

© И.А.Садовенко¹, А.В. Инкин¹, Н.И. Деревягина¹, Ю.В. Хрипливец¹

¹ Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина

ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ В УКРАИНЕ

© I. Sadovenko¹, A. Inkin¹, N. Dereviahina¹, Yu. Hriplivec¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

GEOLOGICAL AND ECONOMICAL PROSPECTIVES OF DEVELOPING GEOTHERMAL ENERGY IN UKRAINE

Цель. Комплексная технико-экономическая оценка эффективности разработки геотермальных ресурсов на различных глубинах в зонах с повышенным значением теплового потока в земной коре.

Методика исследований. Для выполнения такой оценки был проведен анализ зон земной коры, характеризующихся повышенными значениями геотермического градиента с выделением и гидрогеологическим описанием потенциальных для использования термальных водоносных горизонтов, расположенных в пределах Закарпатского прогиба, Волыно-Подольской плиты, Днепровско-Донецкой и Причерноморской впадин, а также выполнены экономические, гидро- и термодинамические расчеты возможности их освоения.

Результаты исследований. С учетом установленной значительной минерализации (20 – 70 г/дм³) термальных вод была обоснована геотехнологическая схема их экологически безопасного использования, предполагающая откачку вод на поверхность, отбор тепла и обратное их нагнетание в пласт. Предложенная циркуляционная система характеризуется повышенным энергетическим балансом, так как с ее помощью извлекается практически все тепло подземных вод, а также часть тепла вмещающих пород. С целью оценки эффективности применения данной технологии в различных условиях была разработана математическая модель для определения изменения температуры воды в процессе ее движения, затрат электроэнергии на осуществление этого процесса и теплопроизводительности модуля.

Научная новизна. Предложенная модель позволяет решить задачу оптимизации температуры закачиваемой в пласт (отработанной) воды, основанную на том, что с одной стороны уменьшение этого параметра вызывает рост производительности системы на дневной поверхности, с другой – может привести к охлаждению воды на забое добывающей скважины.

Практическая значимость. Проведенные исследования позволили оценить экономическую эффективность разработки геотермальных ресурсов Украины и установить чистую дисконтированную стоимость геотермальной системы в зависимости от глубины залегания пласта-коллектора, геотермического градиента и расхода воды.

Ключевые слова: термальный водоносный горизонт, геотермальная система, тепловая энергия, чистая дисконтированная стоимость.

Введение. Общие ресурсы геотермальной энергии в Украине на глубине до 10 км оцениваются величиной 10^{22} Дж и эквивалентны запасам $3,4 \cdot 10^{11}$ т у.т. [1]. Количественные характеристики глубинного тепла горных пород и подземных вод свидетельствуют, что его ресурс значительно превышает запасы традиционных энергоносителей (природный газ – 1 трлн м³, уголь – 53,6 млрд т, нефть –

400 млн т) и требует всестороннего изучения механизма формирования, преобразования и освоения геотермальных месторождений с различными горно-геологическими, термодинамическими и техногенными условиями. В настоящее время это соответствует современным мировым тенденциям, а для Украины является определяющим её энергетической безопасности.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В отечественных наработках, наряду с фундаментальными геофизическими исследованиями, направленными на выявление зон с аномальными значениями геотермического градиента в земной коре [2, 3], практически отсутствуют данные относительно влияния геолого-гидрогеологических и техногенных условий на их термодинамическое состояние. Не выполнена также оценка перспективности разработки геотермальных ресурсов на различных глубинах с учетом климата отдельных регионов, динамики цен и острого дефицита на собственные и импортируемые энергоносители. Адекватный учет этих факторов имеет существенную, а нередко и основную, роль в установлении возможности создания станций геотермального теплоснабжения обозначая важную научно-практическую задачу.

Цель и задачи исследования. Для решения поставленной задачи сформулирована цель данной работы, заключающаяся в выполнении комплексной технико-экономической оценки эффективности разработки геотермальных ресурсов на различных глубинах в зонах с повышенным значением теплового потока в земной коре. Достижение поставленной цели рационально осуществлять в следующей последовательности: 1) выполнить анализ геолого-гидрогеологических условий районов, характеризующихся аномальными значениями геотермического градиента с выделением и описанием потенциальных для теплового использования водоносных горизонтов; 2) обосновать технологическую схему эффективной и экологически безопасной разработки геотермальных ресурсов; 3) оценить затраты энергии, необходимые для отбора и закачки подземных вод, а также изменения их температуры в процессе движения; 4) установить чистую дисконтированную стоимость разработанного модуля в зависимости от глубины залегания водоносного горизонта, значения геотермического градиента и расхода воды.

Анализ потенциальных зон земной коры для использования термальных водоносных горизонтов. В соответствии с данными геофизических исследований районы с повышенными значениями теплового потока в земной коре встречаются практически на всей территории Украины (рис. 1). Так, на западе страны самыми аномальными являются районы, расположенные во впадинах Закарпатского прогиба (Восточно-Словацкий и Мукачевский), где величина теплового потока превышает 100 мВт/м^2 и создает температуру горных пород на глубине 1 км – $65 - 70^\circ \text{C}$, 2 км – $95 - 105^\circ \text{C}$ и 3 км – $145 - 155^\circ \text{C}$. Термальные воды приурочены к осадочным и вулканическим образованиям мощностью от десяти до десятков метров. В качестве эксплуатируемых горизонтов на глубине 100 – 500 м могут использоваться водоносные песчаники и известняки с температурой $25 - 45^\circ \text{C}$ и минерализацией от 3 до 14 г/дм^3 , при средних дебитах скважин $17 - 86 \text{ м}^3/\text{сут}$. На глубине 600 – 900 м – сарматские отложения с температурой воды $50 - 75^\circ \text{C}$ и дебитами скважин $430 - 1290 \text{ м}^3/\text{сут}$. В более глубоких участках земной коры на глубине 1,9 – 2,3 км

– водовмещающие породы среднего миоцена с температурой воды 120 –130 °С и незначительным ($< 10 \text{ м}^3/\text{сут}$) дебитом скважин.

Перспективные геотермальные участки на западе страны были также обнаружены в пределах Волыно-Подольской плиты. К ним относится аномалия внутренней зоны Львовского палеозойского прогиба с тепловым потоком 50 – 70 мВт/м² и температурой пород 45 – 50 °С на глубине 1 км и 80 – 90 °С – на глубине 3 км, а также Тернопольская и Черновицкая аномалии с потоком до 60 мВт/м², температурой пород 25 – 30 °С на глубине 0,5 км и 80 – 100 °С на глубине 3 км. Термальные воды на выделенных участках содержатся в отложениях меловой, юрской, кембрийской и девонской систем. Так, слаботемпературные (до 30 °С) воды приурочены к залегающим на глубине 300 – 700 м нижнемеловым и юрским слоям, характеризующимся мощностью от 5 до 30 м и дебитами скважин до 90 м³/сут. По своему составу воды сероводородные и азотно-углекислые с минерализацией до 40 г/дм³. Ниже, на глубине 1 – 2 км, распространены воды девонских отложений с температурой 35 – 70 °С и минерализацией 30 – 70 г/дм³, сосредоточенные в трещиноватых песчаниках и известняках с дебитами скважин до 40 м³/сут.

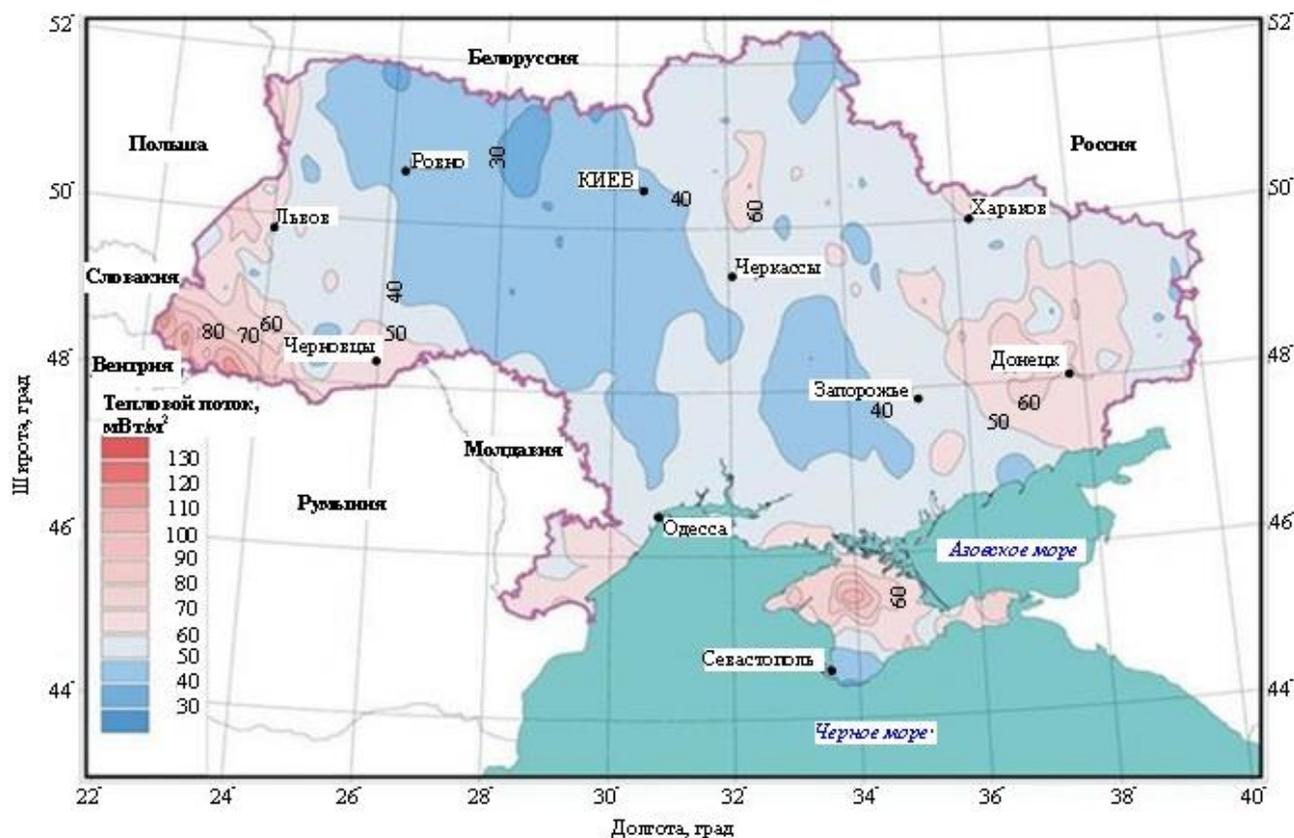


Рис. 1. Карта мощности теплового потока в земной коре на территории Украины [4]

В северо-восточной части Украины термальные воды находятся в пределах Днепровско-Донецкой впадины. Наиболее аномальные участки, с величинами теплового потока 50 –60 мВт/м², выделяются в районе ее юго-западного краевого разлома (вблизи

г. Полтава и Кобеляки) и склона Воронежского кристаллического массива (вблизи г. Харьков и Купянск). Температура пород на глубине 1 км составляет 40 – 45 °С, на глубине 3 км – 70 – 80 °С. В верхних слоях земной коры термальные воды приурочены к юрским пластам мощностью от 5 до 30 м и глубиной залегания 350 – 750 м. Температура вод достигает 20 – 40 °С, минерализация – 50 г/дм³, дебит скважин – 120 м³/сут. В нижележащих (1 – 1,5 км) пермских отложениях температура термальных вод, сосредоточенных в песках и песчаниках, составляет 35 – 60 °С. Их минерализация увеличивается с глубиной от 15 до 135 г/дм³. При этом дебиты скважин колеблются от 10 до 200 м³/сут. Наиболее глубокозалегające воды девонских отложений приурочены к глубине 2 – 3 км с температурой 50 – 90 °С и минерализацией 140 – 200 г/дм³. Дебиты скважин здесь изменяются от 80 до 500 м³/сут.

На юге Украины термальные воды распространены в районе Причерноморской впадины (Одесская, Николаевская и Херсонская обл.), где глубина залегания изотермической поверхности + 50 °С изменяется от 1 (по побережью Черного моря) до 2,4 км (ее северная граница). На данной территории наиболее перспективным является меловой горизонт, находящийся на глубине от 1,5 до 3 км. Воды этого горизонта хлоридно-натриевые, с минерализацией от 5 (окраины впадины) до 75 г/дм³ (центральная часть). Их температура и дебит соответственно изменяются в пределах 50 – 90 °С и 500 – 1500 м³/сут. Первоочередными районами комплексного использования термальных вод могут быть Стрелковая структура и Геническая площадь, где температура воды на изливе из скважины, вскрывшей меловой горизонт на глубине 2,6 км, при дебите 1420 м³/сут, достигает 75 °С.

Геотехнологическая схема экологически безопасного использования термальных вод. Учитывая возможные дебиты скважин и повышенную минерализацию подземных вод зон с аномальными значениями геотермического градиента в земной коре, для разработки их тепловых ресурсов может быть использована геодинамическая система (ГДС), предполагающая откачку вод на поверхность, отбор тепла из них и обратное нагнетание вод в пласт. Такая система резко повышает потенциальную роль геотермальных ресурсов в энергетическом балансе, так как с ее помощью извлекается практически все тепло подземных вод, а также часть тепла водовмещающих пород. Коэффициент извлечения тепла по данной технологии достигает 5 – 13 %, что значительно больше значений этого показателя при фонтанной $(3 - 17) \cdot 10^{-3}$ и насосной $(1 - 8) \cdot 10^{-2}$ % эксплуатации термоводозаборов. Кроме того, обратная закачка воды в пласт позволяет получить дополнительный эколого-технический эффект за счет их утилизации, увеличения пластового давления и дебита добывающей скважины.

Согласно предложенной технологической схеме термальные воды из добывающей скважины с помощью насоса отбираются на дневную поверхность и поступают в теплоизолированный бак-аккумулятор, откуда после очистки направляются в системы отопления и горячего водоснабжения (рис. 2). Если температура извлекаемых вод меньше кондиционных показателей (70 °С для горячего водоснабжения и 90 °С – для отопления), они могут быть использованы в качестве низкопотенциального источника энергии в тепловых насосах и системах

отопления «теплый пол». После отдачи тепла потребителю, вода через нагнетательную скважину вновь закачивается в водоносный горизонт.

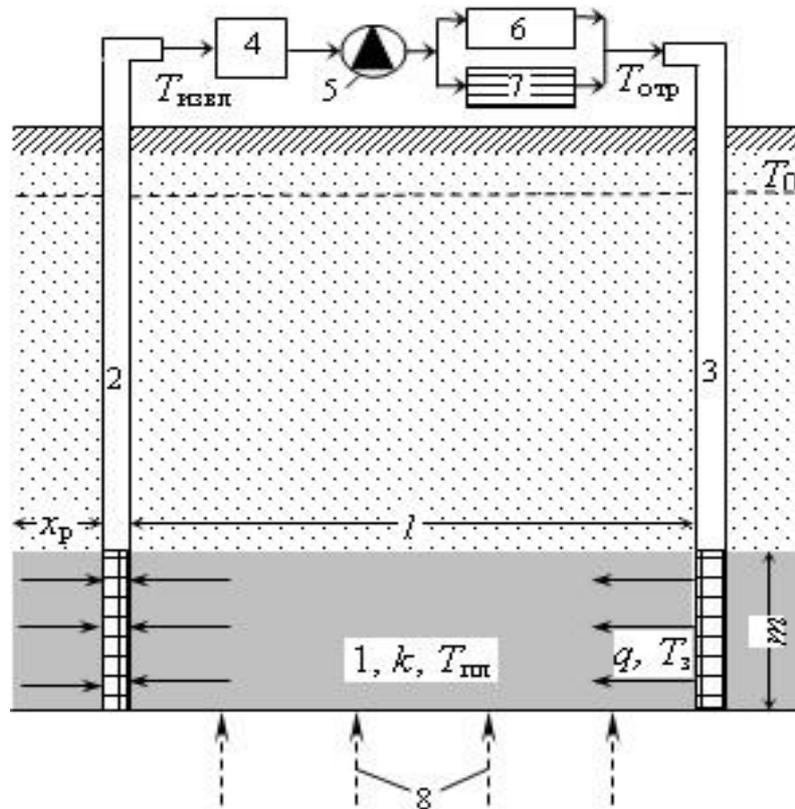


Рис. 2. Геоциркуляционная система: 1 – водоносный горизонт; 2, 3 – добывающая и нагнетательная скважины соответственно; 4 – бак-аккумулятор; 5 – блок очистки; 6, 7 – потребители тепла (водоснабжение и отопление); 8 – тепловой поток

Необходимо отметить, что предложенная геоциркуляционная система сочетает сложную совокупность физических и технико-экономических показателей: капиталоемкость, обусловленная необходимостью дополнительного бурения нагнетательных скважин, параметры приемистости скважин и их изменение во времени, дополнительные затраты электроэнергии на закачку подземных вод под избыточным давлением. Кроме того, их постоянная циркуляция приводит к постепенному истощению теплового потенциала водоносного коллектора. Поэтому применение данной технологии обязательно должно базироваться на соответствующих технико-экономических оценках в каждом конкретном районе с учетом его термодинамических и геолого-гидрогеологических условий.

Разработка математической модели для определения изменения температуры воды в процессе ее движения, затрат электроэнергии на осуществление этого процесса и теплопроизводительности модуля. Выполнение такой оценки в первую очередь связано с определением затрат на создание и эксплуатацию ГЦС, зависящих от глубины залегания водоносного коллектора и условно подразделяющихся на три основных составляющих: бурение скважин, промышленное оборудование и электроэнергия, обеспечивающая работу насосов. При этом стоимость бурения глубоких скважин в Украине, исходя из сложности горно-геологических

условий на данный момент, может быть ориентировочно оценена в диапазоне 5 – 10 тыс. грн за один погонный метр. Затраты на промышленное оборудование (насосы, трубы, аккумулярующие баки), как правило, не превышают 20 – 25 % общей стоимости ГЦС, а мощность, потребляемая электроцентробежными насосами для отбора и закачки подземных вод, определяется из следующего выражения [5]

$$N = \kappa_3 \frac{gQH\rho_{жс}}{\eta_{нас}\eta_{п}} = \kappa_3 \frac{QP_3}{\eta_{нас}\eta_{п}}, \quad (1)$$

где κ_3 – коэффициент запаса, принимаемый в зависимости от двигателя насоса; g – ускорение свободного падения; Q – расход подземных вод; H – глубина залегания пласта; $\rho_{жс}$, P_3 – плотность и давление закачки жидкости; $\eta_{нас}$, $\eta_{п}$ – КПД насоса и передачи теплоносителя.

Применение электроцентробежных насосов (General Electric, Centrilift, Новомет и др.) в циркуляционных системах обусловлено их безотказной работой в агрессивных жидкостях с растворенными солями, газами и механическими примесями. Кроме того, насосы данного типа характеризуются простотой наземного оборудования, продолжительным межремонтным периодом эксплуатации (2 – 3 года), большой глубиной отбора (до 4 км) и значительным дебитом (до 5000 м³/сут).

Принимая равной среднюю стоимость бурения 1 п. м скважины 7 тыс. грн и оборудования 20 % его общей стоимости, получим начальные затраты (C) на создание ГЦС: при глубине залегания водоносного горизонта 1 км – 16,8 млн грн, 2 км – 33,6 млн грн и 3 км – 50,4 млн грн. Текущие затраты на работу системы обусловлены электроэнергией, потребляемой двумя насосами для циркуляции воды. Данные о ее расходе ($W_э$) и стоимости ($S_э$) рассчитаны по формуле (1) и приведены в табл. 1. При выполнении расчетов принимались действующие в настоящее время в Украине тарифы на электричество для предприятий (100 кВт·ч = 176 грн) и следующие значения показателей: $\kappa_3 = 1,2$; $\rho_{жс} = 1000$ кг/м³; $P_3 = 1,5 P_{пл}$; $P_{пл} = \rho_{жс}gH$; $\eta_{п} = 0,9$; $\eta_{нас} = 0,6$.

Таблица 1

Расход и стоимость электроэнергии, потребляемой насосами для движения воды в ГЦС

$W_э, 10^4$ кВт·ч/сут								
$S_э, тыс.$ грн/сут								
$H = 1$ км			$H = 2$ км			$H = 3$ км		
$Q, 100$ м ³ /сут			$Q, 100$ м ³ /сут			$Q, 100$ м ³ /сут		
5	10	15	5	10	15	5	10	15
<u>0,66</u>	<u>1,31</u>	<u>1,97</u>	<u>1,31</u>	<u>2,62</u>	<u>3,94</u>	<u>1,97</u>	<u>3,94</u>	<u>5,91</u>
11,6	23,1	34,7	23,1	46,2	69,3	34,7	69,3	104,0

Прибыль (I), получаемая от работы ГЦС, может быть определена как разница между стоимостью вырабатываемой тепловой и потребляемой электрической энергией. При этом действующий в Украине тариф на тепловую энергию

принимается равным $1 \text{ Гкал} = 1416 \text{ грн}$, а теплопроизводительность системы вычисляется по формуле [6]

$$G = QC_v (T_{\text{извл}} - T_{\text{отр}}), \quad (2)$$

где C_v , $T_{\text{извл}}$, $T_{\text{отр}}$ – соответственно объемная теплоемкость подземных вод и их средняя температура до и после использования.

Неопределенность выражения (2) связана с параметром ($T_{\text{отр}}$), для нахождения которого необходимо решение оптимизационной задачи. С одной стороны, снижение на дневной поверхности температуры циркулирующей воды приводит к повышению ее плотности, росту гидростатического давления в нагнетательной скважине (эффект термопресса) и значительному увеличению коэффициента извлечения тепловой энергии. С другой – температура закачиваемой воды не должна нарушить первоначальные термодинамические условия вблизи забоя добывающей скважины и тем самым уменьшить теплопроизводительность системы. Поэтому для определения этого параметра необходимо использовать следующую систему уравнений [6]

$$\Delta T_3 = \Delta T_{\text{отр}} \cdot e^{-H\beta} + \Gamma \cdot H - \frac{\Gamma}{\beta} (1 - e^{-H\beta}), \quad (3)$$

$$T_{\text{извл}} = T_3 + (T_{\text{пл}} - T_3) \cdot e^{-\frac{Q \cdot t}{V_n}}, \quad (4)$$

$$\Delta T_3 = T_3 - T_0, \quad \Delta T_{\text{отр}} = T_{\text{отр}} - T_0, \quad \beta = \pi K / QC_v,$$

$$\Gamma = \frac{q}{\lambda}, \quad K = \frac{2}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_t}{r_c}}, \quad r_t = 2\sqrt{\alpha \cdot t}, \quad T_{\text{пл}} = T_0 + \Gamma (H - H_0),$$

где T_3 , T_0 – соответственно температура воды на забое нагнетательной скважины и горных пород на глубине нейтрального слоя; Γ – геотермический градиент; q – тепловой поток в земной коре; H_0 – глубина залегания нейтрального слоя; $T_{\text{пл}}$ – температура пластовой воды; t – время; V_n – объем пород, через который происходит циркуляция теплоносителя; r_t , r_c – радиусы теплового влияния и скважины; λ , α – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности пород.

В формуле (4) объем горных пород, через который происходит фильтрация нагнетаемых вод, может быть установлен путем определения размеров области захвата добывающей скважины, внутри которой весь объем воды достигнет скважины за время ее работы. В нашем случае, ввиду длительного нагнетания воды по всей мощности пласта, данная область может быть схематизирована вытянутым вдоль потока подземных вод эллиптическим цилиндром, высота (h) которого соответствует мощности водоносного горизонта, большая ось (l) – расстоянию между нагнетательной и добывающей скважинами, а малая ось (d) – вычисляется по формуле [7]

$$V_n = h \cdot l \cdot d, \quad d = 2d' \cdot x_p, \quad d' = f(t'),$$

$$x_p = \frac{Q}{2\pi q_b}, \quad t' = \frac{q_b \cdot t}{m \cdot n \cdot x_p}, \quad q_b = kmI, \quad I = \frac{Q}{2\pi kml} + I_0,$$

где d' , t' – безразмерные параметры; x_p – расстояние до водораздельной точки; q_b – единичный расход потока подземных вод; k , n , m – соответственно коэффициент фильтрации, активная пористость и мощность водоносного горизонта; I_0 , I – градиент напора в естественных и нарушенных закачкой вод условиях.

С помощью формул (3) – (4) в программной среде Mathcad был произведен расчет гидро- и термодинамических параметров эксплуатации геодинамической системы в типовых горно-геологических и технологических условиях Украины: $C_b = 4,2$ МДж/м³·°С; $T_0 = 10$ °С; $\alpha = 0,086$ м²/сут; $k = 2$ м/сут; $q = 60 - 100$ мВт/м²; $\lambda = 155520$ Дж/сут·м·°С; $m = 20$ м; $I_0 = 0,003$; $H_0 = 10$ м; $n = 0,2$; $T_{отр} = 5 - 15$ °С; $r_c = 0,1$ м; $l = 800$ м; $Q = 500 - 1500$ м³/сут; $t = 26$ лет. Зависимость $d' = f(t')$ принималась согласно рекомендациям [7].

Результаты исследований. Анализ полученных данных показывает, что начальная температура закачиваемой воды ($T_{отр} = 15$ °С) может увеличиваться практически на 80 % в процессе ее движения к забою скважины ($H = 3$ км и $Q = 500$ м³/сут, табл. 2). Вместе с тем, на меньших глубинах ($H = 1$ км) повышения температуры не такие значительные и не превышают 10 %. Однако для всех глубин залегания пласта-коллектора характерно наступление условно установившейся температуры закачиваемой воды спустя 10 лет от начала работы циркуляционной системы и незначительное (10 – 15 %) ее уменьшение с ростом дебита скважины.

На Рис. 3. приведены изменения температуры воды, отбираемой из добывающей скважины в период работы ГЦС. Анализ графиков показывает значительное уменьшение этого параметра с течением времени, что свидетельствует о преобладании остывания водоносного горизонта в результате фильтрации отработанных вод над его нагревом тепловым потоком из земных недр. Установленная тенденция характерна для всех глубин и дебитов скважин.

Таблица 2

Изменение температуры воды на забое нагнетательной скважины при $q = 60$ мВт/м²

Время, год	$T_z, \text{ }^\circ\text{C}$								
	$H = 1$ км			$H = 2$ км			$H = 3$ км		
	$Q, 100 \text{ м}^3/\text{сут}$			$Q, 100 \text{ м}^3/\text{сут}$			$Q, 100 \text{ м}^3/\text{сут}$		
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
1	16,1	15,6	15,4	20,3	17,8	16,9	27,3	21,5	19,4
5	16,0	15,5	15,3	19,6	17,4	16,6	25,7	20,5	18,7
10	15,9	15,4	15,3	19,3	17,2	16,5	25,0	20,2	18,5
15	15,9	15,4	15,3	19,2	17,1	16,4	24,9	20,0	18,4
26	15,9	15,4	15,3	19,0	17,1	16,4	24,8	19,9	18,3

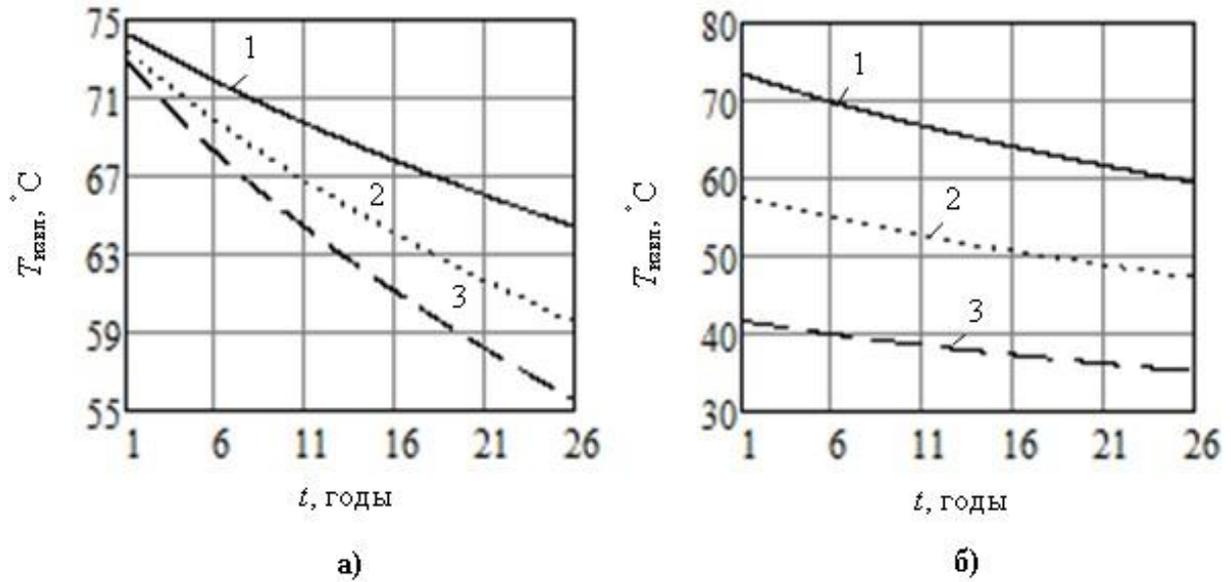


Рис. 3. Изменение температуры воды, добываемой ГЦС при $q = 60$ мВт/м² и $T_{\text{отр}} = 15$ °С: а) $H = 2$ км и Q : 1 – 3 – 500, 1000 и 1500 м³/сут; б) $Q = 1000$ м³/сут и H : 1 – 3 – 2, 1,5 и 1 км

Как было отмечено выше, на эффективность работы геациркуляционной системы в значительной мере оказывает влияние температура закачиваемой воды, в связи с чем, на Рис. 4. приведены результаты расчета теплопроизводительности системы при различных значениях этого показателя для условий, характеризующихся неодинаковыми тепловыми потоками, глубинами залегания водоносного горизонта и дебитами скважин.

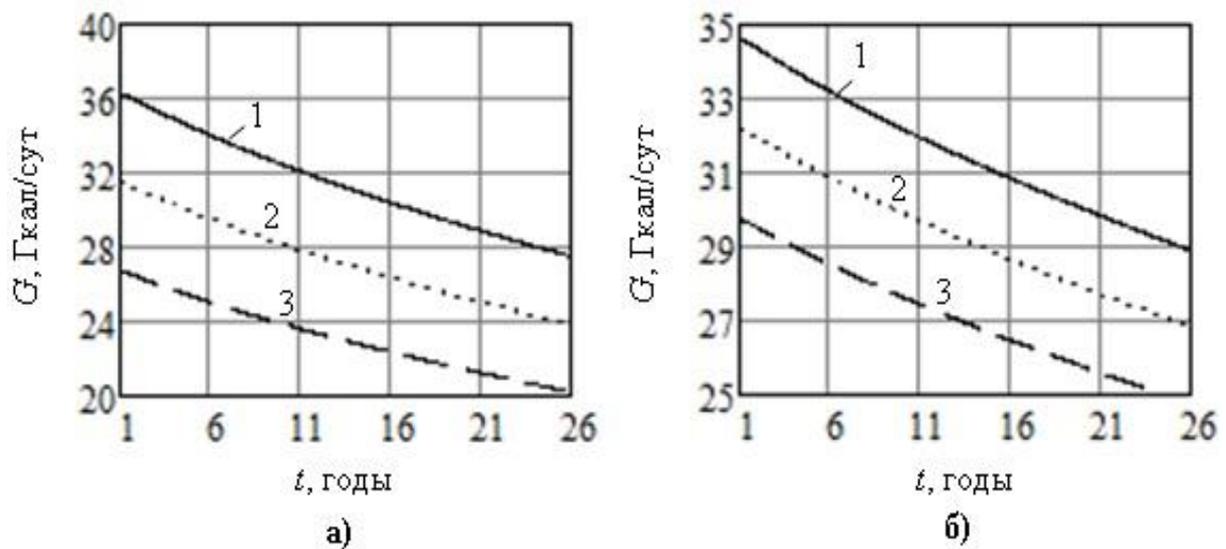


Рис. 4. Изменение теплопроизводительности ГЦС в процессе ее работы: а) $H = 1$ км, $Q = 1000$ м³/сут и $q = 60$ мВт/м²; б) $H = 2$ км, $Q = 500$ м³/сут и $q = 60$ мВт/м²; 1 – 3 – соответственно при $T_{\text{отр}} = 5, 10$ и 15 °С

Обсуждение результатов оценки эффективности разработки геотермальных ресурсов Украины и чистой дисконтированной стоимости геодинамической системы в зависимости от глубины залегания пласта-коллектора, геотермического градиента и расхода воды. Из полученных результатов следует, что в различных горно-геологических и технологических условиях эксплуатации геодинамической системы ее максимальная производительность достигается при минимальных значениях температуры возвратной воды. Вместе с тем, в расчетах условного теплоэнергетического потенциала термальных вод значение этого показателя не рекомендуется принимать ниже $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7], ввиду технологической проблематичности использования более низкотемпературных вод для теплоснабжения зданий. Однако получившие в последнее время широкое распространение тепловые насосы позволяют существенно расширить температурный диапазон наземного использования водных ресурсов путем их доведения до температуры $4 - 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и применения в качестве низкопотенциального источника энергии [8, 9]. Поэтому в последующих расчетах температуру возвратных вод будем принимать равной $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (минимум, необходимый для нормальной работы тепловых насосов). При этом необходимо отметить, что более значительное ее понижение может привести к заморозке скважин и прекращению работы системы.

На Рис. 5. приведено изменение прибыли получаемой от работы геодинамической системы при $q = 60\text{ мВт/м}^2$. Анализ полученных данных показывает ее существенное снижение со временем, что связано с уменьшением теплового ресурса водоносного горизонта и охлаждением циркулирующих вод. Наряду с этим отмечается рост прибыли с увеличением глубины ГЦС и дебита скважины.

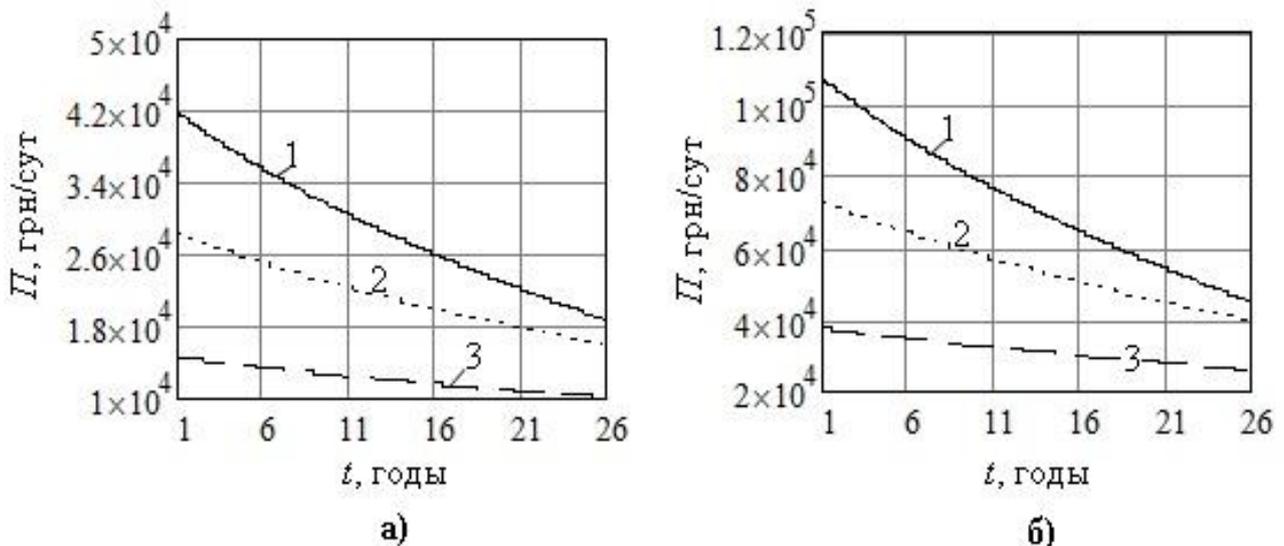


Рис. 5. Прибыль, получаемая от работы ГЦС при $H = 1\text{ км}$ (а) и $H = 3\text{ км}$ (б); 1 – 3 – соответственно при $Q = 1500, 1000$ и $500\text{ м}^3/\text{сут}$

Комплексная оценка рентабельности создания ГЦС в различных условиях может быть выполнена с помощью принятого в международной практике для

анализа инвестиционных проектов критерия чистой дисконтированной стоимости (*NPV*). Данный критерий показывает величину денежных средств, которую инвестор ожидает получить от проекта, после того, как прибыль окупит его начальные и текущие затраты, связанные с осуществлением проекта. *NPV* определяется из следующего выражения [10-12]

$$NPV = -C + \frac{\Pi_1}{(1+R)} + \frac{\Pi_2}{(1+R)^2} + \dots + \frac{\Pi_{26}}{(1+R)^{26}}, \quad (5)$$

где Π_1 – ежегодная прибыль от работы системы; R – норма дисконта.

Уравнение (5) дает описание чистой прибыли инвестора от инвестиций, направленных на создание ГЦС. При этом норма дисконта рассматривается как издержки на основной капитал и зависит от альтернативных способов его вложения. Например, вместо создания системы инвестор может вложить деньги в другой проект, положить в банк под процент или купить облигации. Поэтому, если дисконтированная стоимость отрицательна – проект убыточен, если равна нулю, то доход от капиталовложений будет равен временным издержкам, но если ее значения положительны ($NPV > 0$), ожидаемый доход превысит издержки и капиталовложение будет прибыльно.

На Рис. 6. приведены результаты расчета чистой дисконтированной стоимости ГЦС по формуле (5). Норма дисконта принималась согласно действующих в настоящее время в Украине депозитных ставок в финансовых учреждениях (5 – 20 %).

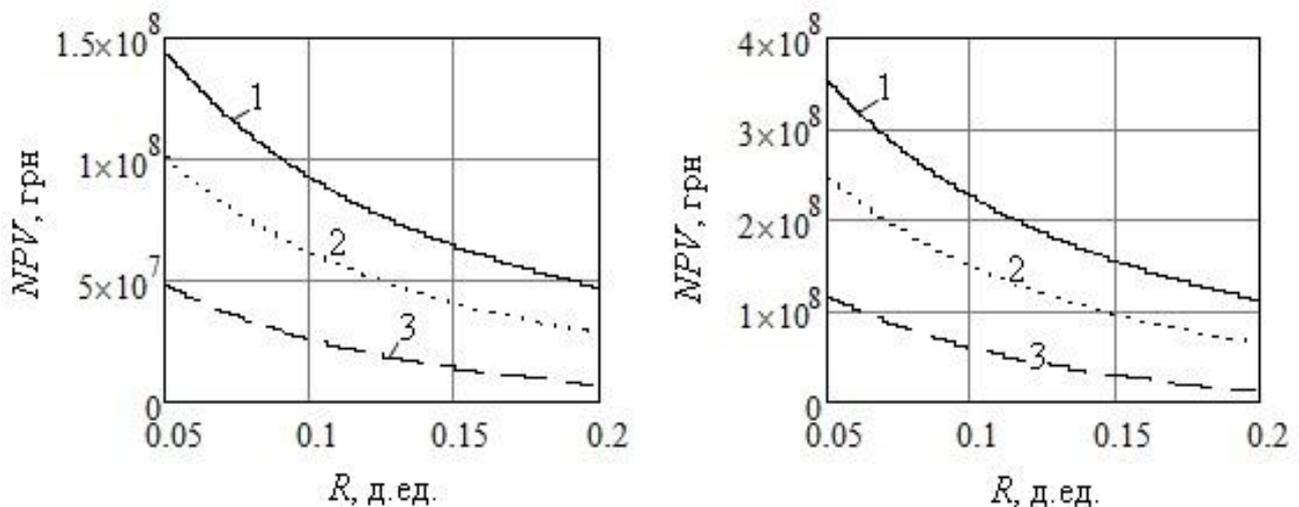


Рис. 6. Чистая дисконтированная стоимость ГЦС при $q = 60$ мВт/м²: $H = 1$ км (а) и $H = 3$ км (б); 1 – 3 – соответственно при $Q = 1500, 1000$ и 500 м³/сут

Построенные графики однозначно подтверждают рентабельность создания данных систем на участках с аномальными значениями геотермического градиента в земной коре с учетом альтернативных вариантов капиталовложения. Как видно из полученных данных, даже на территориях, характеризующихся наименьшими величинами аномалий теплового потока (Днепровско-Донецкая впадина, Тернопольская и Черновицкая аномалия), при создании ГЦС на глубине

1 км и циркуляции воды в объеме не менее $500 \text{ м}^3/\text{сут}$, значения NPV положительны (50 – 100 млн грн) при всех нормах дисконта, и инвестор может вкладывать деньги в этот проект (рис. 6, а). Необходимо отметить, что с увеличением глубины залегания пласта-коллектора и количества фильтрующейся воды NPV геоциркуляционной системы значительно возрастает (рис. 6, б). Данная тенденция наблюдается также при расположении системы на участках с большими значениями теплового потока (Закарпатский прогиб). Полученные результаты позволяют судить о рентабельности создания ГЦС в различных горно-геологических и технологических условиях Украины и могут быть использованы при составлении инвестиционных проектов, бизнес-планов и других предпроектных обоснований, направленных на разработку геотермальных ресурсов.

Выводы. Ограниченность запасов нефти и природного газа в Украине приводит к необходимости поиска и разработки альтернативных источников энергии, в частности геотермальных, запасы которых ($3,4 \cdot 10^{11}$ т у.т) значительно превышают ресурсы традиционных энергоносителей. При этом ввиду высокой минерализации ($20 - 70 \text{ г/дм}^3$) подземных вод геологических структур, характеризующихся повышенными значениями теплового потока в земной коре (Закарпатский прогиб, Вольно-Подольская плита, Днепровско-Донецкая и Причерноморская впадина), их разработка должна производиться по экологически безопасной технологии. В этом аспекте рассматриваемая авторами геоциркуляционная система, предполагающая откачку термальных вод на поверхность, отбор тепла из них и обратное нагнетание вод в пласт, решает проблему их утилизации и существенно увеличивает процент извлечения геотермальной энергии за счет ее совместного отбора из подземных вод и водовмещающих пород.

Показатели работы данной системы неоднозначно зависят от температуры возвратной воды, так как с одной стороны ее уменьшение ведет к росту теплопроизводительности модуля на дневной поверхности, с другой – может привести к чрезмерному охлаждению пласта-коллектора. Определение оптимального значения этого параметра было выполнено путем решения термо- и гидрогеодинамической задачи в программной среде Mathcad и установления технологической возможности использования подземных вод в качестве низкопотенциального источника энергии в тепловых насосах. Согласно полученных данных, при величине теплового потока $60 - 100 \text{ мВт/м}^2$ максимальная мощность системы достигается при температуре возвратной воды равной 5°C . Необходимо отметить, что установленная теплопроизводительность ГЦС ($24 - 36 \text{ Гкал/сут}$) изменяется в зависимости от объема фильтрующейся воды и глубины залегания водоносного горизонта, а также уменьшается на $15 - 20 \%$ к окончанию периода ее эксплуатации (26 лет).

Экономическая оценка эффективности работы ГЦС выполнена путем установления затрат на ее создание и эксплуатацию, а также доходов, получаемых от реализации вырабатываемой системой тепловой энергии. Согласно расчетам прибыль от работы системы существенно зависит от расхода воды и значительно снижается со временем ввиду остывания водоносного горизонта. Принятый в качестве комплексного критерия рентабельности ГЦС международный показатель

чистой дисконтированной стоимости (*NPV*) принимает положительные значения (50 – 100 млн грн) даже на участках, характеризующихся наименьшими значениями теплового потока в земной коре ($H = 1$ км, $q \approx 60$ мВт/м²) и существенно увеличивается (100 – 300 млн грн) с глубиной залегания пласта-коллектора ($H = 3$ км). Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности вложения капитала в создание геодинамических систем в горно-геологических и термодинамических условиях Украины и могут быть использованы при составлении инвестиционных проектов геотермального теплоснабжения.

Перечень ссылок

1. Макаренко, П.Н., & Дьяченко, А.С. (2011). Перспективы применения геотермальной энергетики в АПК Украины. *Экономика АПК*, 14–16.
2. Гордиенко, В.В., Гордиенко, И.В., & Завгородняя, О.В. (2002). *Тепловое поле территории Украины*. Киев: Знання України.
3. Кутас, Р.И. (2014). Тепловой поток и геотермические модели земной коры Украинских Карпат. *Геофизический журнал*, 3–27.
4. *Національний Атлас України*. (2007). Київ: ДНВП «Картографія».
5. Timoshuk, V., Tishkov, V., Inkin, O., & Sherstiuk, E. (2012). Influence of coal layers gasification on bearing rocks. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 109–113. doi:10.1201/b13157-19
6. Алхасов, А.Б. (2012). *Возобновляемая энергетика*. Москва: ФИЗМАТЛИТ.
7. Садовенко, И.А., Рудаков, Д.В., & Инкин, А.В. (2012). Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии. *Научный вестник НГУ*, 40–45.
8. Fleuchaus, P., & Blum, P. (2017). Damage event analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Geothermal Energy*, 5(1). doi:10.1186/s40517-017-0067-y
9. Jung, Y.-J., Kim, H.-J., Choi, B.-E., Jo, J.-H., & Cho, Y.-H. (2016). A Study on the Efficiency Improvement of Multi-Geothermal Heat Pump Systems in Korea Using Coefficient of Performance. *Energies*, 9(5), 356. doi:10.3390/en9050356
10. Гидулянов, В.И., & Хлопотов, А.Б. (2003). *Анализ методов оценки капитальных вложений*. Москва: Изд-во Моск. гос. ун-та.
11. Maliszewski, N. (2004). Profitability of geothermal energy use in localities of various population. *International Geothermal Days, Zakopane*, 216-220
12. Shortall, R., Axelsson, G., & Davidsdottir, B. (2015). Assessing the Sustainability of Geothermal Utilization. *Sustainability Assessment of Renewables-Based Products*, 259–273. doi:10.1002/9781118933916.ch17

АНОТАЦІЯ

Мета. Комплексна техніко-економічна оцінка ефективності розробки геотермальних ресурсів на різних глибинах в зонах з підвищеним значенням теплового потоку в земній корі.

Методика. Для виконання такої оцінки проведено аналіз зон земної кори, що характеризуються підвищеними значеннями геотермічного градієнта з виділенням і гідрогеологічним описом потенційних для використання термальних водоносних горизонтів, розташованих в межах Закарпатської прогину, Волино-Подільської плити, Дніпровсько-Донецької та Причорноморської западин, а також виконані економічні, гідро- і термодинамічні розрахунки можливості їх освоєння.

Результати. З урахуванням встановленої значної мінералізації термальних вод була обґрунтована геотехнологічна схема їх екологічно безпечного використання, що припускає відкачування вод на поверхню, відбір тепла і зворотне їх нагнітання в пласт. Запропонована циркуляційна система характеризується підвищеним енергетичним балансом, так як з її допомогою витягується практично все тепло підземних вод, а також частина тепла вмішаних порід. З метою оцінки ефективності застосування даної технології в різних умовах була розроблена математична модель для визначення зміни температури води в процесі її руху, витрат електроенергії на здійснення цього процесу і теплової модуля.

Наукова новизна. Запропонована модель дозволяє вирішити задачу оптимізації температури води, що закачується в пласт (відпрацьованої), засновану на тому, що з одного боку зменшення цього параметра викликає зростання продуктивності системи на денній поверхні, з іншого - може призвести до охолодження води на забої видобувної свердловини.

Практична значимість. Проведені дослідження дозволили оцінити економічну ефективність розробки геотермальних ресурсів України і встановити чисту дисконтовану вартість геоциркуляційної системи в залежності від глибини залягання пласта-колектора, геотермічного градієнта і витрати води.

Ключові слова: *термальний водоносний горизонт; геоциркуляційна система; тепла енергія; чиста теперішня вартість.*

ABSTRACT

Purpose. To solve the problem, the objective of the paper has been formulated as follows: to perform comprehensive technical and economic assessment of the efficiency of geothermal resources development at various depths within the zones with the increased values of heat flow in the earth's crust.

The methodology. The analysis of the zones of the earth's crust, which have elevated geothermal gradient values with the selection and hydrogeological description of potential for the use of thermal aquifers located within the Transcarpathian Downfold, Volhynia-Podilia Plate, Dnieper-Donets Depression was carried out. The economic, hydro and thermodynamic calculations of the possibility of their development are carried out.

Findings. Taking into account the determined significant mineralization of the thermal water, geotechnical scheme of its environmentally safe use has been substantiated; the scheme suggests water pumping onto the surface, heat extraction, and water pumpback into the bed. The proposed circulation system is characterized by the increased energy balance since it helps extract almost all the heat of ground water as well as a certain share of the heat from the enclosing rocks. To evaluate the efficiency of the technique under different conditions, a mathematical model has been developed to determine changes in the temperature of water during its circulation, power costs for that process, and thermal efficiency of the module.

The originality. The considered geocirculation system, which involves thermal water pumping onto the surface, heat extraction from the water, and water pumpback into the bed, solves a problem of its utilization and increases considerable the percentage of geothermal energy recovery at the expense of its combined intake both from the ground water and water-bearing rocks.

Practical implications. The studies have allowed evaluating economic efficiency of the development of geothermal resources in Ukraine and determining net present value of geocirculation system depending upon the depth of reservoir geothermal gradient, and water consumption.

Key words: *thermal aquifer, geo-circulation system, thermal energy, net present value.*