



**ДОЛІНСЬКИЙ
Анатолій Андрійович** — академік НАН України, доктор технічних наук, професор, почесний директор, завідувач відділу тепломасообміну в дисперсних системах Інституту технічної теплофізики НАН України



**ОБОДОВИЧ
Олександр Миколайович** — доктор технічних наук, головний науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України

УДК 621.1

СВІТОВИЙ ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ

Наведено результати аналізу світового запасу геотермальних вод для виробництва теплової та електричної енергії, представлено схеми геотермальних станцій. Проаналізовано дані щодо запасів геотермальних вод у різних регіонах України, окреслено перспективні райони. Розглянуто переваги і недоліки використання геотермальної енергії в Україні. Визначено перелік заходів, спрямованих на розвиток геотермальної енергетики в країні.

Ключові слова: геотермальна енергія, геотермальні електростанції, геотермальні ресурси, геотермальний теплоносіє, теплові насоси.

Зростання цін на органічне паливо істотно підвищує конкурентоспроможність енергетичних технологій на основі відновлюваних джерел енергії, особливо геотермальної енергетики. Світовий потенціал вивчених на сьогодні геотермальних ресурсів становить 0,2 ТВт електричної і 4,4 ТВт теплової потужності. Приблизно 70 % цього потенціалу припадає на родовища з температурою флюїду менше 130 °С. Останнім часом різко збільшилися обсяги і розширилися сфери використання геотермальних ресурсів. В енергетичному балансі ряду країн починають домінувати геотермальні енергетичні технології, а частка геотермальної енергетики у світовому енергетичному балансі неухильно зростає.

Залежно від температури геотермальні ресурси широко використовують в електроенергетиці та теплофікації, промисловості, сільському господарстві, бальнеології та інших галузях. Новітні енергетичні технології з використанням геотермальних ресурсів за екологічною чистотою та ефективністю наближаються до традиційних. На сучасних ГеоЕС коефіцієнт використання потужності досягає 90 %, що в 3—4 рази вище, ніж для технологій з використанням інших відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової, приливної). На ГеоЕС, що працю-

ють з використанням технології геотермальних циркуляційних схем і бінарного циклу, повністю виключаються викиди діоксиду вуглецю в атмосферу, що є найважливішою екологічною перевагою таких енергетичних установок.

Світовий ринок геотермальної енергії постійно зростає. Так, у 2004 р. сумарна встановлена потужність ГеоЕС, які працювали в 24 країнах світу, становила 8,91 ГВт, річний виробіток електроенергії на ГеоЕС – 56,8 ТВт·год; у 2009 р. сумарна встановлена потужність становила вже 10,71 ГВт, річний виробіток електроенергії на ГеоЕС – 67,2 ТВт·год; а у 2014 р. ці показники досягли 12,64 ГВт і 73,55 ТВт·год відповідно. Очікується, що до 2020 р. сумарна встановлена потужність ГеоЕС у світі зросте до 21,4 ГВт. Світовим лідером за встановленою електричною потужністю ГеоЕС є США – 3,450 ГВт (рис. 1). За останні 5 років найбільшими темпами геотермальна енергетика зростала в таких країнах, як Кенія (+392 МВт), США (+352 МВт), Туреччина (+306 МВт), Нова Зеландія (+243 МВт), Індонезія (+143 МВт), Ісландія (+90 МВт), Італія (+73 МВт) [1–4].

Геотермальні електростанції класифікуються за такими ознаками:

- за способом реалізації термодинамічного циклу – поділяються на конденсаційні та бінарні;
- за типом використання в технологічному циклі робочого тіла – поділяються на ГеоТЕС з паровими турбінами і ГеоТЕС з турбінами на низькокиплячому робочому тілі;
- за технологічною схемою паропроводів – поділяються на блокові і ГеоТЕС з поперечними зв'язками;
- за видами енергії, що відпускається, – поділяються на конденсаційні та ГеоТЕС, що відпускають лише електроенергію (за наявності споживачів можливе постачання теплової енергії);
- за рівнем участі генеруючих енергетичних об'єктів у покритті графіка електроспоживання – поділяються на базові та напівпікові, залежно від кількості годин використання встановленої потужності електростанції в процесі її роботи у розглянутий період часу.

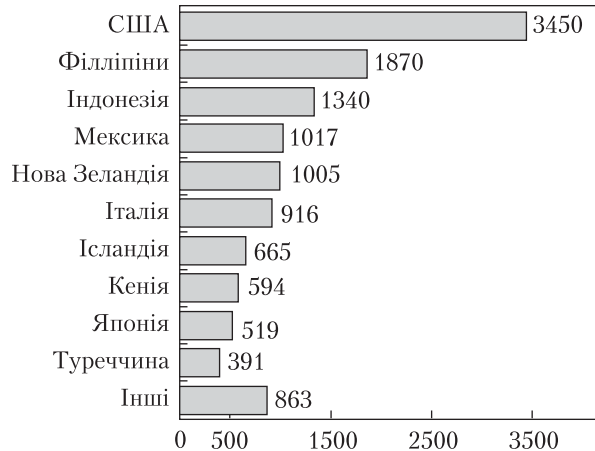


Рис. 1. Десять країн-лідерів за встановленою електричною потужністю ГеоЕС станом на 2015 р. [1]

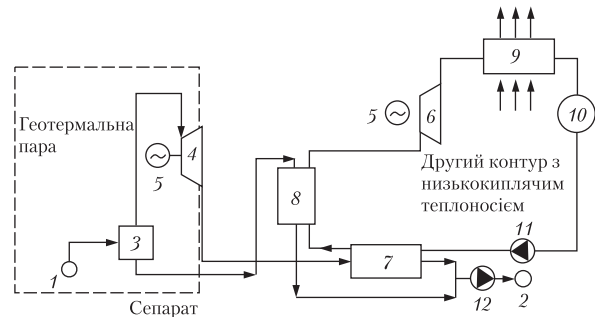


Рис. 2. Теплова схема геотермальної електростанції бінарного циклу: 1 – видобувна свердловина; 2 – нагнітальна свердловина; 3 – сепаратор; 4 – парова турбіна; 5 – генератор; 6 – турбіна на низькокиплячому робочому агенті; 7 – конденсатор-випарник; 8 – пароперегрівач; 9 – повітряний конденсатор; 10 – ресивер; 11 – циркуляційний насос; 12 – нагнітальний насос

На рис. 2 наведено схему паротурбінної установки ГеоТЕС бінарного циклу. Як низькокиплячий теплоносієм другого контура обрано ізобутан – вуглеводень класу алканів, ізомер нормального бутану [5]. При бурінні геотермальних свердловин виділяється великий обсяг супутніх газів, у тому числі ізобутану. Його температура кипіння становить $-11,73^{\circ}\text{C}$, температура плавлення $-159,6^{\circ}\text{C}$. За середньої температури резервуара 200°C теплоносієм на поверхні є перегріта і насичена пара/термальна вода.



Паужетська ГеоЕС на Камчатському п-ові (Росія), збудована 1966 р., потужність — 12 МВт



Геотермальна станція SvartsengiGeo (Ісландія), збудована 1976 р., потужність — 80 МВт

У бінарній установці для електростанції передбачено використання пари, одержуваної двоступеневою сепарацією пароводяної суміші, яка забирається з геотермальних свердловин, для вироблення електроенергії в двох паротурбінних агрегатах конденсаційного типу, що працюють у базовому режимі з початковим тиском пари 0,65 МПа. Для забезпечення екологічної чистоти проекту в технологічній схемі електростанції передбачено систему закачування (реінжекції) конденсату і сепарату назад у земні пласти, а також запобігання викидам сірководню в атмосферу.

Енергоустановка бінарного циклу має свої переваги і недоліки. До переваг належать:

- повніше використання теплоти розсолу і закачування його в пласт з меншою температурою;
- можливість використання геотермальних ресурсів зі зниженою температурою для вироблення електроенергії;
- агресивні компоненти геотермального теплоносія не потрапляють у турбіну, конденсатор та інше обладнання, що забезпечує більш тривалий термін їх експлуатації;
- супутні шкідливі гази не потрапляють у навколишнє середовище.

Недоліком установки є громіздка схема і втрата температурного потенціалу, оскільки для передачі тепла від геотермального флюїду до робочого тіла необхідний перепад температур.

Бінарні енергоблоки працюють, наприклад, на Паужетській ГеоЕС (Росія), SvartsengiGeo (Ісландія). У проектуванні та пуску Паужетської ГеоЕС брали участь співробітники Інституту технічної теплофізики НАН України.

На відміну від ресурсної бази для спорудження ГеоЕС, де температура геотермального теплоносія має бути досить високою, запаси середньо- і низькотемпературного тепла, придатного для теплопостачання, надзвичайно великі і є практично повсюдно.

В останні роки активно розвиваються геотермальні системи теплопостачання на основі теплових насосів. У таких системах як первинне джерело тепла використовують низькопотенційну (температурою до 55 °С) термальну воду і петротермальну енергію верхніх шарів земної кори. При використанні тепла ґрунту застосовують ґрунтові теплообмінники, розміщені або у вертикальних свердловинах глибиною до 300 м, або горизонтально на деякій глибині.

Теплота геотермальних вод може застосовуватися для опалення та гарячого водопостачання громадських і виробничих будівель та споруд. Розроблення проектів геотермальних систем теплопостачання проводять на основі розрахункової потреби в теплоті і балансових запасів геотермальних вод.

Нові геотермальні свердловини необхідно розміщувати в безпосередній близькості від

потенційних споживачів геотермальної теплоти. Теплотехнічні рішення геотермальних систем теплопостачання мають забезпечувати якомога більшу глибину спрацьовування теплового потенціалу геотермального теплоносія і рівномірність використання затвердженого максимального дебіту термоводозабору протягом року. У південних районах України геотермальну воду взимку можна використовувати для опалення, а в літній період — для вироблення холоду. Зі зменшенням теплового навантаження можливе використання геотермальної теплоти в басейнах, лазнях, пральнях тощо.

Принципові схеми теплопостачання вибирають з урахуванням температури і хімічного складу геотермального теплоносія, характеру можливого споживання геотермальної теплоти, умов скидання відпрацьованої геотермальної води, наявності джерела питної води, взаємного розташування термоводозабору, споживача, місця скидання. Догрівання геотермального теплоносія, яке не відповідає вимогам котельних установок, має проводитися в теплообмінних апаратах.

Допускається використання теплонасосних установок, що утилізують теплоту геотермальної води, яка скидається, як пікових джерел теплоти.

Геотермальна система теплопостачання може бути відкритою і закритою [6]. У відкритій системі геотермальна вода подається безпосередньо на водозабір гарячого водопостачання, в закритій — на водозабір подається негеотермальна вода, нагріта з використанням геотермальної теплоти.

Геотермальна система теплопостачання із залежним приєднанням систем опалення — система, в якій геотермальна вода подається безпосередньо в опалювальні прилади опалювальних установок. Система з незалежним приєднанням систем опалення — система, в якій в опалювальні прилади подається негеотермальний теплоносій, нагрітий у теплообміннику за рахунок геотермальної теплоти. Нижче представлено найпоширеніші схеми систем геотермального водопостачання.

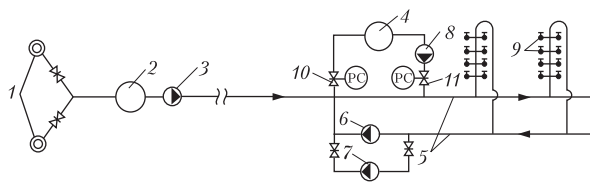


Рис. 3. Відкрита однотрубна геотермальна система гарячого водопостачання з двотрубною розподільною мережею: 1 — геотермальні свердловини термоводозабору; 2 — збірний бак-акумулятор геотермальної води; 3 — мережевий насос; 4 — бак-акумулятор розподільної мережі; 5 — двотрубна розподільна мережа; 6—8 — мережевий циркуляційний і підживлювальний насоси розподільної мережі; 9 — водорозбірний кран; 10 — регулятор зливу; 11 — регулятор підживлення

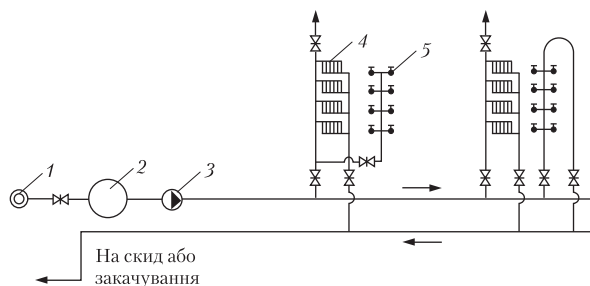


Рис. 4. Відкрита двотрубна геотермальна система теплопостачання: 1 — геотермальна свердловина; 2 — бак-акумулятор; 3 — мережевий насос; 4 — опалювальні прилади; 5 — водорозбірний кран

На рис. 3 наведено схему відкритої однотрубною геотермальною системою гарячого водопостачання з двотрубною розподільною мережею, в якій циркулює геотермальна вода. Підживлення в міру водоспоживання здійснюється з однотрубною транзитною тепловою мережею. Добова нерівномірність водоспоживання регулюється баком-акумулятором. Схему можна рекомендувати в разі порівняно великого віддалення термоводозабору від споживача геотермальної теплоти.

У відкритій двотрубною геотермальною системою теплопостачання (рис. 4) геотермальна вода паралельно подається на опалення та гаряче водопостачання. Після проходження опалювальних систем вода скидається поблизу термоводозабору. Транзитна тепла мережа має двотрубною прокладку.

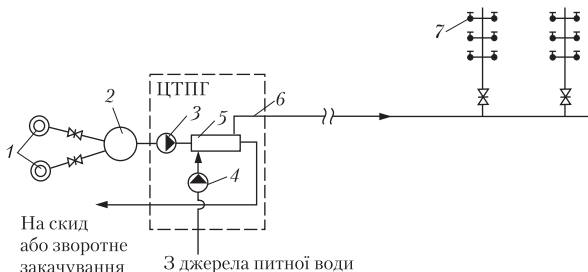


Рис. 5. Однотрубна замкнута геотермальна система гарячого водопостачання з джерелом питної води, розташованим на термоводозаборі: 1 – геотермальні свердловини термоводозабору; 2 – збірний бак-акумулятор геотермальної води; 3 – мережевий насос геотермальної води; 4 – мережевий насос питної води; 5 – мережевий теплообмінник; 6 – однотрубна транзитна теплотраса; 7 – водорозбірний кран

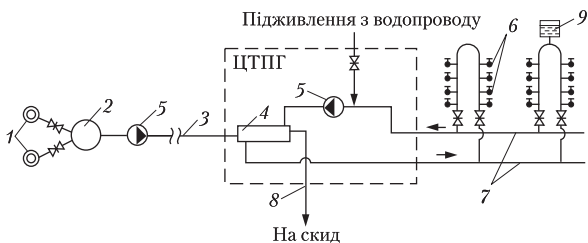


Рис. 6. Однотрубна замкнута геотермальна система гарячого водопостачання: 1 – геотермальні свердловини термоводозабору; 2 – збірний бак-акумулятор геотермальної води; 3 – однотрубна транзитна теплотраса; 4 – мережевий теплообмінник; 5 – мережеві насоси; 6 – водорозбірний кран; 7 – двотрубна розподільна тепломережа; 8 – тепломережа скидання; 9 – розширювальний бак

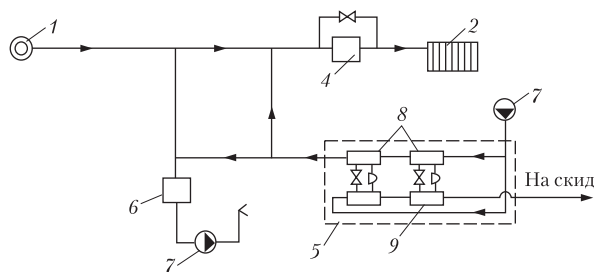


Рис. 7. Принципова схема системи геотермального теплопостачання із застосуванням пікового догріву і теплових насосів: 1 – свердловина; 2 – система опалення; 3 – система гарячого водопостачання; 4 – пікова котельня; 5 – теплонасосна установка; 6 – бак-акумулятор; 7 – насос; 8 – конденсатори; 9 – випарники

На рис. 5 наведено схему однотрубної закритої геотермальної системи гарячого водопостачання з джерелом питної води, розташованим на термоводозаборі. Геотермальна вода подається на теплообмінник ЦТПГ, розміщений поблизу термоводозабору, після чого скидається або закачується в пласт через свердловину зворотного закачування. Вода з джерела питної води (наприклад, холодної артезіанської свердловини) нагрівається в теплообміннику, транспортується до споживача і там розбирається на гаряче водопостачання. Добова нерівномірність водоспоживання регулюється з допомогою бака-акумулятора. Розподільна мережа є однотрубною. Недоліком тут, як і у схемі на рис. 4, є відсутність циркуляції теплоносія в період відсутності водорозбору.

На рис. 6 представлено схему однотрубної закритої геотермальної системи гарячого водопостачання. Застосування цієї схеми доцільне при розташуванні місця скидання відпрацьованої геотермальної води поблизу споживача геотермальної теплоти. Згідно зі схемою, геотермальний теплоносій однотрубною транзитною тепловою мережею подається в теплообмінник ЦТПГ, після чого скидається. Негеотермальний теплоносій питної якості, циркулюючи двотрубною розподільною мережею, нагрівається в теплообміннику ЦТПГ і подається на водорозбір. Підживлення здійснюється з водопроводу. Через порівняно велику протяжність теплової мережі, якою транспортується геотермальна вода, цю схему можна рекомендувати в разі відсутності небезпеки інтенсивної корозії і відкладення солей.

На рис. 7 наведено схему системи геотермального теплопостачання із застосуванням пікового догріву і теплових насосів. Для економії геотермальної теплоти рекомендовано геотермальну систему теплопостачання із застосуванням теплонасосних установок. У літній період така система може працювати в режимі холодопостачання. Теплонасосні установки слід розміщувати на зворотній лінії геотермальних систем.

За оцінками, 70,95% загальної потужності геотермальних теплових систем у світі при-

падає на теплонасосні системи. Загальна встановлена потужність теплонасосних систем становить 49 898 МВт при річному виробленні тепла — 325 028 ТДж. На 2015 р. геотермальні теплонасосні системи теплопостачання використовувалися в 48 країнах світу із середнім коефіцієнтом перетворення $K_{\text{п}} = 0,21$. Найбільшого розвитку ці технології набули в США, Китаї, Швеції, Німеччині і Франції.

Кількість встановлених установок, еквівалентних 12 кВт (типових для будинків США і Західної Європи), становить приблизно 4,16 млн. Це на 51 % більше, ніж кількість встановлених одиниць у 2010 р., і більш як утричі перевищує кількість встановлених одиниць у 2005 р.

У Німеччині загальна теплова потужність геотермальних систем становить 2848,6 МВт, з яких 2590 МВт — на основі теплових насосів, що використовують тепло ґрунту.

Енергетичною стратегією України на період до 2030 року визначено, що освоєння відновлюваних джерел енергії є важливим фактором підвищення рівня енергетичної безпеки і зниження антропогенного впливу енергетики на навколишнє середовище. У розпорядженні Кабінету Міністрів України від 01.10.2014 № 902-р «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року» зазначено, що Україна має великий потенціал геотермальних ресурсів.

Загальні ресурси геотермальної енергії в Україні оцінюють на рівні 10^{22} Дж, що еквівалентно запасам в обсязі $3,4 \cdot 10^{11}$ т у.п. [7]. За різними розрахунками, прогнозний енергетичний потенціал використання джерел термальних вод становить загалом 47 500 МВт і розподілений по областях таким чином:

- Закарпатська — 490 МВт;
- Миколаївська — 2 828 МВт;
- Одеська — 2 350 МВт;
- Полтавська — 9,2 МВт;
- Сумська — 15,8 МВт;
- Харківська — 1,3 МВт;
- Херсонська — 4 230 МВт;
- Чернігівська — 58,3 МВт;
- АР Крим — 37 600 МВт.

Однак для технічної параметризації розробки нових і розвіданих геотермальних джерел необхідно виконати зіставлення зон аномальних значень теплового потоку в земній корі з їх геолого-гідрогеологічними умовами. При цьому потрібно визначити горизонти, води яких використовуватимуться як теплоносії, оцінити їх експлуатаційні запаси і можливі дебіти свердловин. Крім того, слід вивчити потребу і практичну підготовленість адміністративного району геотермальних родовищ в освоєнні цих ресурсів.

Інтерес до альтернативних джерел енергії зумовлений виснаженням запасів вуглеводневого палива і необхідністю вирішення низки екологічних проблем. Світова економіка нині взяла курс на перехід до раціонального поєднання традиційних та альтернативних джерел енергії. Невичерпна теплова енергія Землі посідає серед них одне з перших місць. На всесвітніх геотермальних конгресах (WGC), що починаючи з 1995 р. регулярно проводяться раз на п'ять років, наголошується, що використання тепла Землі стане одним із магістральних напрямів в енергетиці третього тисячоліття. Передбачається, що до кінця XXI ст. частка геотермальних ресурсів в енергобалансі світової економіки зросте більш як на 30 %.

Факторами, що уповільнюють розвиток геотермальної енергетики в Україні, є:

- висока вартість свердловин і низькі транспортбельні якості термальних вод;
- необхідність зворотного закачування відпрацьованих вод і значні витрати на їх підготовку;
- неможливість акумулювання теплової енергії на тривалий період;
- корозійно-агресивні властивості, характерні для термальних вод на великих глибинах;
- одноразовість використання термальних вод в системі теплопостачання і порівняно низька їх температура.

У зв'язку з цим перед геотермальною енергетикою постають такі основні науково-технічні та технологічні проблеми:

- освоєння технологій будівництва високодебітних свердловин з горизонтальними стовбурами в продуктивному горизонті;

- переведення значної кількості недіючих свердловин на вироблених нафтових і газових родовищах на видобуток геотермального флюїду;

- широке освоєння технології геотермальних циркуляційних систем;

- розроблення ефективних методів боротьби з корозією і відкладенням солей;

- розроблення двоконтурних систем геотермального енергопостачання на основі дешевих стійких до корозії теплообмінників і серійний випуск модульного обладнання для будівництва одноконтурних і бінарних ГеоЕС;

- створення ефективних комплексних технологій утилізації геотермальної та супутніх видів енергії і гідромінеральних ресурсів;

- розроблення ефективних технологій утилізації низькопотенційного геотермального тепла.

Реалізація на практиці перелічених завдань дозволить істотно підвищити віддачу наявного геотермального виробництва і вирішити значні енергетичні проблеми, пов'язані із заміщенням традиційних органічних палив та забезпеченням промисловості мінерально-сировинними ресурсами.

Галузі застосування та ефективність використання геотермальних вод залежать від їх енергетичного потенціалу, загального запасу і дебіту свердловин, хімічного складу, мінералізації, агресивності вод, наявності споживача і його віддаленості, а також від деяких інших чинників.

Найефективнішою сферою застосування геотермальних вод є опалення, гаряче і технічне водопостачання об'єктів різного призначення. Максимальний енергетичний ефект досягається створенням спеціальних систем опалення з підвищеним перепадом температур.

Найпростішими і найекономічнішими є системи з безпосередньою подачею води в систему теплопостачання. Для таких систем потрібен геотермальний теплоносіє високої якості, при використанні якого процеси відкладення солей і корозії практично відсутні. Проте ресурси таких вод незначні, а отже, на практиці найчастіше використовують системи з проміжними теплообмінниками або з попередньою водопідготовкою. В умовах реформування житлово-комунального господарства найбільш ефективними є локальні системи теплопостачання на основі передових технологій. Практично в усіх регіонах України є значні запаси низькопотенційних термальних вод, які успішно можна використовувати в системах теплопостачання з тепловими насосами.

Фахівці Інституту технічної теплофізики НАН України мають певний досвід використання термальних вод. Так, у селищах Медведівка і Янтарне (АР Крим) побудовано теплові пункти потужністю 0,7 і 1 МВт, що дозволяють використовувати термальні води для обігріву теплиць та помешкань.

Накопичений в останні десятиліття досвід освоєння теплової енергії земних надр свідчить про те, що гідрогеотермальні ресурси успішно залучають у багатьох країнах світу для виробництва електроенергії і тепла, задовольняючи при цьому різноманітні потреби господарської діяльності людини. Масштаби використання геотермальної енергії постійно зростають, кількість країн, які успішно використовують цю енергію, також збільшується з кожним роком.

Геотермальні ресурси є практично невичерпним, відновлюваним і екологічно чистим джерелом енергії, яке відіграватиме істотну роль в енергетиці майбутнього.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010–2014 Update Report. In: *Proc. World Geothermal Congress 2015*. (19–25 April 2015, Melbourne, Australia). <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01001.pdf>.
2. World Geothermal Congress 2015. Media Portal. <http://www.geothermalpress.com/>.
3. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Geothermal_Essentials.pdf.
4. Povarov O.A., Tomarov G.V. World Geothermal Congress 2005. *Теплоэнергетика*. 2006. (3): 78. [in Russian].
[Поваров О.А., Томаров Г.В. Всемирный геотермальный конгресс WGC-2005. *Теплоэнергетика*. 2006. № 3. С. 78–80].
5. Manushin E.A., Biryukov V.V. Geothermal power plants steam turbine with binary cycle for geothermal fields of Kamchatka. *Science and Education of Bauman MSTU*. 2011. (9). [in Russian].
[Манушин Э.А., Бирюков В.В. Паротурбинная установка геотермальной электростанции бинарного цикла для геотермальных месторождений Камчатского края. *Наука и образование*. 2011. № 9. <http://technomag.edu.ru/doc/220323.html>].
6. Regulatory Document. Geothermal heat and coldness supply of residential and public buildings. [in Russian].
[Геотермальное теплохладоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. Нормы проектирования: ВСН 56-87. Москва, 1989].
7. Geothermal energy in Ukraine. <http://www.alfar.ru/smart/1/925>. [in Russian].
8. Kudria S.O. et al. Atlas of energy potential of renewable energy sources in Ukraine. 2010.
[Кудря С.О. та ін. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. К., 2010].

Стаття надійшла 24.11.2015.

А.А. Долінський, А.Н. Ободович

Институт технической теплофизики НАН Украины (Киев)

МИРОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ
И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ В УКРАИНЕ

Представлены результаты анализа мирового запаса геотермальных вод для производства тепловой и электрической энергии, приведены схемы геотермальных станций. Проанализированы данные по запасам геотермальных вод в различных регионах Украины, выделены перспективные районы. Рассмотрены преимущества и недостатки использования геотермальной энергии в Украине. Определен перечень мероприятий, направленных на развитие геотермальной энергетики в стране.

Ключевые слова: геотермальная энергия, геотермальные электростанции, геотермальные ресурсы, геотермальный теплоноситель, тепловые насосы.

А.А. Dolinskiy, A.N. Obodovich

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

WORLD EXPERIENCE USE OF GEOTHERMAL ENERGY
AND PROSPECTS OF ITS DEVELOPMENT IN UKRAINE

Analysis results of the world's supply of geothermal waters for the production of heat and electricity are presented. The schemes for the production and use of electricity and heat from geothermal water are presented. Data on reserves of geothermal waters in various regions of Ukraine and at various depths is published. Promising areas are highlighted. The advantages and disadvantages of using geothermal energy in Ukraine are analyzed. The list of activities for the development of geothermal energy in the country is defined.

Keywords: geothermal energy, geothermal power, geothermal resources, geothermal heat carrier, heat pumps.