рис. 9. Графік зміни температур у контрольних точках у разі підключення до геотермальної системи одного геотермального теплообмінника, змонтованого у свердловині (режим 1×1)

Потужність системи по теплу W_1 (режим 1×1) становить 9,14 кВт, потужність по холоду W_2 (режим 1×1) становить 7,91 кВт, що відповідає запроєктованим параметрам.

Отримані розрахункові дані свідчать, що система намагається підтримувати необхідні потужності по холоду й теплу, але внаслідок різкого падіння температури на вході у випарник, що є наслідком неможливості відновлюваного джерела тепла підтримувати регенераційні процеси в штатному режимі, переходить в аварійний режим. Тобто потужності ґрунтового теплообмінника з конфігурацією (1×1) недостатньо для роботи геотермальної системи навіть на нетривалий час.

Підсумки науково-дослідницького експерименту щодо вимірювання температурних режимів, об'єму витрат теплоносіїв, виконаних на експериментальному полігоні УкрДГРІ, а також отримані розрахункові дані були зведені в таблицю, а також у ній наведено вибірку з експериментально отриманих даних.

За табличними даними ми побудували графіки залежності вимірюваних і розра-

хункових параметрів від конструкції геотермального теплообмінника.

Аналіз отриманих даних, що відображені в графічному варіанті на рис. 10–14, свідчить про те, що:

1. Температура теплоносія на виході з конденсатора геотермальної системи зменшується в разі зменшення кількості геотермальних теплообмінників, але фактично не залежить від їх конфігурації (рис. 10).

2. Різниця температур теплоносія на першому контурі ΔT_1 (контурі конденсатора), зменшується як в разі зменшення кількості геотермальних теплообмінників, так і в разі переходу від конфігурації теплообмінника від $U \times 1$ до $U \times 2$ (рис. 13).

3. Температура пропиленгліколю на вході й виході з випарника геотермальної системи зменшується в разі зменшення кількості геотермальних теплообмінників та залежить від їх конфігурації. Температура пропиленгліколю на вході й виході з випарника геотермальної системи зменшується в разі переходу від конфігурації теплообмінника від $U \times 1$ до $U \times 2$ (рис. 11).

Таблиця. Вибірки з експериментально отриманих і розрахункових даних

Контур конденсатора геотермальної системи							
K ₁	Параметр	Режим роботи геотермального теплообмінника					
		4×2	4×1	2×2	2×1	1×2	1×1
	t ₁ (°C)	45,00	43,50	43,95	43,00	42,98	37,90
	t ₂ (°C)	36,50	35,70	36,29	36,30	36,41	32,10
	ΔT_1 (°C)	7,90	7,80	7,60	6,70	6,00	5,80
	V ₁ (м³)	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
	W ₁ (кВт)	12,46	12,30	11,98	10,56	9,46	9,14
	Контур випарника геотермальної системи						
K ₂	Параметр	Режим роботи геотермального теплообмінника					
		4×2	4×1	2×2	2×1	1×2	1×1
	t ₁ (°C)	12,70	11,20	11,00	9,00	8,10	7,40
	t ₂ (°C)	9,90	8,40	8,10	5,90	5,00	3,00
	ΔT_2 (°C)	2,80	2,80	2,90	3,10	3,10	4,40
	V ₂ (м³)	3,00	2,85	2,87	2,36	2,40	1,62
	W ₂ (кВт)	9,34	8,86	9,26	8,14	8,27	7,91

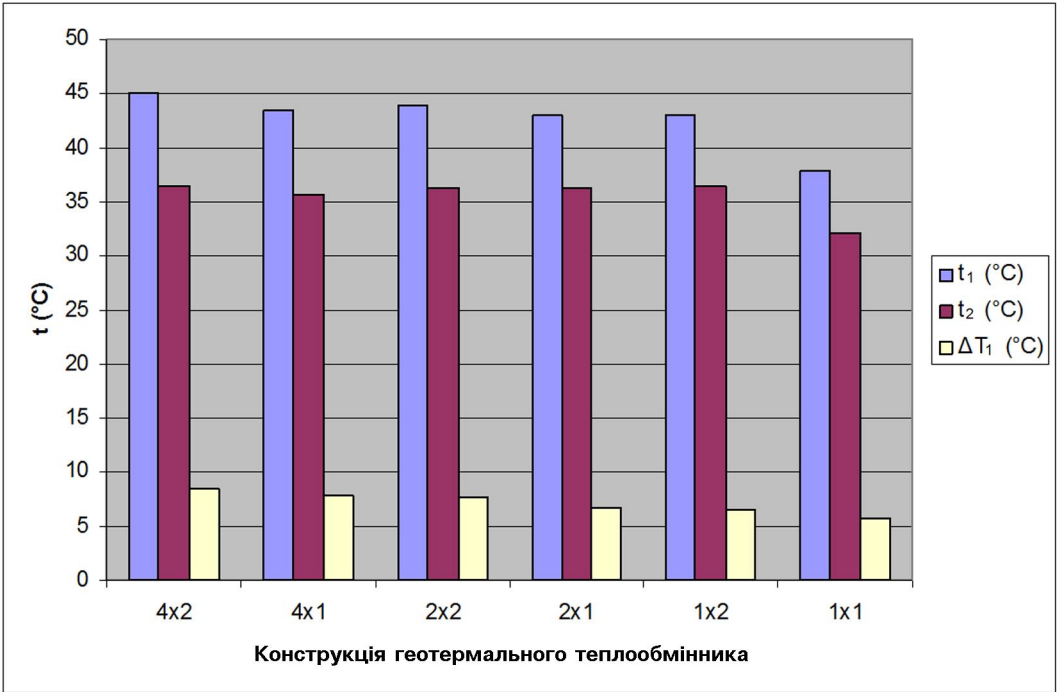


Рис. 10. Графік залежності показників температури в контурі конденсатора геотермальної системи від конструкції геотермального теплообмінника

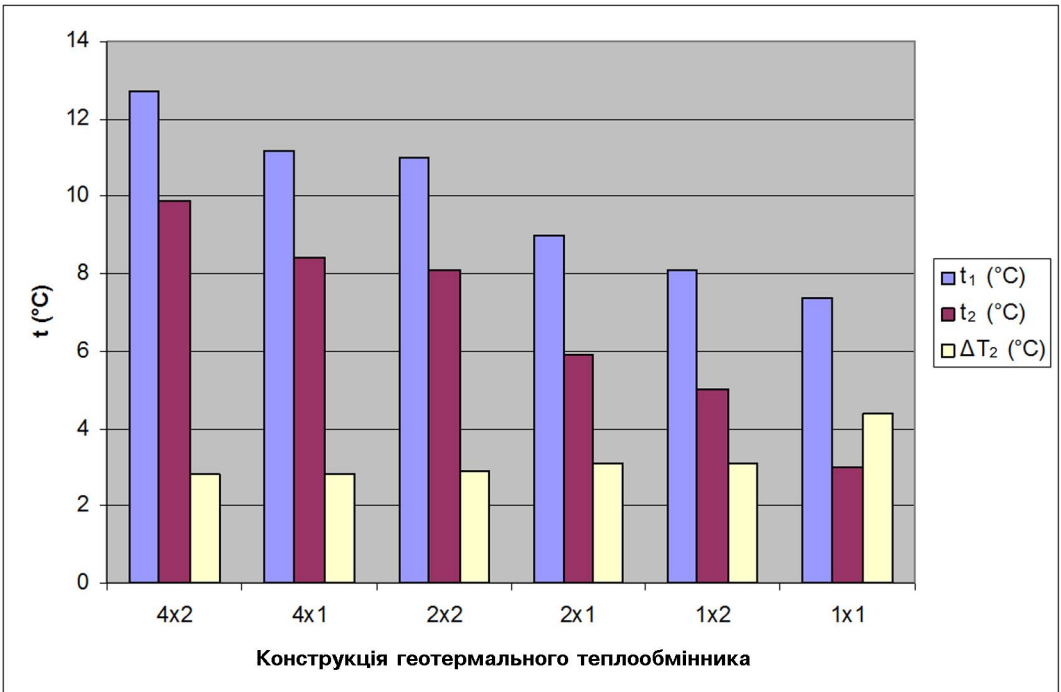


Рис. 11. Графік залежності показників температури в контурі випарника геотермальної системи від конструкції геотермального теплообмінника

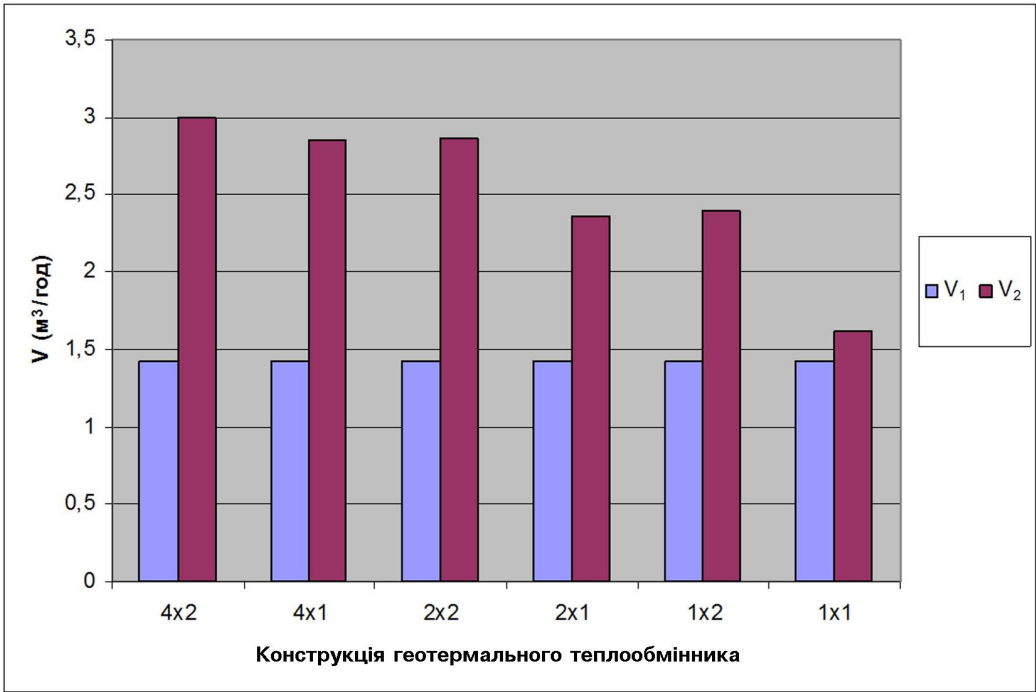


Рис. 12. Графік залежності об'єму теплоносія, що проходить по контурах геотермальної системи, від конструкції геотермального теплообмінника

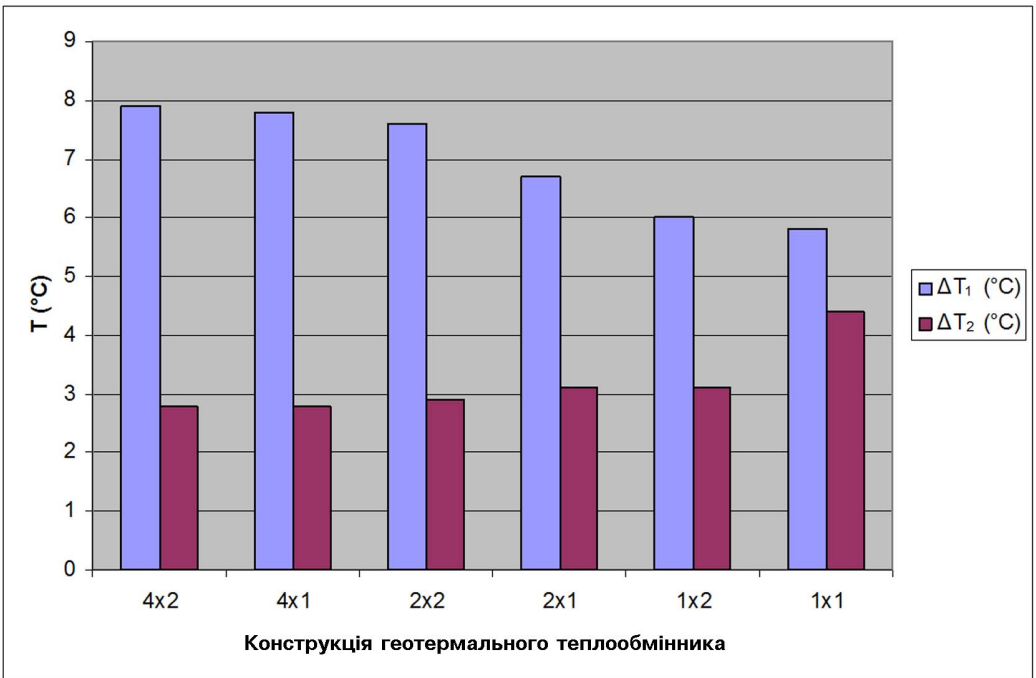


Рис. 13. Графік залежності різниці температур подавальної і зворотної магістралей першого та другого контурів (конденсатора й випарника) геотермальної системи від конструкції геотермального теплообмінника

4. Різниця температур теплоносія на другому контурі ΔT_2 (контурі випарника) рівномірно збільшується як в разі зменшення кількості геотермальних теплообмінників, так і в разі переходу від конфігурації теплообмінника від $U \times 1$ до $U \times 2$ (рис. 13).

5. Об'єм теплоносія, що проходить через контур конденсатора за 1 год, не залежить від конфігурації геотермального теплообмінника (рис. 12).

6. Об'єм пропіленгліколю, що проходить через контур випарника за 1 год, зменшується в разі зменшення кількості геотермальних теплообмінників і збільшується в разі переходу від конфігурації теплообмінника від $U \times 1$ до $U \times 2$ (рис. 12).

7. Потужність геотермальної системи по теплу суттєво зменшується в разі зменшення кількості геотермальних теплообмінників та знижується на незначну величину в разі переходу від конфігурації теплообмінника від $U \times 1$ до $U \times 2$ (рис. 14).

8. Потужність геотермальної системи по холоду зменшується в разі зменшення кількості геотермальних теплообмінників та збільшується в разі переходу конфігурації теплообмінника від $U \times 1$ до $U \times 2$ (рис. 14).

Отже, можна зробити висновок, що оптимальний ступінь охолодження розчину у випарнику, який забезпечує мінімум затрат електроенергії, несуттєво залежить від загальної довжини ГТ, тобто від кількості U-подібних геотермальних зондів у свердловинах, та несуттєво залежить як від кількості зондів у свердловині, так і від розрахункової температури теплоносія на опалення в діапазоні температур 30–50 °С.

Гіпотетично припускаємо, що розрахунки потужності, виконані за експериментально отриманими показниками, можуть містити похибки внаслідок недооцінки інших чинників, що впливають на роботу системи в реальних умовах експлуатації.

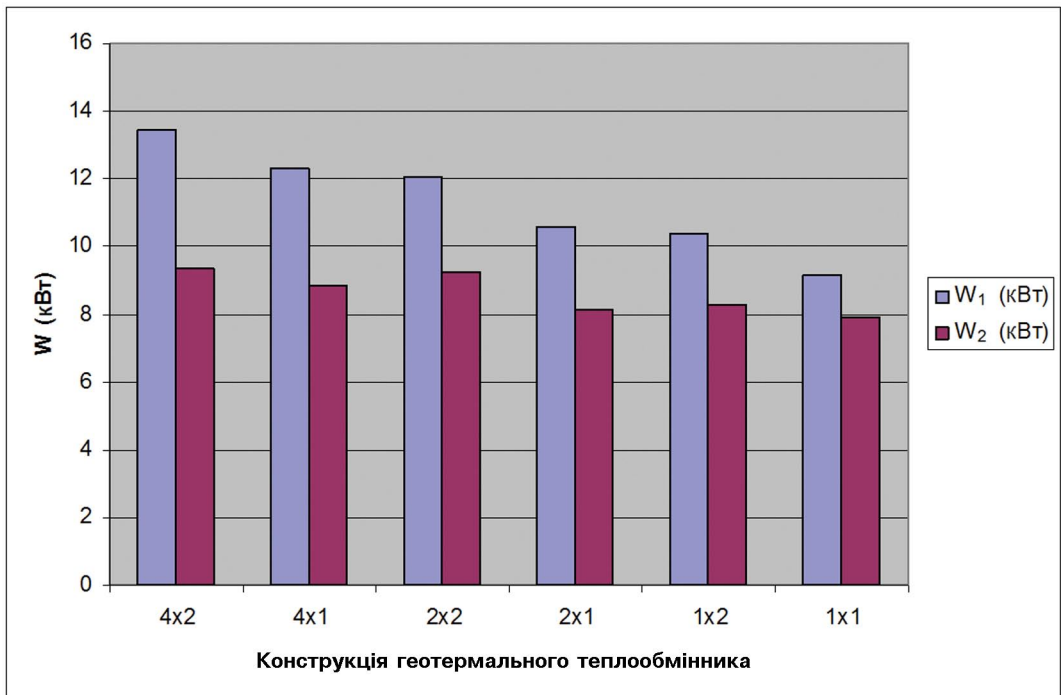


Рис. 14. Графік залежності потужності, що виробляє геотермальна система, по теплу й холоду від конструкції геотермального теплообмінника

Виникає питання щодо необхідності суто статистичного підходу як до інтерпретації отриманих даних, так і до їх розрахунку способом математичного моделювання для перевірки отриманих даних. Під час вивчення цього питання ми проаналізували низку наукових статей різних авторів [1, 3, 5]. Найдоцільнішим для дослідження цього об'єкта є математичний апарат [2], де оптимальне співвідношення між такими параметрами ГТ, як довжина труби одного контуру, діаметр труби та швидкість руху теплоносія при заданих умовах застосування ГТ, тобто інтенсивності тепловідбору від ґрунту q , теплофізичних властивостей вибраного теплоносія, а також температурних умов роботи ТНУ описується за формулою

$$L_{ГТ}^{opt} = \frac{6 + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a}, \quad (2)$$

де коефіцієнти квадратного рівняння

$$a = \left[\frac{4q_{ГТ}}{w\pi d_{вн}^2 \rho_{с.р.} c_p} \right]^2;$$

$$b = \frac{\lambda w^2 B}{2 c_p d_{вн}};$$

$$c = \frac{\Delta p_{вип} B}{\rho_{с.р.} c_p},$$

$$a \quad B = \frac{T_{к}^{ТН}}{\eta_{н} \eta_{пр}} \left[\eta_{ТН} - 1 + \frac{273 + t_{с.р.}^{ВХ} - \Delta t_{вип}}{T_{к}^{ТН}} \right].$$

Однією з основних характеристик умов роботи теплообмінника є інтенсивність відбору теплоти від ґрунту, величина якої залежить від типу, теплоємності мінеральних складових та вологості ґрунту, часу вилучення теплоти, а також умов використання теплообмінника в холодний і теплий періоди року. У разі використання ґрунтового масиву тільки як джерела теплоти в холодний період року значення середніх теплових потоків на 1 погонний метр труби ґрунтового колектора для різних типів ґрунтів наведено в праці [6].

Як теплоносієм для відбору теплоти з ґрунту найчастіше використовують водяні розчини етиленгліколю або пропілен-

гліколю. Розчин на основі етиленгліколю має меншу в'язкість і тому майже унеможливує ламінарний режим в умовах руху теплоносія в реальних ГТ. У праці [3] зазначено, що в разі унеможливлення ламінарного режиму руху теплоносія інтенсивність тепловідбору з ґрунту майже не залежить від діаметра труби. За зазначених вище умов роботи ГТ за формулою (2) проведено розрахунки оптимального співвідношення між довжиною труби контуру L , швидкістю руху теплоносія w та внутрішнім діаметром труби $d_{вн}$. Розрахунки були виконані для таких вихідних даних:

- 25 %-ний водяний розчин етиленгліколю;
- температура соляного розчину на вході до випарника $t_{с.р.}^{ВХ} = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- теплофізичні властивості соляного розчину: густина $\rho_{с.р.} = 1044,636 \text{ кг/м}^3$;
- ізобарна теплоємність $c_p = 3765 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$;
- кінематична в'язкість $\nu_{с.р.} = 3,308 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- температура навколишнього повітря $t_0 = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- розрахункова температура гріючого теплоносія $t'_i = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- розрахункова температура на опалення $t''_p = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- втрати тиску у випарнику ТН $\Delta p_{вип} = 35 \text{ кПа}$.

На рис. 15 і 16 наведено графічну інтерпретацію отриманих оптимальних характеристик контуру ГТ.

Як бачимо на рис. 15, оптимальну довжину труби контуру теплообмінника можна визначити залежно від вибраного значення швидкості руху теплоносія й діаметра труби.

При знайдених таким чином величинах $L_{ГТ}^{opt}$ і $d_{вн}$ (рис. 16) маємо можливість визначити відповідний перепад тиску $\Delta p_{ГТ}$ у трубах теплообмінника, після чого можна отримати загальний перепад тиску в контурі нижнього джерела теплоти для підбору циркуляційного насоса. І навпаки, якщо вихідною величиною під час проектування ГТ є тиск циркуляційного насоса, то з урахуванням співвідношення за допо-

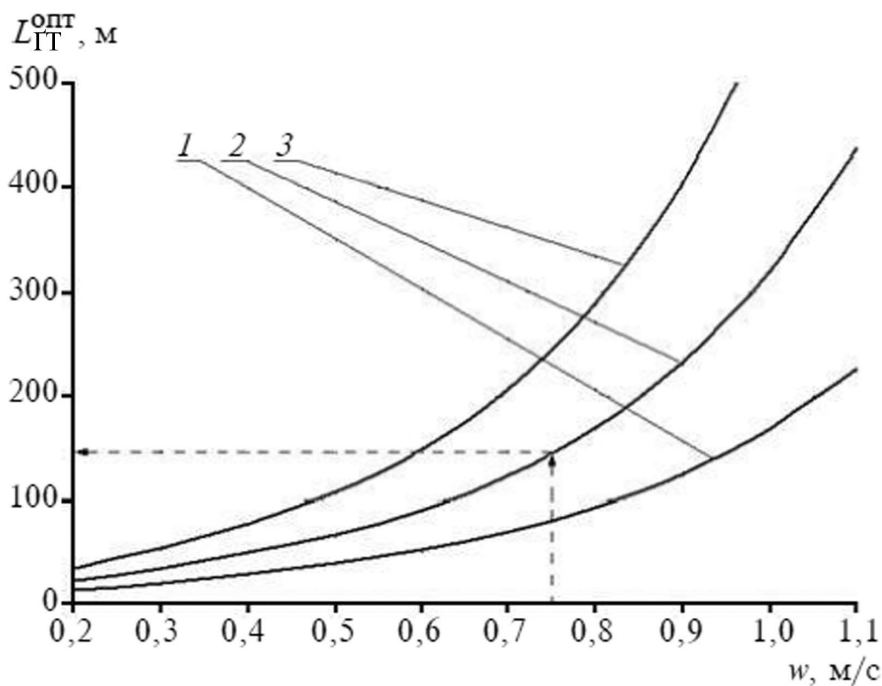


Рис. 15. Залежність довжини ГТ від швидкості руху водяного розчину етиленгліколю:
 1, 2, 3 – діаметр труби ГТ, $d_z = 25; 32; 40$ мм відповідно

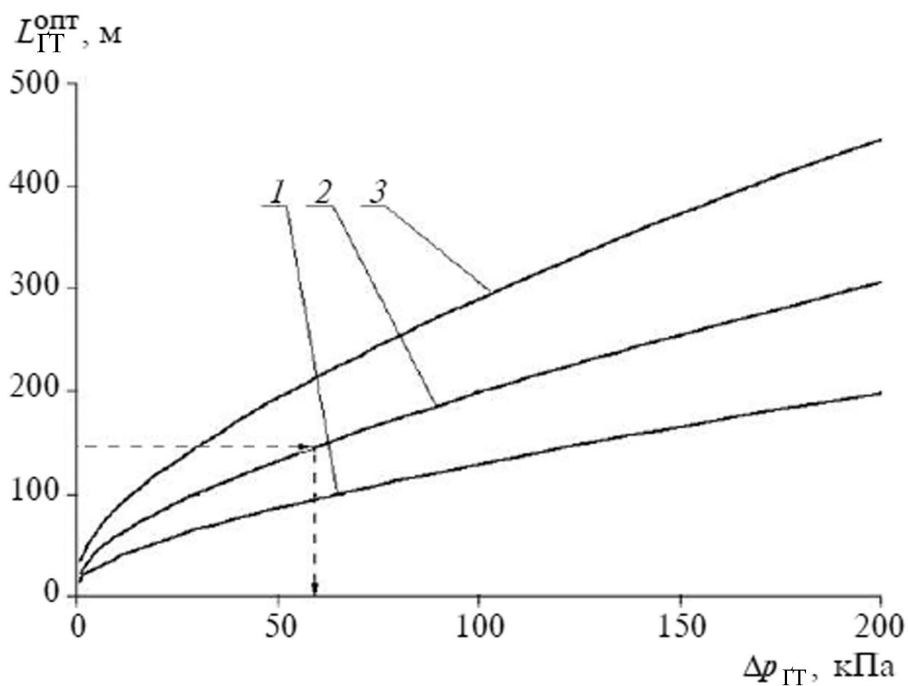


Рис. 16. Залежність довжини ГТ від втрат тиску в ньому:
 1, 2, 3 – діаметр труби ГТ, $d_z = 25; 32; 40$ мм відповідно

могою графіків на рис. 16 можна визначити оптимальне співвідношення довжини й діаметра труби і потім (рис. 15) знайти відповідне значення швидкості руху теплоносія, що має бути враховане при визначенні необхідної витрати теплоносія через ГТ залежно від теплової потужності геотермальної системи для цього об'єкта теплопостачання.

На основі отриманих параметрів для одного контуру ГТ може бути визначена кількість контурів, паралельно підключених, залежно від теплової потужності ТН для конкретного об'єкта теплопостачання.

У праці [2] зроблено висновок, що проведені розрахунки для пропіленгліколю та різних температур холодного (2–5 °С) і гарячого (30–50 °С) теплоносіїв засвідчили, що оптимальне співвідношення між параметрами контуру теплообмінника передусім змінюється залежно від типу ґрунту, слабо залежить від теплофізичних характеристик теплоносія й майже не залежить від температурних умов роботи ТНС. Це, безумовно, так, але з наведеного вище аналізу експериментально отриманих даних ми бачимо, що при вертикальному розміщенні геотермальних зондів в умовах однакової загальної довжини труби контуру геотермального теплообмінника, але при використанні різної їх конфігурації, потужність системи змінюється.

Отже, доцільно внести поправкові коефіцієнти (K_p), які ми визначили емпіричним способом, у розрахунки, наведені в роботі [2], у тому разі, коли вони виконуються для вертикального геотермального зонда різної конфігурації. Для розрахунку поправкових коефіцієнтів типових вертикальних геотермальних зондів (коаксіального, U-подібного, подвійного U-подібного) пропонується використати математичний апарат, запропонований у праці [4], де параметри теплообміну, які визначаються конфігурацією геотермального теплообмінника, становлять:

– для коаксіального геотермального теплообмінника – $P_k = 2\pi R$;

– для U-подібного геотермального теплообмінника – $P_u = (\pi + 2)R$;

– для подвійного U-подібного геотермального теплообмінника – $P_{2u} = 0,828(\pi + 4)R$.

Виходячи з вищезазначеного, пропонуємо при введенні поправкового коефіцієнта в розрахунки враховувати параметр теплообміну та визначити його в номінальному вигляді. Для цього провести нормування параметрів теплообміну для типових геотермальних теплообмінників та при розрахунку прийняти, що радіус свердловини дорівнює одиниці ($R = 1$).

Під час проведення розрахунків ми отримали такі поправкові коефіцієнти для типових геотермальних теплообмінників:

– $K_{pk} = 1$ (коефіцієнт поправковий коаксіального геотермального теплообмінника);

– $K_{pu} = 0,82$ (коефіцієнт поправковий U-подібного геотермального теплообмінника);

– $K_{p2u} = 0,94$ (коефіцієнт поправковий подвійного U-подібного геотермального теплообмінника).

Із номінальних значень поправкового коефіцієнта можна зробити висновок, що оптимальні характеристики ґрунтового теплообмінника залежать від конфігурації геотермального зонда. Так показники ефективності зростають зі збільшенням кількості ГТ, змонтованих в одній свердловині. А найменший показник, як підтвердили експериментальні дослідження та математичний розрахунок, має одинарний U-подібний геотермальний теплообмінник.

Висновки

Математичні розрахунки з використанням коефіцієнтів, що враховують реальні процеси, виконані на основі математичного апарату, підтверджують, що оптимальні характеристики ГТ залежать в основному від теплоємності мінеральних складових і вологості ґрунту, часу вилучення теплоти, а також умов використання теплообмінника в холодний і теплий періоди року, слабо залежать від теплофізичних характеристик теплоносія й майже не залежать від температурних умов

роботи ТНС. А поправкові коефіцієнти, що підтверджені практично отриманими результатами експерименту, свідчать, що оптимальні характеристики ГТ залежать від довжини й конфігурації геотермального зонда. Також суттєвими параметрами, які необхідно враховувати під час визначення оптимальних характеристик, є діаметр труби ГТ і швидкість руху соляного розчину в контурі.

Результати роботи мають як теоретичне, так і практичне значення й можуть бути використані на стадії проектування ГТ для забезпечення оптимальних умов роботи геотермальної системи теплопостачання, що використовує як первинне джерело енергії верхні шари Землі.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Безродний М. К., Притула Н. О.* Оптимальна робота теплового насоса в низькотемпературних системах опалення з використанням теплоти ґрунту//Наукові вісті НТУУ “КПІ”. 2012. № 1. С. 7–12.
2. *Безродний М. К., Притула Н. О.* Оптимальні характеристики ґрунтових теплообмінників для теплонасосних систем теплопостачання//Наукові вісті НТУУ “КПІ”. 2012. № 2. С. 24–29.
3. *Гершкович В. Ф.* Особенности проектирования систем теплоснабжения зданий с тепловыми насосами. К.: Укр. акад. архитек., ЧП Энергоминимум, 2009. 60 с.
4. *Накорчевський А. І.* Грунтовые аккумуляторы теплоты и модернизация коммунальной теплоэнергетики/Институт технической теплофизики НАН Украины, 2010. С. 66–67.
5. *Некрасова О. А., Синяк Ю. В.* Исследование теплонасосных систем отопления (модельный поход)//Теплоэнергетика. 1986. № 11. С. 30–34.
6. *Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами.* Чинний від 01.09.2010. К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 52 с.
7. *Теплофизические свойства водного раствора этиленгликоля [Електронний ресурс].* Режим доступа: <http://www.dpva.info/Guide/GuideMedias/Antifreeze/MEGwaterPropertis/>

Рукопис отримано 25.10.2013.

Проведены исследования физических процессов в системе “геотермальный теплообменник-грунтовой массив” и установлены зависимости эффективности работы геотермальной системы теплоснабжения от конструкции ГТ и его теплотехнических характеристик. Выполнен анализ и подведены итоги относительно оптимальной конструкции геотермального теплообменника и его характеристик.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, возобновляемые источники энергии, геотермальная система, геотермальный теплообменник, геотермальный зонд, грунтовой коллектор.

There are realized investigations of the physical processes in the system “geothermal heat exchanger-soil mass” and installed work – activity relationship of a geothermal heating system from the design of activity relationship and thermal characteristics. Made analyze and draw conclusions that the optimal design of a geothermal heat exchanger and characteristics.

Keywords: alternative energy, renewable energy source, geothermal system, a geothermal heat exchanger, geothermal probe, ground collector.