

УДК 621.482:621.577.2

А.А.Барило¹, Ю.П.Морозов², докт.техн.наук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Оцінка енергетичного потенціалу окремих геотермальних родовищ України

На підставі фактичних даних нафтових та газових свердловин, що виявили термальні води, об'ємним способом виконано оцінку енергетичного потенціалу окремих геотермальних родовищ України. Бібл. 6, рис. 6.

Ключові слова: геотермальне родовище, експлуатаційні ресурси, енергетичний потенціал, ємнісні запаси, природний теплоносій.

Orcid: ¹0000-0001-7981-6464; ²0000-0003-1632-9735

Вступ. Незважаючи на те, що перші вимірювання температур земних надр на території колишнього СРСР були зроблені в Україні (шахти Донбасу, 1948 р.), геотермальні ресурси як вид корисних копалин у нашій країні вивчені недостатньо. За роки розвитку нафтогазовидобувної промисловості під час розвідки родовищ вуглеводнів були отримані тисячі замірів температур гірських порід і підземних вод, виявлені прояви термальних вод, складені карти теплових потоків і геотермічних градієнтів території України. Проте пошуково-розвідувальні роботи, які спрямовані на дослідження геотермальних родовищ, оконтурювання їх меж та підрахунок запасів, були виконані тільки на декількох родовищах. Усі попередні дослідження та розрахунки проводилися не для окремих геотермальних родовищ, а для геологічних структур та регіонів у цілому.

Вперше оцінка геотермальних ресурсів території України була виконана в 1979 році Центральною тематичною експедицією Міністерства геології [1], і на теперішній час результати цих розрахунків залишаються офіційно визнаними та затвердженими Державною комісією України по запасах корисних копалин. Виконавцями оцінювались прогнози регіональні запаси термальних вод, тобто гранична їх кількість, яку можливо отримати за допомогою умовних водозаборів, що розташовані рівномірно на всій площі дослідного регіону. Оцінка виконувалась гідродинамічним методом.

Всього по Україні прогнози ресурси термальних вод склали 27326 тис. м³/добу, з них 23 тис. м³/добу – фонтанний спосіб видобування; 137 тис. м³/добу – насосний спосіб видобування; 27166 тис. м³/добу – з підтримкою пластового тиску, тобто зі зворотним закачуванням відпрацьованого природного теплоносія у продуктивний горизонт.

Визначені ресурси дозволяють отримати 456 млн Гкал/рік, з них 0,6 млн Гкал/рік – фонтанний спосіб видобування; 2,14 млн Гкал/рік – насосний спосіб видобування та 453 млн Гкал/рік – з підтримкою пластового тиску. Оцінка виконувалась тільки для Закарпатського та Причорноморського регіонів (півострів Крим і південь Херсонської області) за результатами буріння, яке було здійснене на той час.

В 1991 р. ПГО "Кримгеологія" були проведені роботи щодо визначення перспектив освоєння термальних вод, що розташовані в межах роботи цього геологічного об'єднання [2]. Виконано регіональну оцінку експлуатаційних запасів родовищ термальних вод району робіт, а саме рівнинного Криму, північного і західного Причорномор'я та Керченського півострова. Розрахунки проводилися за методикою, аналогічною з [1], проте були використані нові дані буріння. Сумарні прогнози експлуатаційні запаси склали 34 млн м³/добу або 391 млн Гкал/рік.

Інститут геологічних наук НАНУ спільно з Міністерством екології та природних ресурсів

України в 2001 році випустив Атлас "Геологія і корисні копалини України" (масштаб 1:5000000), в якому є розділ, присвячений геотермальним ресурсам. Згідно оцінки ІГН НАНУ прогнозні ресурси геотермальної енергії території України до глибини 3 км складають $3,3 \cdot 10^{22}$ Дж або $1,12 \cdot 10^{12}$ т у.п., а до глибини 10 км – $6,9 \cdot 10^{22}$ Дж або $2,38 \cdot 10^{12}$ т у.п. відповідно. За геолого-структурними особливостями визначені регіони високої перспективності використання геотермальних ресурсів, до яких належать: Закарпатська западина ($0,32 \cdot 10^{22}$ Дж, $1,11 \cdot 10^{12}$ т у.п.), Передкарпатський прогин ($0,16 \cdot 10^{22}$ Дж, $0,56 \cdot 10^{12}$ т у.п.), Складчастий Донбас ($0,3 \cdot 10^{22}$ Дж, $1,02 \cdot 10^{12}$ т у.п.), Крим ($0,74 \cdot 10^{22}$ Дж, $2,48 \cdot 10^{12}$ т у.п.).

Інститут геофізики НАНУ в 2004 році видав "Геотермічний атлас України", в якому були проведені розрахунки геотермічних ресурсів території до глибини 6 км. В основу розрахунків було покладено середні геотермічні градієнти і теплофізичні властивості порід, які визначені за фактичними даними та характерні для окремих розрахункових ділянок.

Відмітимо, що визначені ІГФ НАНУ ресурси відображують власне петротермальну складову, тоді як ресурси термальних вод (тобто гідротермальна складова) в цю оцінку не входять. Сумарна величина геотермальних ресурсів України в інтервалі глибин 5,5–6 км згідно розрахунків ІГФ НАНУ склала 0,8 трлн т у.п.

Найбільш вивчені та досліджені геотермальні ресурси Закарпатської області. В 2006 році було виконано оцінку експлуатаційних запасів геотермальних вод регіону в цілому та окремих геотермальних родовищ, а саме: Ужгородського, Берегівського, Косинського, Великобактянського, Велятинського, Великопаладського; деякі запаси родовищ були затверджені в ДКЗ України.

Таким чином, попередні автори виконували **регіональну** оцінку енергетичного потенціалу геотермальних ресурсів України для окремих гідрогеологічних структур за узагальненими параметрами. Але для прийняття рішень відносно перспективності використання геотермального родовища потрібна більш детальна проробка ресурсної

бази районів, де виявлені термальні води. Тому ми виконували визначення енергетичного потенціалу геотермальних ресурсів на рівні родовища.

Основні положення методики визначення енергетичного потенціалу гідрогеотермальних родовищ та результати розрахунків. Під енергетичним потенціалом гідрогеотермального родовища розуміється загальна кількість тепла, яку можливо отримати з підземних термальних вод, що містяться в межах родовища та характеризуються визначеними енергетичними (температурними) і якісними (дебіт, пластовий тиск, мінералізація, газовий склад тощо) показниками. Енергетичний потенціал родовища складається з тепла, що міститься у підземній воді, скелеті порід продуктивного горизонту, а також із притоку тепла з суміжних горизонтів і водоносних систем.

Кількість видобутого з геотермального родовища тепла залежить від технологічного способу вилучення природного теплоносія. Як відомо, існує два способи видобування: фонтанний і насосний, а також видобування проводиться з підтримкою пластового тиску (зворотною закачкою відпрацьованого природного теплоносія) або без неї.

При видобуванні гідротермальних ресурсів без зворотного закачування відпрацьованого природного теплоносія загальна кількість термальних вод (експлуатаційні запаси геотермального родовища) пов'язана з основними джерелами формування наступним балансовим співвідношенням [2]:

$$Q = Q_{np.d} + Q_{np.e} + Q_{зал}, \quad (1)$$

де Q – загальна кількість термальних вод, $m^3/добу$; $Q_{np.d}$ – природні динамічні ресурси, тобто величина живлення термального водоносного горизонту за рахунок комплексу природних факторів, а саме: перетікання з суміжних горизонтів, фільтрації з поверхневих водоймищ, притік із глибинних розломів, $m^3/добу$; $Q_{np.e}$ – природні ємнісні запаси, тобто витрати, які можуть бути отримані за рахунок повного спрацювання природних ємнісних запасів за весь час експлуатації, $m^3/добу$.

$$Q_{np.e} = \frac{\beta \cdot H_{cp} \cdot F \cdot h}{\tau}, \quad (2)$$

де β – коефіцієнт пружної ємності продуктивного горизонту, тобто загальної зміни обсягу води в одиниці об'єму пласта при одиничному значенні зміни тиску, $\beta = \rho(n \cdot \beta_e + \beta_{ck})$, де ρ – густина термальної води, кг/м³; n – пористість породи; β_e та β_{ck} – відповідно коефіцієнт об'ємної пружності води і породи, 1/м; H_{cp} – величина середньозваженого напору над покрівлею продуктивного горизонту, м. Для фонтанного способу видобування необхідно використовувати не весь напір, а частину, що перевищує денну поверхню; F – площа розповсюдження продуктивного горизонту, м²; h – товщина продуктивного горизонту, м; τ – термін експлуатації, діб; $Q_{зал.}$ – додаткове живлення продуктивного горизонту, яке формується за рахунок утворення депресійної поверхні, м³/добу.

Тепловий потенціал геотермального родовища, що експлуатується без зворотного закачування відпрацьованих термальних вод, розраховується за наступною залежністю:

$$E = Q \cdot C_{ж} (T_{вх} - T_{вих}), \quad (3)$$

де E – тепловий потенціал геотермального родовища, МВт; Q – загальна кількість термальних вод, м³/добу; $C_{ж}$ – питома теплоємність термальної води, Дж/кг·°C; $T_{вх}$ і $T_{вих}$ – відповідно температура на вході та на виході з геотермальної енергетичної установки, °C.

Для розрахунку складової $Q_{np.d.}$ у балансовому співвідношенні (1) необхідно розглянути гідродинамічну задачу, яку в загальному вигляді для напірного ізольованого необмеженого у просторі пласта можна записати так:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial H}{\partial \tau}. \quad (4)$$

В залежності від фільтраційних особливостей певного родовища для розрахунку можуть бути використані наступні граничні умови:

$$\begin{aligned} \text{першого роду: } & H_r = f(\tau); \quad H_r = \text{const}; \\ \text{другого роду: } & q_r = f(\tau); \quad q_r = \text{const}; \\ \text{третього роду: } & q_r = f(H_{в.г.} - H_r), \end{aligned} \quad (5)$$

де a – коефіцієнт п'єзопровідності продуктивного горизонту, м²/добу; $H_{в.г.}$ і H_r – напір на внутрішній і зовнішній границях, м.

На більшості геотермальних родовищ України існує необхідність зворотного закачування відпрацьованого природного теплоносія, оскільки термальні води мають високу мінералізацію і не можуть скидатися у поверхневі водоймища. Крім цього, закачування відпрацьованого природного теплоносія підвищує пластовий тиск продуктивного горизонту і, як наслідок, експлуатаційні запаси геотермального родовища.

В умовах експлуатації геотермального родовища зі зворотним закачуванням відпрацьованого природного теплоносія балансове співвідношення (1) набуває вигляду:

$$Q_{зв} = Q_{np.d} + Q_{np.e} + Q_{зал} + Q_{шт.д} + Q_{шт.е}, \quad (6)$$

де $Q_{шт.д}$ – штучні динамічні ресурси, тобто величина живлення термоводоносного горизонту за рахунок зворотного закачування відпрацьованого природного теплоносія, м³/добу; $Q_{np.e}$ – штучні ємнісні запаси, тобто об'єм термальних вод, що може бути отриманий за рахунок повного спрацювання штучних ємнісних запасів за весь час експлуатації, м³/добу.

Тепловий потенціал геотермального родовища, що експлуатується зі зворотним закачуванням відпрацьованих термальних вод, розраховується за наступною залежністю:

$$\begin{aligned} E_{зв} = & Q_{зв} \cdot n \cdot C_{ж} (T_{вх} - T_{вих}) + \\ & + (1 - n) \cdot C_{ж} (T_{вх} - T_{вих}) + E_1 + E_2, \end{aligned} \quad (7)$$

де E_1 і E_2 – відповідно притік тепла з непроникних горизонтів, що розташовані вище та нижче продуктивного горизонту.

Оскільки у продуктивний горизонт закачується охолоджена відпрацьована вода, то важливу роль в цих умовах набуває притік тепла з оточуючого середовища. Тоді разом з гідродинамічною задачею необхідно вирішувати і теплову задачу [6]:

$$nC_{жс} \frac{\partial t_{жс}}{\partial \tau} = n \operatorname{div}(\lambda_n \overrightarrow{\operatorname{grad} t_{жс}}) - \quad (8)$$

$$-nC_{жс} \overrightarrow{\operatorname{grad} t_{жс}} + \alpha_v (t_{ск} - t_{жс}),$$

$$(1-n)C_{ск} \frac{\partial t_{ск}}{\partial \tau} = (1-n) \operatorname{div}(\lambda_n \overrightarrow{\operatorname{grad} t_{жс}}) +$$

$$+\alpha_v (t_{ск} - t_{жс}),$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності продуктивного горизонту; α_v – коефіцієнт тепловіддачі оточуючого середовища.

Загальна кількість термальних вод геотермального родовища визначалась за формулою (1). Необхідні для розрахунку гідродинамічні параметри термоводоносного горизонту приймалися рівними фактичним даним, які були отримані під час випробувань нафтових і газових свердловин. Коефіцієнт пружної ємності визначався за табличними даними для продуктивного горизонту [2]. Додаткові складові $Q_{пр.д}$ і $Q_{зал.}$ на даний час врахувати неможливо, тому що відсутні необхідні для цього відомості. Однак ці складові можуть бути враховані на наступних етапах досліджень. Відзначимо, що прийняті допущення занижують

фактичний потенціал родовища і дають додатковий запас надійності та достовірності прогнозів.

Тепловий потенціал визначався за формулою (3). Температура на виході з геотермальної енергетичної установки приймала тепловий потік, який залежить від товщини продуктивного горизонту, теплофізичних властивостей гірського масиву, що оточує продуктивний пласт, та терміну експлуатації (в наших розрахунках не враховувався).

Електроенергетичний потенціал геотермальних родовищ визначався окремо від теплового потенціалу з урахуванням ефективного ККД енергетичної установки бінарного циклу, який у залежності від параметрів природного теплоносія змінювався від 0,1 до 0,15.

Для розрахунку енергетичного потенціалу геотермальних родовищ України було зібрано фактичні дані щодо понад 400 газових, газоконденсатних і частково нафтових свердловин, які охоплюють 102 родовища [3–5]. На рис. 1 і рис. 2 наведено розподіл свердловин, що досліджувались, в залежності від глибини продуктивного горизонту та пластової температури. Як бачимо, більшість термоводоносних горизонтів залягають на глибинах від 1000 до 3000 м; переважають пластові температури у діапазоні від 50 до 80°C.

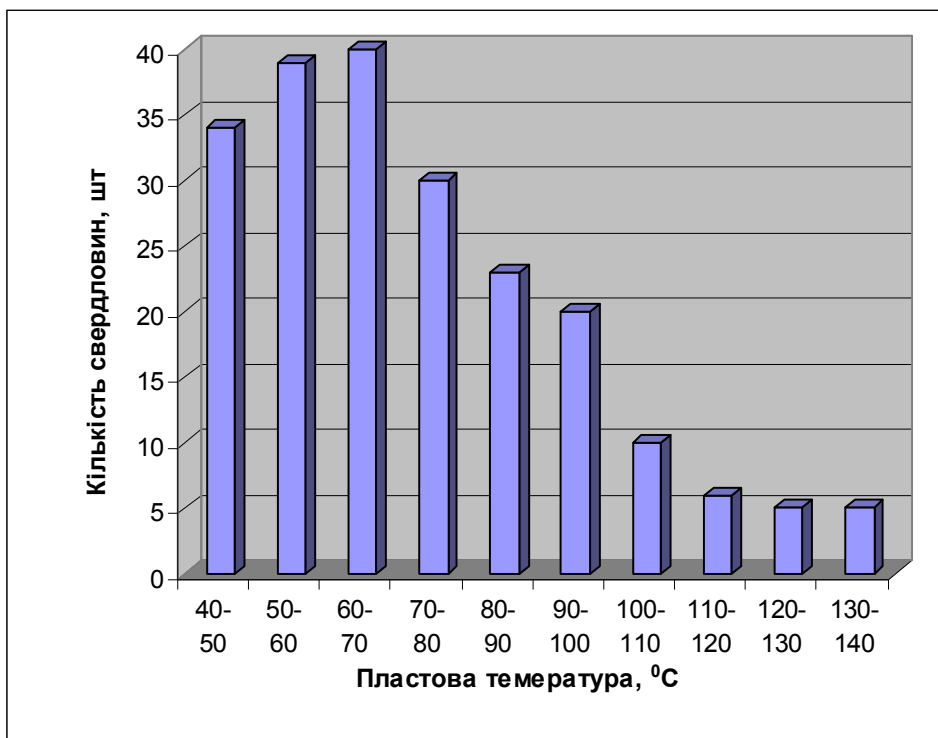


Рис. 1. Розподіл пластових температур у геотермальних свердловинах.

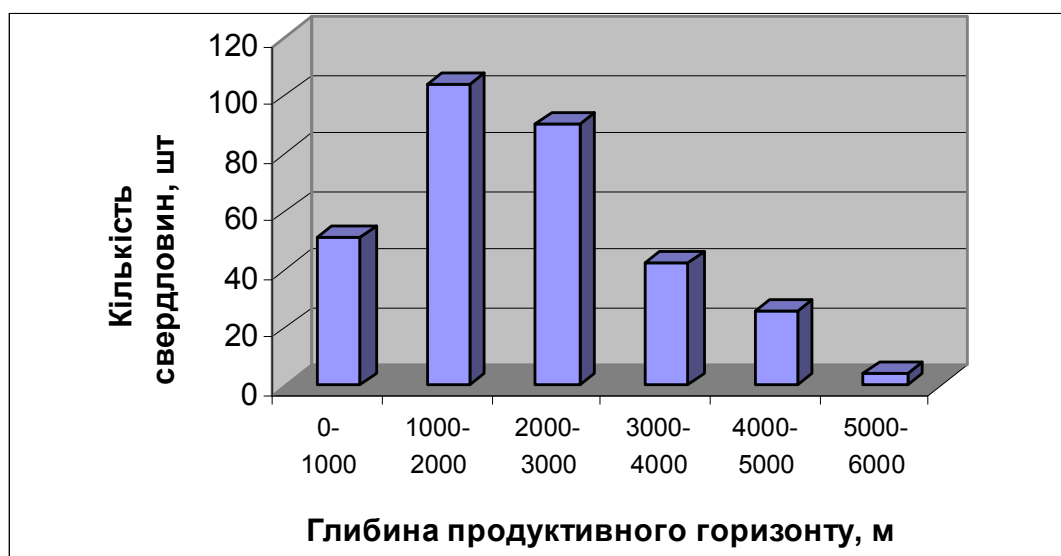


Рис. 2. Розподіл глибин продуктивних горизонтів у геотермальних свердловинах.

Фактичні дані охоплюють родовища нерівномірно – деякі родовища представлені десятками свердловин, а інші поодинокими даними. Розглядалися тільки ті родовища, температура природного теплоносія яких перевищувала 50°C. Вихідні дані були проаналізовані та узагальнені, а по кожному родовищу були визначені середні показники.

Оскільки в даний час на території України геотермальні родовища не оконтурені (крім деяких родовищ у Закарпатській області), у своїх розрахунках границі геотермальних родовищ приймалися рівними границям газових і нафтових родовищ. Це не зовсім вірно, оскільки площа поширення термоводонесних горизонтів значно перевищує площу газових і нафтових родовищ, тобто прийняте нами припущення занижує реальний потенціал геотермального родовища. Площі родовищ визначалися за базою даних ДНВП "Геоінформ України" станом на 01.07.15 р. Розрахунками охоплено 47% від загальної кількості газових та газоконденсатних родовищ.

На основі аналізу температурних параметрів природного теплоносія та фільтраційних властивостей геотермальних свердловин було відібрано 51 родовище, експлуатаційні характеристики яких дозволяють генерувати електричну енергію з термальних вод. Температура природного теплоносія цих свердловин перевищує 80°C. Діапазон температур природного теплоносія дозволяє використовувати для генерації електричної енергії енергетичні установки бінарного циклу.

Розташування ГеоТЕС на базі гідрогеотермальних родовищ наведено на рис. 3. Номер на карті відповідає номеру геотермального родовища у базі даних. Сім геотермальних родовищ мають температуру природного теплоносія понад 120°C і є найбільш перспективними для створення ГеоТЕС.

Для зручності карти складено для трьох регіонів: східного, західного і південного (рис. 4, 5, 6). Найменш вивченим є південний регіон. Найбільша кількість геотермальних родовищ, на яких можливе виробництво електричної енергії, розташована у східній нафтогазовій провінції.

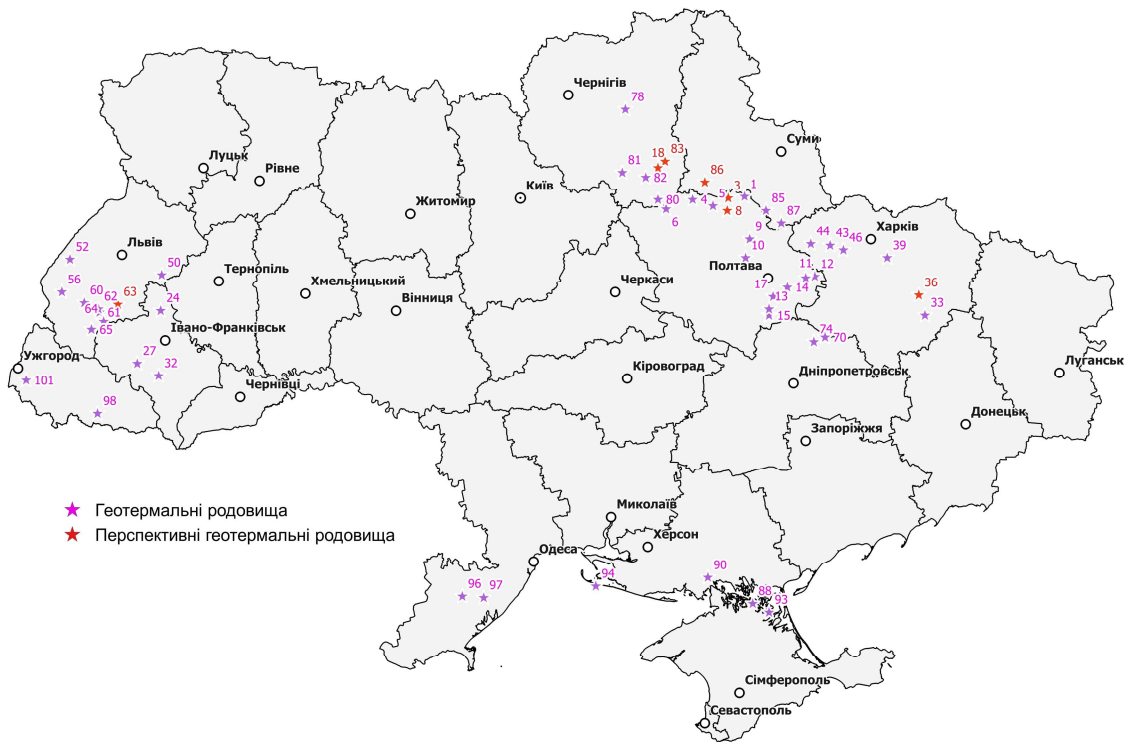


Рис. 3. Гідрогеотермальні родовища, придатні для генерації електричної енергії.

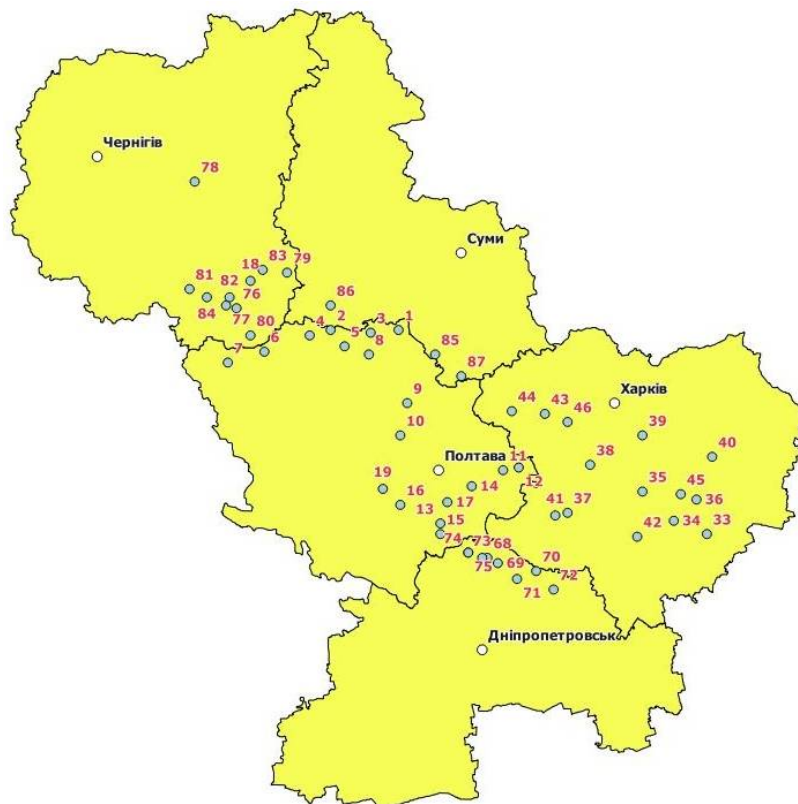


Рис. 4. Результати досліджень та обробки даних щодо визначення енергетичного потенціалу геотермальних ресурсів у Східному регіоні.

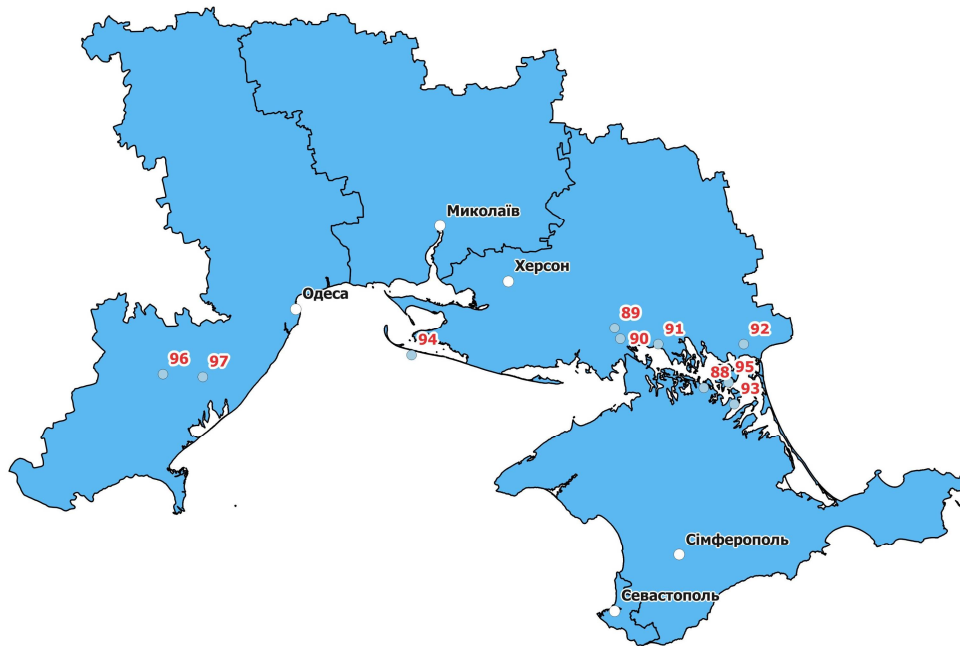


Рис. 5. Результати досліджень та обробки даних щодо визначення енергетичного потенціалу геотермальних ресурсів у Південному регіоні.

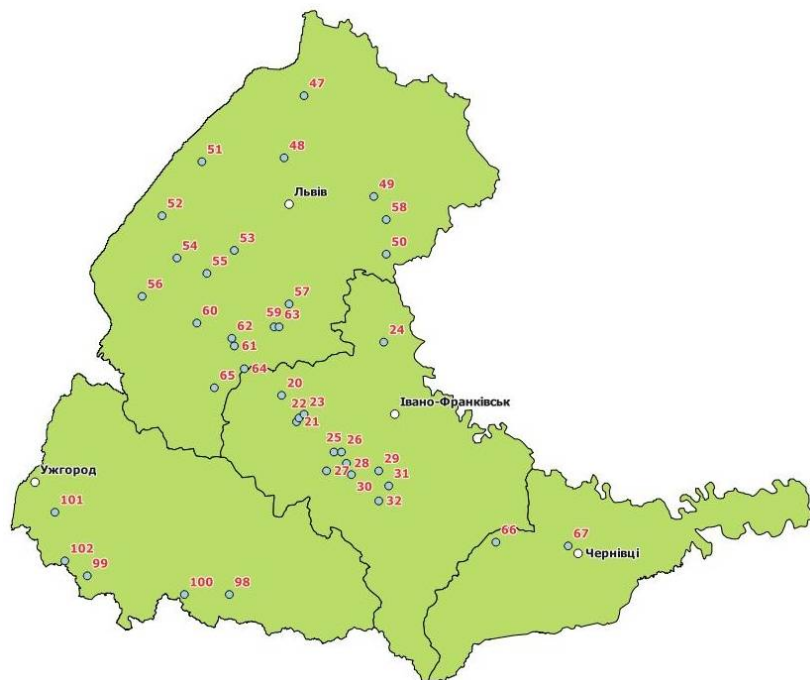


Рис. 6. Результати досліджень та обробки даних щодо визначення енергетичного потенціалу геотермальних ресурсів у Західному регіоні.

Розрахунки показують, що тепловий потенціал геотермальних родовищ, які були досліджені на підставі фактичних даних буріння, складає 9,4 млрд Гкал, або 67,7 млн т у.п. на рік. Сумарна потенційна потужність ГеоТЕС, які можна створити на базі досліджених гідротермальних родовищ, складає 2080 МВт.

Висновки. 1. Усі попередні автори виконували регіональну оцінку енергетичного потенціалу геотермальних ресурсів для великих гідрогеологічних структур I-го порядку. Прийняття рішень відносно перспективності використання геотермального родовища потребує більш детальної обробки ресурсної бази районів, де виявлені те-

рмальні води. Тому ми виконували визначення енергетичного потенціалу на рівні родовища.

2. Для розрахунку енергетичного потенціалу геотермальних родовищ України було зібрано фактичні дані щодо понад 400 газових, газоконденсатних і частково нафтових свердловин. Ці свердловини розташовані в межах 102 родовищ, що складає 47% від загальної кількості родовищ вуглеводнів України.

3. Складено карти гідротермальних ресурсів окремих регіонів України. Загальний тепловий потенціал дослідженої частини геотермальних ресурсів України складає $0,9 \cdot 10^{10}$ Гкал або 60 млн т у.п. на рік.

4. Найбільш сприятливі умови для створення систем геотермального енергопостачання має Закарпатський прогин, зовнішня зона Прикарпатського прогину та узбережжя Чорного моря.

5. Сумарна потенційна потужність ГеоТЕС, які можна створити на базі досліджених гідротермальних родовищ, складає 2080 МВт.

1. *Соболевский Э.Э.* Оценка запасов термальных вод УССР. Звіт центральної комплексної тематичної експедиції, кн. 1-3, 1979.

2. *Боревский Б.В., Дробноход М.И.* Оцінка запасів підземних вод / Вища школа. – Київ, 1989.

3. *Иваниута М.М.* Атлас нафтових і газових родовищ України (в 6 т.) / Вид-во "Центр Європи", Львів, 1998.

4. *Калашникова Т.А., Шабатина Р.А.* Обобщение по термальным водам Украинской ССР за 1978-1879 гг., отчет ЦТЭ МИНГЕО УССР, Киев, 1979, 1-3 том.

5. *Жарникова Р.С.* Оценка прогнозных ресурсов термальных вод Закарпатской области за 1998-2007 годы, отчет Закарпатской ГРЭ ДП "Західукргеологія", Берегово, 2008, 1, 2 том.

6. *Морозов Ю.П.* Классификация математических моделей нестационарного теплообмена при движении жидкости в подземных проницаемых слоях // Відновлювана енергетика. – 2006. – № 1. – С. 77–83.

REFERENCES

1. *Sobolevsky E.E.* Assessment of the thermal waters resources in Ukrainian SSR. Report of the central thematic complex expedition / b. 1-3, 1979.

2. *Borevsky B.V., Drobnokhod M.I.* Assessment of groundwater / High School. – Kyiv, 1989.

3. *Ivaniuta S.M.* Atlas oil and gas fields in Ukraine (6 vol.) / Center of Europe. – Lviv, 1998.

4. *Kalashnikova T.A., Shabatina R.A.* Generalization on the thermal waters of the Ukrainian SSR for 1978-1879 years, the report CTE MINGEO Ukrainian SSR, Kiev, 1979, p. 1–3;

5. *Zharnikova R.S.* Evaluation of prognostic resources of thermal waters of the Transcarpathian region for the years 1998-2007/ the report of the Transcarpathian GRE DP "Westgeology" Beregovo, 2008, vol. 1–2.

6. *Morozov Y.P.* Classification of mathematical models for unsteady heat transfer fluid flow in underground permeable layers // Vidnovliuvana Enerhetyka. – 2006. – № 1. – p. 77–83.

А.А.Барило, Ю.П.Морозов, докт.техн.наук (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Оценка энергетического потенциала отдельных геотермальных месторождений Украины

На основании фактических данных нефтяных и газовых скважин, выявивших термальные воды, объемным способом выполнена оценка энергетического потенциала отдельных геотермальных месторождений Украины. Библ. 6, рис. 6.

Ключевые слова: геотермальное месторождение, эксплуатационные ресурсы, энергетический потенциал, емкостные запасы, природный теплоноситель.

Barylo A.A., Morozov Yu. (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv)

Evaluation of the energy potential of the individual geothermal deposits in Ukraine

The energy potential estimation of certain geothermal deposits in Ukraine based on the factual data of oil and gas wells was carried out. The assessment was performed by a volumetric method. References 6, figures 6.

Keywords: geothermal field, operational resources, energy potential, capacitive reserves, natural heat transfer fluid.

SYNOPSIS

Previous authors have carried out a regional assessment of geothermal resources of Ukraine for the large hydrogeological structures. Selection of promising facilities using geothermal resources requires a more detailed assessment. Here the determination of the energy potential by the field level has performed. The energy potential estimation of certain geothermal deposits in Ukraine based on the factual data of oil and gas wells was carried out. The assessment was performed by a volumetric method. The heat capacity is 60 million tons of nominal fuel per year. The total potential of geothermal power stations that can be created on the basis of the studied hydrothermal deposits is 2,082 MW.

Стаття надійшла до редакції 26.11.17

Остаточна версія 06.02.17