

в'язаних систем як на ранніх, так і на пізніх етапах тверднення, що обумовлює можливість їхнього застосування для отримання бетонів загальнобудівельного та спеціального призначення.

1. Dhir, R.K. and McCarthy, M.I. *Optimizing Binders for Concrete Construction* // *World Cement*. – 1997. – № 1. – Vol.28. – England. – P. 74–81. 2. Malhotra V.M. *Correct G.G. and Langley W.S. Structural concrete imparting High Volume of ASTM class F fly ash* // *ACI Material Journal*, Title № 88–448. – September-October. – 1989. – P. 507–513. 3. Marsh B. *High volume fly ash concrete*. – *Concrete Magazine*. – Vol. 37, № 4. – April, 2003. – P. 54–55. 4. Sear L K A *Should you be using more PFA*. – *Cement Combinations for Durable Concrete / Proceeding of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5-7 July 2005*. – P. 691–700. 5. *EN-450 Fly Ash for Concrete. Conformity evaluation*.

УДК 620.92:621.43.018+658.264

А.О. Редько, В.С. Бугай

Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури,
кафедра теплогазопостачання, вентиляції та
використання теплових вторинних енергоресурсів

ТЕРМО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

© Редько А.О., Бугай В.С., 2009

Представлено результати дослідження термодинамічних та економічних показників геотермальної циркуляційної системи теплопостачання з метою прогнозування найоптимальнішої та найефективнішої її роботи.

In this article results of research of thermodynamic and economic indicators of geothermal circulating system of a heat supply for the purpose of forecasting of the optimal and their effective work are presented.

Постановка проблеми. Сьогодні актуальними завданнями енергетичної галузі є пошук та освоєння нових нетрадиційних джерел енергії, і насамперед теплоти ресурсів надр у вигляді геотермальної води. Широке застосування геотермальних систем теплопостачання залежить від вирішення складних науково-технічних і економічних проблем. Вибір оптимальних параметрів геотермальної циркуляційної системи (ГЦС) теплопостачання виконується в результаті термодинамічного і економічного аналізу, оптимізації підземного та надземного комплексів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Результати досліджень [1–3] показують, що питомі капіталовкладення, трудомісткість та металомісткість під час видобування та використання теплоти гірських порід для потреб теплопостачання у 1,5–2,5 раза нижчі, ніж під час виробництва теплоти за рахунок спалювання органічного палива, і у 3–5 разів нижчі від витрат під час використання сонячної енергії в геліоустановках. Однак під час експлуатації ГЦС теплопостачання для видобувних свердловин характерний перехід від екстенсивного фонтануючого режиму роботи до інтенсивного циркуляційного із застосуванням потужних насосів, газліфтного способу, що відображається на збільшенні експлуатаційних витрат (зростають витрати на електроенергію).

Мета досліджень. Мета роботи – розробити методику розрахунку термодинамічних та економічних показників геотермальної циркуляційної системи теплопостачання.

Термодинамічні показники. До складу ГЦС тепlopостачання з метою забезпечення її надійності та споживачів якісним теплоносієм може входити устаткування, що працює на електричній енергії, тепловій енергії органічного палива, використовує вторинну теплоту (мережні насоси, котли-догрівачі, теплові насоси, газові двигуни, теплообмінники рекуперативного типу). Тому для оцінки енергетичної ефективності використання енергії геотермальних вод доцільно скористатися ексергетичним коефіцієнтом корисної дії (ККД), що дає можливість виконати термодинамічний аналіз системи з врахуванням роботи різних видів енергій, що задіяні в ГЦС.

Ексергетичний ККД для будь-якої системи становить [4]:

$$\eta_e = \frac{\sum E''}{\sum E'} \quad (1)$$

де $\sum E'$, $\sum E''$ – ексергії вхідних та вихідних потоків рідини та енергії.

Для ГЦС тепlopостачання, що містить в собі експлуатаційну та нагнітальну свердловини, рекуперативні теплообмінники, насос для закачування геотермальної води в пласт та створення тиску нагнітання у циркуляційному контурі і працює без пікових догрівачів для потреб низькотемпературної системи опалення та гарячого водopостачання за формулами, наведеними у [5]:

$$\sum E'' = E_{кор} = Q_o \left\{ \tau_1 \left[\varphi \theta + \xi \left(1 - T_0 \frac{s_1 - s_0}{i_2 - i_0} \right) \right] + 0,66 \xi (8500 - \tau_1) \left(1 - T'_0 \frac{s_1 - s'_0}{i_2 - i'_0} \right) \right\}; \quad (2)$$

$$\sum E' = E_{nl} + E_H^3 + E_H^l, \quad (3)$$

де E_{nl} – ексергія пластової геотермальної води, кДж, що визначається за формулою

$$E_{nl} = m_o [i_{nl} - i_0 - T_0 (s_{nl} - s_0)] \tau_1 \varphi + m'_{z.g} [i_{nl} - i_0 - T_0 (s_{nl} - s_0)] \tau_1 + m''_{z.g} [i_{nl} - i'_0 - T'_0 (s_{nl} - s'_0)] (8500 - \tau_1); \quad (4)$$

E_H^l – ексергія насоса за опалювальний період, кДж:

$$E_H^l = \frac{\Delta P' (m_o + m'_{z.g}) \tau_1}{1000 \cdot \rho_H \cdot \eta_H}; \quad (5)$$

E_H^3 – ексергія насоса за літній період, кДж:

$$E_H^3 = \frac{\Delta P'' m''_{z.g} (8500 - \tau_1)}{1000 \cdot \rho_H \cdot \eta_H}. \quad (6)$$

У (2)–(6) Q_o – розрахункове теплове навантаження на систему опалення, кДж/год; τ_1 – тривалість опалювального періоду, год; φ – середньоопалювальний коефіцієнт відпуску теплоти; θ – ексергетична температурна функція для температури опалювального приміщення; ξ – відношення теплового навантаження гарячого водopостачання до теплового навантаження на систему опалення; T_0, T'_0 – температура води в мережі водopроводу відповідно у зимовий та літній періоди, К; s_1 – ентропія води, що надходить до системи гарячого водopостачання, кДж/(кг·К); i_2 – ентальпія теплоносія, що надходить до опалювальних приладів, кДж/кг; s_0, i_0, s'_0, i'_0 – ентропія, кДж/(кг·К) та ентальпія, кДж/кг за температури води в мережі водopроводу відповідно взимку та влітку; s_{nl}, i_{nl} – ентропія, кДж/(кг·К) та ентальпія, кДж/кг пластової геотермальної води; m_o – витрата геотермальної води на опалення, кг/год; $m'_{z.g}, m''_{z.g}$ – витрата геотермальної води на гаряче водopостачання взимку та влітку, кг/год; ρ_H – густина геотермальної води в нагнітальній свердловині, кг/м³; η_H – коефіцієнт корисної дії насоса; $\Delta P', \Delta P''$ – втрати тиску в ГЦС відповідно в опалювальний та літній періоди, Па,

що складаються з втрат тиску в експлуатаційній та нагнітальній свердловинах, надземному комплексі системи тепlopостачання та з фільтраційних втрат тиску у пласті:

$$\Delta P'_H = \frac{8(m_o + m'_{z.g})^2}{\pi^2} \left[\frac{\lambda}{d_H^5 \cdot \rho_H} + \frac{\lambda}{d_e \cdot \rho_e} (H + R) \right] + \frac{(m_o + m'_{z.g})\mu}{2\pi k h \rho_H} \ln \frac{4R^2}{d_H d_e} + (\rho_e - \rho_H)gH; \quad (7)$$

$$\Delta P''_H = \frac{8m''_{z.g}{}^2}{\pi^2} \left[\frac{\lambda}{d_H^5 \cdot \rho_H} + \frac{\lambda}{d_e \cdot \rho_e} (H + R) \right] + \frac{m''_{z.g}\mu}{2\pi k h \rho_H} \ln \frac{4R^2}{d_H d_e} + (\rho_e - \rho_H)gH, \quad (8)$$

де d_e, d_H – діаметри експлуатаційної та нагнітальної свердловин, м; λ – коефіцієнт гідравлічних втрат тиску на тертя; H – глибина свердловин, м; ρ_e – густина геотермальної води в експлуатаційній свердловині, кг/м³; R – відстань між нагнітальною та експлуатаційною свердловинами, м; h – товщина ефективного пласту, м; k – проникність пласту, Дарсі; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості геотермальної води, Па·с.

Основні результати. Розрахунки були виконані для таких вихідних даних:

- навантаження на систему опалення $Q_o = 3585$ кВт = 12906000 кДж/год;
- навантаження на систему гарячого водopостачання взимку $Q'_{z.g} = 1000$ кВт = 3600000 кДж/год;
- навантаження на систему гарячого водopостачання влітку $Q''_{z.g} = 800$ кВт = 2880000 кДж/год;
- кліматичні параметри та тривалість опалювального періоду, взяті для м. Джанкой;
- тривалість опалювального періоду τ_1 – 3840 год;
- температура пластової води 64 °С;
- параметри теплоносія в низькотемпературній системі опалення 50–30 °С;
- максимальна температура охолодження геотермальної води прийнята 25 °С;
- температура води в системі гарячого водopостачання 55 °С;
- глибина експлуатаційної та нагнітальної свердловин $H = 1850$ м;
- кількість експлуатаційних свердловин – одна;
- відстань між експлуатаційною та нагнітальною свердловинами $R = 2500$ м;
- динамічна в'язкість геотермальної води $\mu = 0,001$ Па·с;
- проникність пласту $k = 0,02$ Дарсі;
- товщина ефективного пласту $h = 34$ м;
- діаметр нагнітальної свердловини приймається таким, що дорівнює діаметру експлуатаційної (у разі однієї експлуатаційної свердловини).

Для заданого розрахункового теплового навантаження на опалення та гаряче водopостачання виконано розрахунок ексергетичного ККД залежно від діаметра експлуатаційної та нагнітальної свердловин. Отримано графічну залежність (рис. 1).

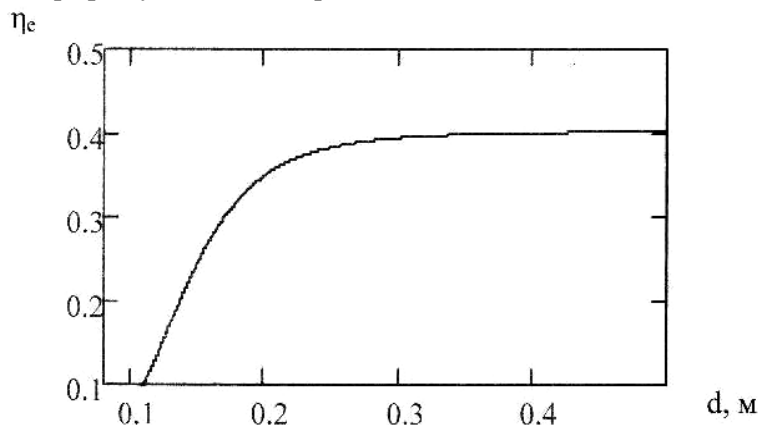


Рис. 1. Залежність ексергетичного ККД від діаметра експлуатаційної та нагнітальної свердловин за заданого теплового потоку на опалення та гаряче водopостачання

З рис. 1 бачимо, що із збільшенням діаметра від 250 мм відбувається невелике зростання ексергетичного ККД. Це пов'язано зі зменшенням втрат тиску у ГЦС, що, своєю чергою, зменшує ексергію насоса та відповідно експлуатаційні витрати на електроенергію. З іншого боку, збільшення діаметра свердловин відображається на збільшенні капіталовкладень та собівартості виробленої теплової енергії. Тому важливо оптимізувати технічне рішення стосовно діаметра свердловин, за якого ексергетичний ККД буде якомога максимальним, але за мінімальних капіталовкладень на будівництво свердловин і теплових мереж та витрат на електроенергію.

Проаналізуємо втрати тиску в ГЦС, що визначають ексергію насоса (істотна складова під час визначення ексергетичного ККД) та витрати на електроенергію залежно від діаметра свердловин та витрати геотермального теплоносія. Розрахунки виконані для цього прикладу за витрат геотермального теплоносія від 20 до 100 кг/с та в діапазоні діаметрів свердловин від $Du=80$ мм до $Du=600$ мм. Отримано графічні залежності (рис. 2).

Для певної витрати геотермального теплоносія оптимальний діаметр свердловини знаходиться в діапазоні діаметрів, де крива втрат тиску змінює свій ухил. Зменшення діаметра на типорозмір від вказаного діапазону може призвести до значного росту втрат тиску і відповідно затрат на електроенергію, збільшення діаметра – до зростання капіталовкладень. Отже, задача визначення діаметра свердловин ГЦС потребує, окрім технічного обґрунтування, економічної оцінки.

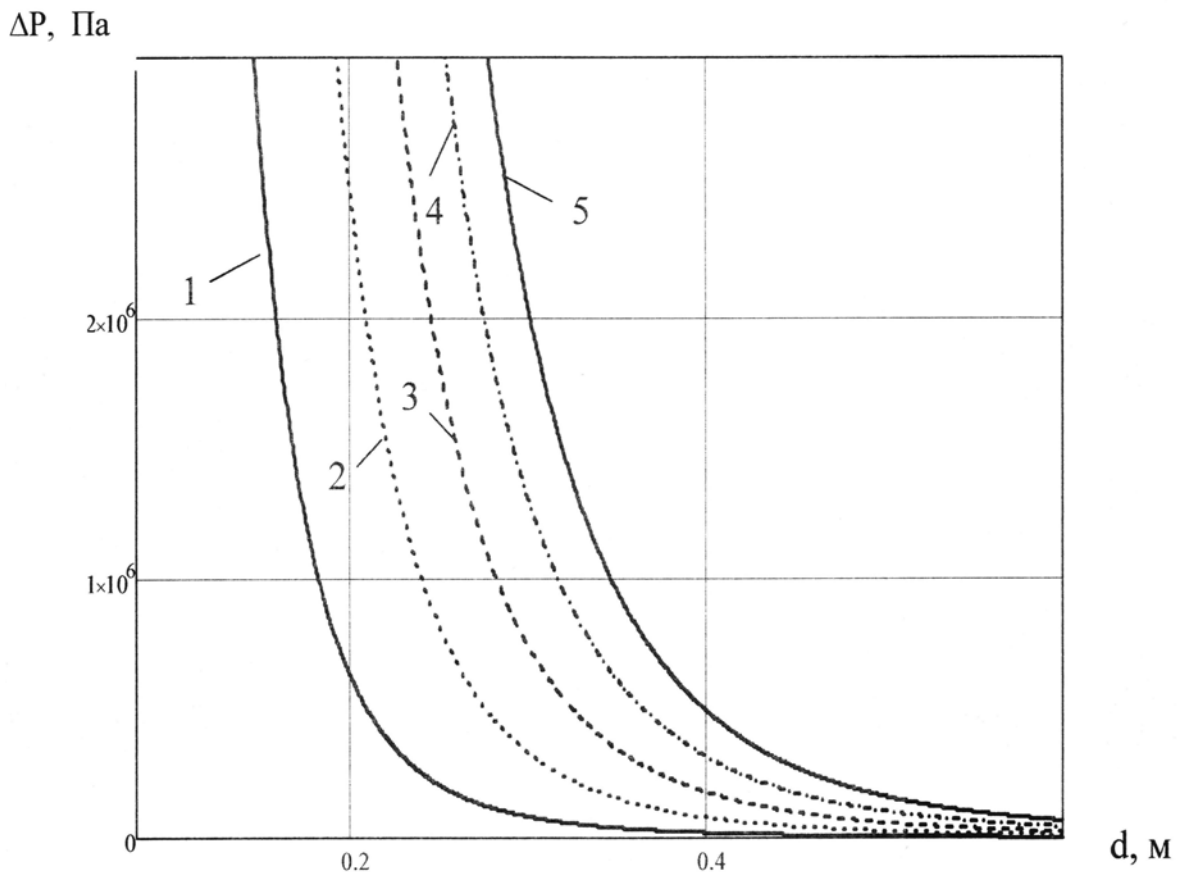


Рис. 2. Залежність втрат тиску в ГЦС від діаметра свердловин та витрат геотермального теплоносія: 1 – 20 кг/с; 2 – 40 кг/с; 3 – 60 кг/с; 4 – 80 кг/с; 5 – 100 кг/с

Економічні показники. Економічна оцінка доцільності використання теплової енергії геотермальних вод проводилася за показником дисконтованого грошового потоку, що відповідає сучасним підходам щодо оцінки економічної ефективності інвестиційних проектів [6].

Вихідні дані для проведення розрахунків наведено в таблиці.

Вихідні дані для проведення розрахунків

Показники	Значення
Кількість теплової енергії, Гкал/рік	12 018,2
Курс євро за даними НБУ на дату проведення розрахунків	9,96534
Курс долара за даними НБУ на дату проведення розрахунків	7,7
Норма дисконту, %	12

Для розрахунку грошового потоку за інвестиційним проектом були розраховані такі показники:

- 1) дохідна частина проекту, що складається з валового доходу від реалізації теплової енергії;
- 2) витратна частина проекту складається з таких показників:

а) податок на додану вартість, розрахований згідно з законом України „Про податок на додану вартість ” (із змінами і доповненнями на дату проведення розрахунків) [3];

б) капітальні вкладення, необхідні для реалізації проекту; вартість капіталовкладень (будівництво свердловин, тепломереж, ліній електропередач, насос, теплообмінники, сепаратор, арматура, фільтри тощо) становлять 8 238,2 тис. грн.;

в) експлуатаційні витрати за статтями:

– витрати на оплату праці, розраховані, враховуючи кількість обслуговуючого персоналу (4 особи), середньорічні витрати на оплату праці на рівні 2 300 грн./місяць;

– відрахування на соціальні заходи за нормативом 37,13 % від фонду оплати праці (відрахування на соціальне страхування від нещасного випадку прийнято за класом 18);

– витрати на електроенергію розраховані, враховуючи паспортну потужність електродвигуна циркуляційного насоса (45 кВт), його цілодобової експлуатації, коефіцієнта експлуатації свердловин на рівні 0,85 та вартості електроенергії на рівні 0,702 грн./кВт (клас 2);

– плата за користування надрами розрахована за нормативом 0,1 грн./м³ (грн./т) згідно з “Інструкцією про порядок обчислення і справляння плати за користування надрами для видобування корисних копалин ” [7] із застосуванням коригуючого коефіцієнта 1,439, запровадженого Додатком №1 до розділу II до закону України “Про внесення змін до деяких законодавчих актів України” [8];

– витрати на поточне обслуговування і планові ремонти (витрати мастила на заміну, а також вартість витратних матеріалів) прийняті на рівні 28,8 тис. грн./рік;

– вартість капітальних ремонтів з періодичністю раз на 5 років прийняті на рівні 350 тис. грн./ремонт;

– амортизація основних засобів за групами розрахована згідно з законом України “Про оподаткування прибутку підприємств ” [9].

Балансовий прибуток (Π_6) по роках, розрахований за формулою

$$\Pi_6 = D_B - ПДВ - E, \quad (9)$$

де D_B – валові доходи від реалізації теплової енергії по роках, тис. грн.; ПДВ – податок на додану вартість за відповідний період, тис. грн.; E – експлуатаційні витрати за відповідний період, тис. грн.

Податок на прибуток (Π_n) розрахований за нормативом 25 % згідно з законом України “Про оподаткування прибутку підприємств” [9] станом на дату проведення розрахунків.

Чистий прибуток (Π_n) розрахований за формулою

$$\Pi_n = \Pi_6 - \Pi_n, \quad (10)$$

де Π_6 – балансовий прибуток по роках, тис. грн.; Π_n – податок на прибуток за відповідний період, тис. грн.

Вільний грошовий (ГП) потік враховує відсутність фактичної передачі грошових коштів під час нарахування амортизації, розмір фактичних капітальних вкладень розраховується за формулою

$$ГП = ЧП + А - К, \quad (11)$$

де А – амортизаційні нарахування по роках, тис. грн.; К – розмір капітальних вкладень за відповідний період, тис. грн.

Коефіцієнт дисконтування (K_D) відображає зменшення цінності доходів і витрат майбутніх періодів порівняно з датою проведення розрахунків і розраховується за формулою

$$K_D = \frac{1}{(1+e)^t}, \quad (12)$$

де e – норма дисконту, прийнята на рівні 12 % на рік відповідно облікової ставки НБУ на дату проведення розрахунків.

Дисконтований вільний грошовий потік (ДГП) відображає розмір грошового потоку по роках, приведенного до дати проведення розрахунків і розраховується за формулою

$$ДГП = ГП \cdot K_D. \quad (13)$$

Значення дисконтованого вільного грошового потоку наростаючим підсумком дає змогу визначити рік окупності капітальних вкладень і відображається показником накопиченого дисконтованого вільного грошового потоку.

Основні результати. Згідно з проведеними розрахунками побудовані графіки чистого прибутку та накопиченого дисконтованого вільного грошового потоку за роки реалізації проекту (рис. 3, 4) та встановлено економічну ефективність використання теплової енергії геотермальних вод за вищенаведених умов. Накопичений дисконтований вільний грошовий потік від реалізації проекту за розглянутий період має додатне значення на рівні 4 770,5 тис. грн., окупність капітальних вкладень спостерігається на дев'ятому році від початку здійснення капітальних вкладень (або на восьмому році експлуатації свердловин), що є прийнятним періодом.

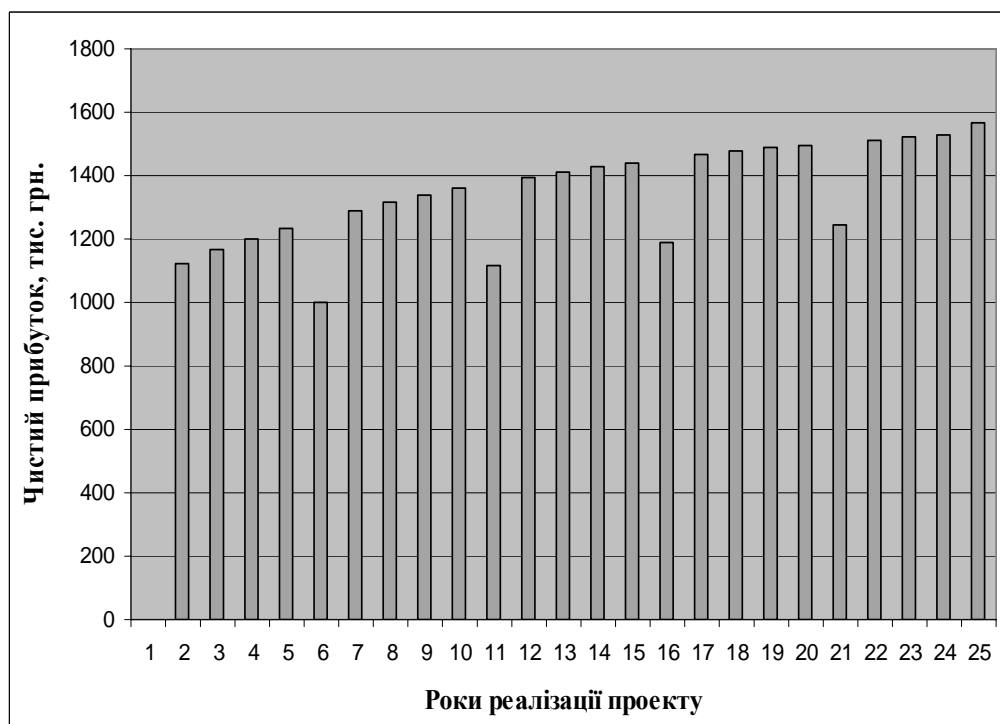


Рис. 3. Чистий прибуток від використання теплової енергії геотермальних вод за роки реалізації проекту

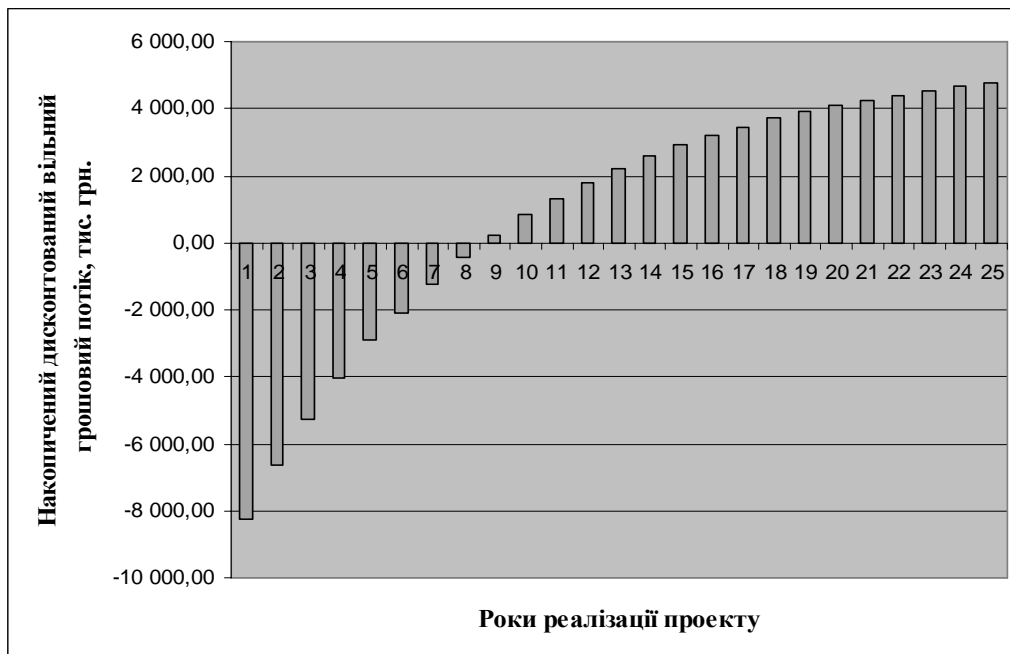


Рис. 4. Накопичений дисконтований вільний грошовий потік від використання теплової енергії геотермальних вод за роки реалізації проекту

Висновки. Отже, для оцінки доцільності використання геотермальних вод у системах теплопостачання необхідно виконати розрахунки термодинамічних показників ГЦС теплопостачання, що дає можливість повною мірою оцінити енергетичну ефективність системи, порівняти її з іншими видами систем. Крім того, енергетична ефективність системи повинна бути підтверджена економічною ефективністю, що визначається мінімальним терміном окупності капіталовкладень в систему та величиною накопиченого дисконтованого вільного грошового потоку, як важливі показники за інвестиційної оцінки проекту.

1. Богуславский Э.И. Техничко-экономическая оценка освоения тепловых ресурсов недр. – Л.: ЛГУ, 1984. – 168 с. 2. Соловьева Е.А., Говард Т.Н., Мейрис Э.В. Экономическая эффективность использования недр. – М.: Недра, 1980. – 216 с. 3. Агошков М.И., Астафьева М.П., Маутина А.А. Экономическая оценка эффективности геологоразведочных работ. – М.: Недра, 1980. – 257 с. 4. Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие / Под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского // АН УССР. Ин-т технической теплофизики. – К.: Наук. думка, 1991. – 360 с. 5. Гаджиев А.Г., Султанов Ю.И., Ригер Н.П. и др. Геотермальное теплоснабжение. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с. 6. Макконел К.Р., Брю С.Л. Экономикс: принципы, проблемы и политика / Пер. с англ. – К.: Хагар-Демос, 1993. – 785 с. 7. Інструкція про порядок обчислення і справляння плати за користування надрами для видобування корисних копалин, затверджена наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України, Державної податкової адміністрації України, Державного комітету України з геології і використанню надр, Міністерства праці та соціальної політики України від 30 грудня 1997 р. № 207/472/51/157. 8. Закон України “Про внесення змін до деяких законодавчих актів України” від 28.12.2008 р. № 107-VI. 9. Закон України “Про оподаткування прибутку підприємств” // Відомості Верховної Ради (ВВР) 1995. – № 4, ст. 28 із змінами і доповненнями на дату проведення розрахунків.