

УДК 620.9

<https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.009>

**ОБОСНОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБОТКИ  
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ УКРАИНЫ**

А.В. Инкин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Днепровская политехника»,  
г. Днепр, Украина

<sup>1</sup>Институт физики горных процессов Национальной академии наук  
Украины, г. Днепр, Украина

\*Ответственный автор: e-mail: inkin@ua.fm

**JUSTIFICATION OF GEOTECHNOLOGICAL AND ECONOMIC  
PARAMETERS OF DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL RESOURCES  
OF UKRAINE**

O.V. Inkin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Institute for Physics of Mining Processes the National Academy Sciences of  
Ukraine, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail: inkin@ua.fm

**ABSTRACT**

**Purpose.** Zoning and mapping of the territory of Ukraine on the potential heat capacity of geothermal systems for heating buildings, which can be used by stakeholders to evaluate the profitability of their operation based on modern investment criteria.

**Methods** of the study includes economic and thermo-hydrodynamic calculations that allow estimating the potential heat capacity and net present value (*NPV*) of heat supply systems for buildings taking into account geological structure and hydrogeological conditions of Ukrainian territory. We assessed the efficiency of using a geo-circulation system (*GCS*) that comprises pumping out water to the ground surface, extracting heat, and re-injecting cooled water into the reservoir.

**Findings.** The characteristics of aquifers located within Transcarpathian trough, Volyn-Podolsky plate, and the Dnieper-Donets and Black Sea basins with heightened values of geothermal gradient as the most promising for thermal water exploration have been identified. Particularly, we evaluated the range of feasible exploration depths and expected discharge that were used for creation of the maps of potential *GCS* heat capacity for Ukrainian territory.

**Originality.** Based on heat capacity we made an economic assessment of the profitability of *GCS* operation using the parameter of *NPV* as the main criterion. The *GCS* use enables increasing the role of geothermal resources in the energy balance

of some regions, since these systems enable extracting heat from heated water-bearing rocks.

**Practical implications.** The created maps allow identifying the most promising sites for investors in terms of geotechnical and hydrogeological feasibility for location of geothermal systems. The maximum *GCS* efficiency is expected for the north Crimea and Black Sea coastal area (20-30 Gcal/day at a depth of 1.5 km and flow rate of 500 m<sup>3</sup>/day and 120-180 Gcal/day at a depth of 3 km and flow rate of 1500 m<sup>3</sup>/day). The parameter of *NPV* reaches positive values of 0.5-1 Mio € even in the areas with average heat flux of about 60 mW/m<sup>2</sup> and well flow rate of 200 m<sup>3</sup>/day.

**Keywords:** thermal waters, geo-circulation system, heat capacity, net present value, mapping

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ограниченность запасов нефти и природного газа в Украине приводит к необходимости поиска альтернативных систем теплоснабжения гражданских и промышленных объектов. При этом наиболее распространенным и доступным к техническому использованию нетрадиционным источником тепловой энергии в настоящее время являются термальные воды, прогнозный потенциал которых неодинаков по районам страны [1]. По оценкам различных организаций, развитие систем геотермального теплоснабжения позволит не только сэкономить органическое топливо, но и упростит решение ряда экологических проблем промышленных мегаполисов [2, 3]. Кроме того, существенным преимуществом термальных вод является возобновляемость их ресурсов, благодаря чему их эксплуатация будет способствовать поддержанию общего энергетического баланса государства.

Мировой научно-практический опыт освоения геотермальной энергии [4] показывает, что ее эффективное использование сопряжено с необходимостью первоочередного поиска наиболее перспективных в технико-экономическом отношении участков расположения геотермальных станций. В связи с этим целью данной работы является районирование и картирование территории Украины по потенциальной производительности геотермальных систем теплоснабжения зданий и рентабельности их эксплуатации на основе современных инвестиционных критериев.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

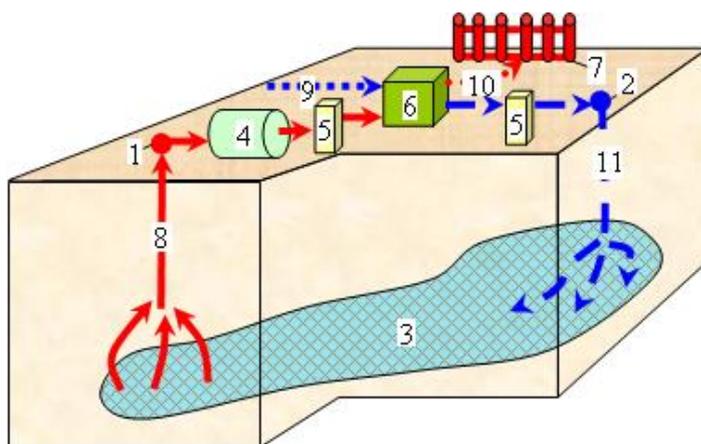
Анализ геотермических условий Украины показывает неравномерное распределение теплового потока по ее территории. Так, на западе страны, в пределах складчатой провинции Карпат, тепловой поток, равный в среднем 100 мВт/м<sup>2</sup> обуславливает температуру подземных вод на глубине 1 км – 65 – 70 °С и 2 км – 100 – 110 °С (табл. 1). Далее на восток (район Волыно-Подольской плиты) значения теплового потока постепенно снижаются до 50 – 70 мВт/м<sup>2</sup>, что соответственно вызывает уменьшение температуры подземных вод до 35 – 40 °С на глубине 1 км и 60 – 70 °С – на глубине 2 км.

Таблица 1. Распределение температуры и дебитов термальных вод по районам Украины

| Гидрогеологический район   | Глубина, км | Водоносные породы и их возраст  | Температура подземных вод, °С | Дебит скважин, м <sup>3</sup> /сут |
|--|-------------|---|-------------------------------|------------------------------------|
| Складчатая провинция Карпат (запад Украины)  | 0,6 – 0,9   | Песчаники и известняки, N <sub>1</sub> <sup>3</sup>                                   | 50 – 75                       | 430 – 1200                         |
|  | 1,9 – 2,3   | Пески, N <sub>1</sub> <sup>2</sup>  | 120 – 130                     | 5 – 10                             |
| Волыно-Подольский артезианский бассейн (северо-запад Украины)                      | 0,9 – 1,1   | Трециноватые песчаники и известняки, D  | 35 – 45                       | 20 – 40                            |
|  | 1,8 – 2,0   | Трециноватые песчаники и известняки, D  | 60 – 70                       | 20 – 40                            |
| Складчатая провинция Украинского кристаллического щита (центральная часть Украины) | 0,8 – 1,0   | Закарстованные доломитовые мраморы, PR  | 30 – 35                       | 300 – 400                          |
|  | 1,9 – 2,4   | Граниты, PR   | 50 – 55                       | 50 – 100                           |
| Причерноморский артезианский бассейн (юг Украины)                                  | 1,5         | Мергели и песчаники, K  | 50                            | 500 – 1500                         |
|  | 3,0         | Мергели и песчаники, K  | 90                            | 500 – 1500                         |
| Складчатая провинция Горного Крыма (Крымский полуостров)                           | 1,1         | Закарстованные известняки и песчано-глинистые породы, T <sub>3</sub> – J <sub>2</sub> | 30 – 35                       | 10 – 20                            |
|  | 1,9         | Закарстованные известняки и песчано-глинистые породы, T <sub>3</sub> – J <sub>2</sub> | 65 – 70                       | 10 – 20                            |
| Складчатая провинция Донецкого бассейна (восток Украины)                           | 0,9 – 1,2   | Трецинные и трецинно-карстовые известняки, D <sub>2</sub>                             | 27 – 40                       | 200 – 400                          |
|  | 1,8 – 2,0   | Песчаники и конгломераты, D <sub>2</sub>  | 70 – 75                       | 75 – 150                           |
| Днепровско-Донецкий артезианский бассейн (северо-восток Украины)                   | 1 – 1,2     | Пески и песчаники, P  | 35 – 60                       | 10 – 250                           |
|  | 1,9 – 2,3   | Трециноватые песчаники и известняки, D  | 50 – 90                       | 80 – 500                           |

В центральной части Украины (Украинский кристаллический щит) величина потока в большинстве случаев не превышает  $40 \text{ мВт/м}^2$ , что обуславливает невысокую температуру вод (до  $35^\circ\text{C}$  на глубине 1 км и  $55^\circ\text{C}$  – на глубине 2 км). Более существенные значения геотермического потока отмечены на юге и северо-востоке (Причерноморский и Днепроовско-Донецкий бассейн), где его величина достигает  $50 - 60 \text{ мВт/м}^2$ , а температура подземных вод –  $45$  и  $65^\circ\text{C}$  на глубине 1 и 2 км соответственно.

В связи с тем, что большая часть термальных вод Украины обладает высокой минерализацией, их непосредственный сброс после использования на дневную поверхность недопустим, поскольку может нанести существенный экологический ущерб. Естественной альтернативой является применение геодинамических систем (ГДС), предполагающих откачку вод на поверхность, отбор тепла из них и обратное нагнетание вод в пласт [5]. Такая система резко повышает роль геотермальных ресурсов в энергетическом балансе, так как с ее помощью извлекается тепло подземных вод, а также часть тепла водовмещающих пород. При этом, во избежание коррозии и солеотложения в отопительных приборах, отбор тепла термальных вод на дневной поверхности должен производиться путем его передачи пресной воде с помощью промежуточных теплообменников по следующей схеме (рис. 1).



**Рисунок 1. Схема геодинамической системы: 1, 2 – добывающая и нагнетательная скважина; 3 – пласт-коллектор; 4 – теплоизолированный бак-аккумулятор; 5 – насос; 6 – теплообменник; 7 – отопительные приборы; 8 – 11 – соответственно путь движения термальной, водопроводной, горячей и отработанной воды**

Вода из добывающей скважины накапливается в бак-аккумуляторе и по мере потребности подается насосом в теплообменник, куда также поступает холодная вода из водопровода. В теплообменнике происходит нагрев водопроводной воды, после чего она направляется потребителю для отопления и горячего водоснабжения. Отработанная и охладившаяся вода из теплообменника закачивается обратно в пласт через нагнетательную скважину.

Эффективность работы данной геодинамической системы определяется совокупностью физических и технико-экономических показателей,

включающих капиталоемкость, обусловленную 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, постоянная циркуляция охлаждаемой воды приводит к постепенному истощению теплового потенциала водоносного горизонта. Поэтому применение данной технологии обязательно должно обосновываться соответствующими технико-экономическими оценками термодинамических и геолого-гидрогеологических условий конкретного района, наличия потребителей и экономических ограничений.

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:

- 1) бурение скважин,
- 2) промышленное оборудование,
- 3) электроэнергия, обеспечивающая работу насосов.

Стоимость бурения глубоких скважин в Украине в зависимости от сложности горно-геологических условий на данный момент, может быть оценена в диапазоне 200 – 300 € (евро) за один погонный метр [6]. Затраты на промышленное оборудование (насосы, трубы, аккумулярующие баки), как правило, не превышают 20 – 25 % общей стоимости скважин, а мощность, потребляемая электроцентробежными насосами для отбора и закачки подземных вод, можно определить из выражения [7]

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

где  $\kappa_3$  – коэффициент запаса, принимаемый в зависимости от двигателя насоса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $Q$  – дебит скважины;  $H$  – 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 м<sup>3</sup>/сут).

Принимая среднюю стоимость бурения 1 п. м скважины равной 235 € и оборудования 20 % от его общей стоимости, определим начальные затраты  $S$  на создание ГЦС: при глубине залегания водоносного горизонта 1 км – 0,564 млн € и 2 км – 1,128 млн €. Текущие затраты на работу системы обусловлены электроэнергией, потребляемой двумя насосами для циркуляции воды. Данные о ее расходе  $W_3$  и стоимости  $S_3$  рассчитаны по формуле (1) и приведены в табл. 2. При выполнении расчетов принимались действующие в

настоящее время в Украине тарифы на электричество для предприятий (стоимость  $100 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \approx 174 \text{ грн} \approx 5,8 \text{ €}$ ) и следующие значения показателей:

$$\kappa_3 = 1,2; \rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3; P_3 = 1,5 P_{пл}; P_{пл} = \rho_{ж} g H; \eta_{П} = 0,9; \eta_{нас} = 0,6.$$

**Таблица 2. Расход и стоимость электроэнергии, потребляемой насосами для движения воды в ГЦС**

| $\frac{Wэ, 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут}}{S_э, \text{ евро/сут}}$ |                    |                    |                             |                    |                     |
|---|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| $H = 1 \text{ км}$  |                    |                    | $H = 2 \text{ км}$          |                    |                     |
| $Q, \text{ м}^3/\text{сут}$   |                    |                    | $Q, \text{ м}^3/\text{сут}$ |                    |                     |
| 100   | 500                | 1000               | 100                         | 500                | 1000                |
| $\frac{0,13}{75}$   | $\frac{0,66}{380}$ | $\frac{1,31}{760}$ | $\frac{0,26}{150}$          | $\frac{1,31}{760}$ | $\frac{2,62}{1520}$ |

Прибыль  $P$ , получаемая от работы ГЦС, может быть определена как разница между стоимостью вырабатываемой тепловой  $S_m$  и потребляемой электрической  $S_э$  энергией. При этом действующий в Украине тариф на тепловую энергию принимается равным  $1 \text{ Гкал} \approx 1416 \text{ грн} \approx 47,2 \text{ €}$ , а теплопроизводительность системы вычисляется по формуле [5]

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

где  $C_в, T_{извл}, T_{отр}$  – соответственно объемная теплоемкость подземных вод ( $4,2 \text{ МДж/м}^3 \cdot \text{°C}$ ) и их средняя температура до и после использования.

Неопределенность при расчёте по формуле (2) связана с параметром  $T_{отр}$ , для нахождения которого необходимо решение оптимизационной задачи. С одной стороны, снижение температуры циркулирующей воды на дневной поверхности приводит к повышению ее плотности, росту гидростатического давления в нагнетательной скважине (эффект термопресса) и значительному увеличению коэффициента извлечения тепловой энергии. С другой стороны, 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 решить систему уравнений подземной термогидродинамики, что уже было выполнено автором в работе [8].

На рис. 2 приведены рассчитанные ранее изменения температуры воды, отбираемой из добывающей скважины в период работы ГЦС. Анализ графиков показывает значительное уменьшение этого параметра с течением времени. Это свидетельствует о преобладании процесса остывания водоносного горизонта в результате фильтрации отработанных вод над его нагревом геотермальным потоком, что характерно для всех глубин и дебитов скважин. Из полученных результатов также следует, что в различных горно-геологических и

технологических условиях эксплуатации ГЦС 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  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ввиду технологической проблематичности использования воды с более низкой температурой для теплоснабжения зданий.

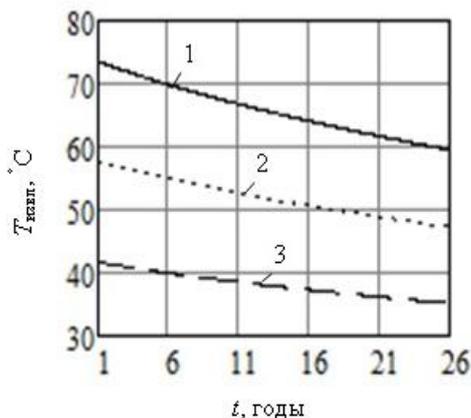


Рисунок 2. Изменение температуры воды, добываемой ГЦС при  $T_{отр} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $Q = 1000\text{ м}^3/\text{сут}$  и  $H$ : 1 – 3 – соответственно 2, 1,5 и 1 км

Однако, получившие в последнее время широкое распространение тепловые насосы позволяют существенно расширить температурный диапазон использования холодных вод с температурой  $4 - 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , применяемых в качестве низкопотенциального источника энергии [9]. Поэтому в последующих расчетах температуру возвратных вод ( $T_{отр}$ ) будем принимать равной  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  как минимум, необходимый для нормальной работы тепловых насосов. Более значительное понижение температуры может привести к заморозке скважин и прекращению работы системы.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3, 4 приведены построенные с помощью формулы (2) и программ Mathcad и Surfer карты прогнозной теплопроизводительности геодинамических систем на территории Украины. Расчеты были выполнены при минимально и максимально возможных дебитах скважин ( $Q_{min}$  и  $Q_{max}$ ) для водонесных горизонтов в диапазоне их залегания от  $H_{min}$  до  $H_{max}$  (табл. 1). Расчетная глубина  $H$  принималась как среднее значение в данном диапазоне, а температура подземных вод до использования  $T_{извл}$  задавалась равной ее величине после года эксплуатации ГЦС [9].

Анализ полученных данных показывает, что максимальная теплопроизводительность ГЦС ( $20 - 30\text{ Гкал/сут}$  при  $H_{min}$ ,  $Q_{min}$  и  $120 - 180\text{ Гкал/сут}$  при  $H_{max}$ ,  $Q_{max}$ ) достигается в районе степного Крыма и Причерноморья, что связано с высокой водообильностью геологических структур и большими значе-

ниями геотермического градиента. В районах с менее благоприятными термодинамическими условиями (Украинский кристаллический щит) теплопроизводительность ГЦС ниже в несколько раз.

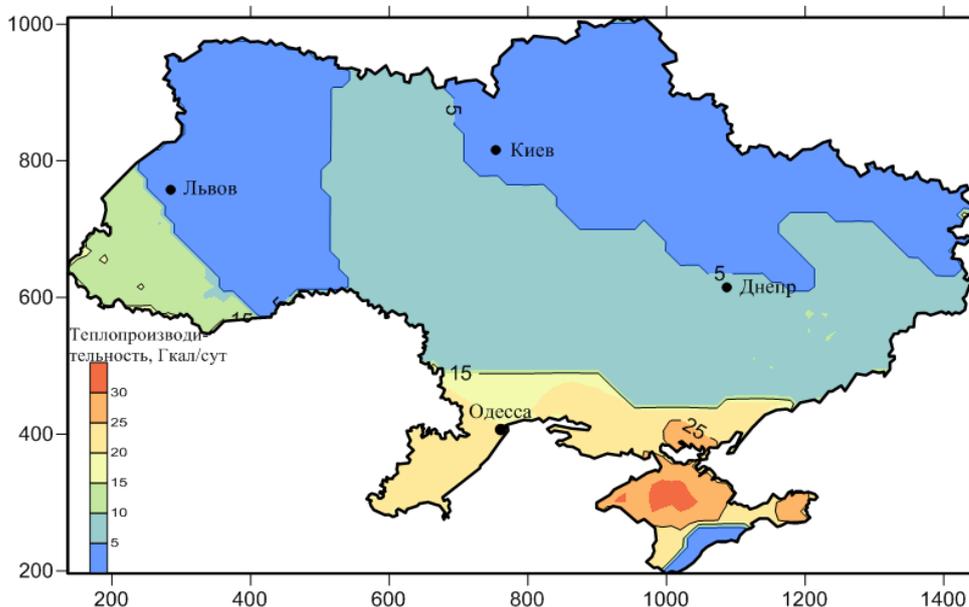


Рисунок 3. Карта прогнозной теплопроизводительности ГЦС на территории Украины ( $H_{min}, Q_{min}$ )

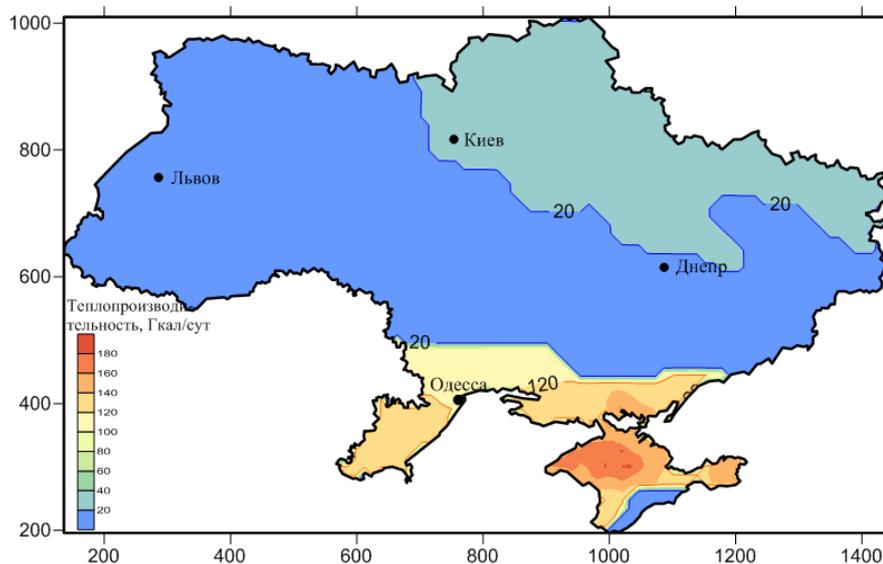


Рисунок 4. Карта прогнозной теплопроизводительности ГЦС на территории Украины ( $H_{max}, Q_{max}$ )

Анализ прогнозируемого изменения прибыли, получаемой от работы ГЦС, (рис. 5) показывает ее существенное снижение со временем, что связано с уменьшением теплового ресурса водоносного горизонта и постепенным

охлаждением циркулирующих вод. Наряду с этим, потенциальная прибыль увеличивается почти в 20 раз с увеличением глубины залегания водоносного горизонта на 100 % и дебита скважины в 10 раз.

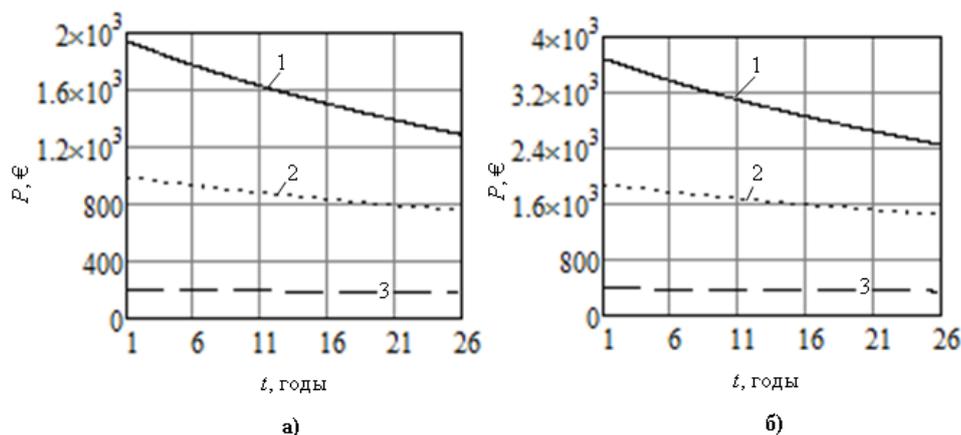


Рисунок 5. Прибыль, получаемая от работы ГЦС при  $H = 1$  км (а) и  $H = 2$  км (б); 1 – 3 – соответственно при  $Q = 1000, 500$  и  $100$  м<sup>3</sup>/сут

Комплексная оценка рентабельности создания и эксплуатации 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 (чистой прибыли), 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]

$$NPV = -C + \frac{P_1}{(1+R)} + \frac{P_2}{(1+R)^2} + \dots + \frac{P_{26}}{(1+R)^{26}} \quad (3)$$

где  $P_1$  – ежегодная прибыль от работы системы ( $P = S_m - S_э$ );  $R$  – норма дисконта.

Уравнение (3) 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.

При расчете чистой дисконтированной стоимости ГЦС по формуле (3) норма дисконта принималась согласно действующей в настоящее время в украинских банках средней депозитной ставки для валюты. Построенные карты (рис. 6, 7) подтверждают рентабельность создания данных систем на

участках с повышенными значениями геотермического градиента с учетом альтернативных вариантов капиталовложения.

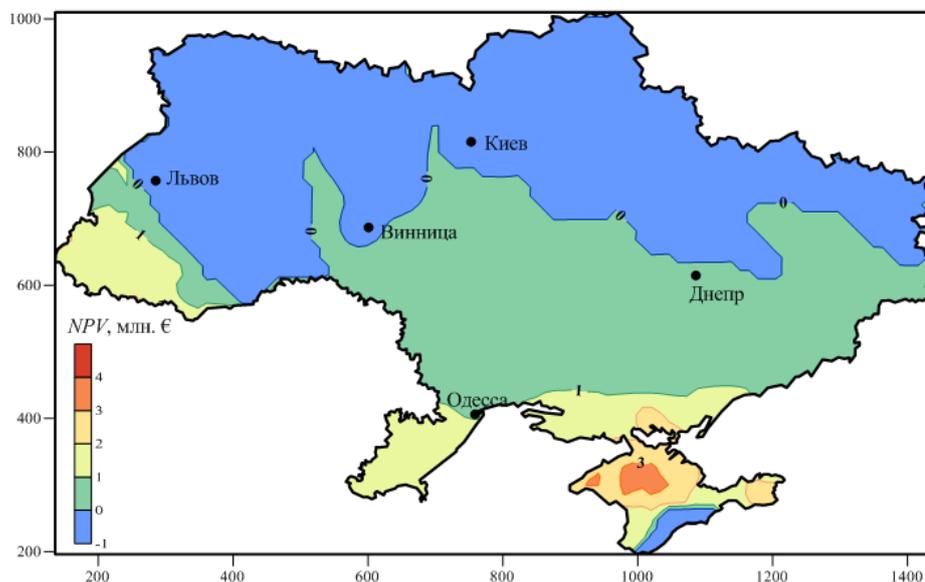


Рисунок 6. Распределение показателя дисконтированной стоимости ГЦС на территории Украины, полученное при  $H_{min}$  и  $Q_{min}$

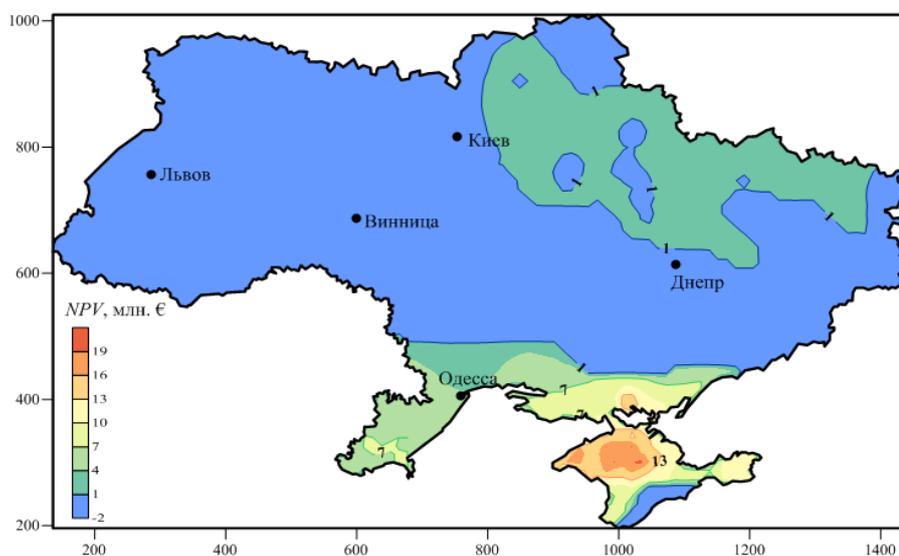


Рисунок 7. Распределение показателя дисконтированной стоимости ГЦС на территории Украины полученное при  $H_{max}$  и  $Q_{max}$

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время в Украине назрела необходимость активной разработки альтернативных источников энергии, в частности, геотермальных, запасы которых значительно превышают ресурсы традиционных энергоносителей.

Ввиду высокой минерализации подземных вод в геологических структурах с 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 предлагаемое использование геоциркуляционных систем (ГЦС), включающее откачку термальных вод на поверхность, отбор тепла из них и обратное нагнетание вод в пласт, решает проблему их утилизации и существенно увеличивает долю извлечения геотермальной энергии.

Даже на территориях со средними величинами теплового потока (Донецкий бассейн) при создании ГЦС на глубине ( $H \approx 1$  км) и циркуляции воды в объеме ( $Q \approx 200$  м<sup>3</sup>/сут) значения  $NPV$  положительны (0,5 – 1 млн €), и инвестор может вкладывать деньги в этот проект. С увеличением глубины залегания пласта-коллектора ( $H \approx 2$  км) и количества циркулирующей воды до значений 1500 м<sup>3</sup>/сут  $NPV$  ГЦС значительно возрастает (1 – 17 млн €).

Данная тенденция наблюдается также при расположении системы на участках с большими значениями теплового потока (Степной Крым, Закарпатье). Полученные результаты позволяют давать предварительный прогноз рентабельности создания ГЦС в различных геолого-гидрогеологических и технологических условиях и могут быть использованы при составлении инвестиционных проектов, бизнес-планов и других предпроектных обоснований, направленных на разработку геотермальных ресурсов.

## 5. ВЫВОДЫ

Построенные по результатам выполненных расчетов карты прогнозной теплопроизводительности ГЦС на территории Украины позволяют выделить наиболее перспективные в техническом отношении участки расположения тепловых станций. Максимальные оценки производительность ГЦС получены для района степного Крыма и Причерноморья (20 – 30 Гкал/сут при глубине залегания водоносного горизонта 1,5 км и дебите 500 м<sup>3</sup>/сут и 120 – 180 Гкал/сут при глубине горизонта 3 км и дебите 1500 м<sup>3</sup>/сут)

Экономическая оценка эффективности ГЦС выполнена путем определения затрат на ее создание и эксплуатацию, а также доходов, получаемых от реализации вырабатываемой ей тепловой энергии. Рассчитанная прибыль от работы системы линейно зависит от дебита скважин и снижается приблизительно в 3 раза с уменьшением геотермического градиента в два раза. Принятый в качестве комплексного международного критерия рентабельности ГЦС показатель чистой дисконтированной стоимости  $NPV$  принимает положительные значения (0,5 – 1 млн €) даже на участках, характеризующихся средними значениями теплового потока ( $q \approx 60$  мВт/м<sup>2</sup>) и дебитами скважин ( $Q \approx 200$  м<sup>3</sup>/сут), а также существенно увеличивается (1 – 17 млн €) с глубиной залегания пласта-коллектора до 2 км. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности вложения капитала в создание геоциркуляционных систем в геолого-гидрогеологических условиях Украины и могут быть использованы при составлении инвестиционных проектов геотермального теплоснабжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко, В.В., Гордиенко, И.В., & Завгородняя, О.В. (2002). *Тепловое поле территории Украины*. К.: Знание Украины, 170 с.
2. Мхитарян, Н.М., & Мачулин, В.Ф. (2006). Проблемы развития энергетики Украины. Возобновляемая и нетрадиционная энергетика. *Наука та інновації*, (2), 63–75.
3. Кутас, Р.И. (2014). Тепловой поток и геотермические модели земной коры Украинских Карпат. *Геофизический журнал*, (6), 3–27.
4. Долінський, А.А., & Ободович, О.М. (2016). Світовий досвід використання геотермальної енергії та перспективи її розвитку в Україні. *Вісник НАН України*, (3), 62–69.
5. Алсахов, А.Б. (2012). *Возобновляемая энергетика*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 256 с.
6. Филатов, С., & Захарченко, Н. (2012). Стоимость скважин глубокого бурения: развитие методического инструмента. *Нефтегазовая вертикаль*, (5), 54–58.
7. Ишлинский, А.Ю. (1989). *Политехнический словарь*. М.: Советская энциклопедия, 656 с.
8. Sadovenko, I., Rudakov, D., & Inkin O. (2017). The Prospects of Thermal Water Exploration in Ukraine. *Advanced Engineering Forum*, Vol. 25, 28–34.
9. Fleuchaus, P., & Blum, P. (2017). Damage event analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Geotherm Energy*, (5), 1–15.
10. Гидулянов, В.И., & Хлопотов, А.Б. (2003). *Анализ методов оценки капитальных вложений*. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 78 с.

## REFERENCES

1. Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., & Zavgorodnyaya, O.V. (2002). *Teplovoe pole territorii Ukrainy*. K.: Znanie Ukrainy, 170 s.
2. Mkhitaryan, N.M., & Machulin, V.F. (2006). Problemy razvitiya energetiki Ukrainy. Vozobnovlyаемaya i netraditsionnaya energetika. *Nauka ta innovacii'*, (2), 63–75.
3. Kutas, R.I. (2014). Teplovoy potok i geotermicheskie modeli zemnoy kory Ukrain-skikh Karpat. *Geofizicheskiy zhurnal*, (6), 3–27.
4. Dolins'kyj, A.A., & Obodovych, O.M. (2016). Svitovyj dosvid vykorystannja geotermal'noi' energii' ta perspektyvy ii' rozvytku v Ukrai'ni. *Visnyk NAN Ukrai'ny*, (3), 62–69.
5. Alsakhov, A.B. (2012). *Vozobnovlyаемaya energetika*. M.: FIZMATLIT, 256 s.
6. Filatov, S., & Zakharchenko, N. (2012). Stoimost' skvazhin glubokogo bureniya: razvitie metodicheskogo instrumenta. *Neftegazovaya vertikal'*, (5), 54–58.
7. Ishlinskiy, A. Yu. (1989). *Politekhnicheskii slovar'*. M.: Sovetskaya entsiklopediya, 656 s.
8. Sadovenko, I., Rudakov, D., & Inkin O. (2017). The Prospects of Thermal Water Exploration in Ukraine. *Advanced Engineering Forum*, Vol. 25, 28–34.
9. Fleuchaus, P., & Blum, P. (2017). Damage event analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Geotherm Energy*, (5), 1–15.
10. Gidulyanov, V.I., & Khlopotov, A.B. (2003). *Analiz metodov otsenki kapital'nykh vlozheniy*. M.: Izd-vo Mosk. gos. un-ta, 78 s.

**ABSTRACT (IN UKRAINIAN)**

**Мета роботи.** Районування та картування території України за потенційною продуктивністю геотермальних систем теплопостачання будівель та рентабельності їх експлуатації на основі сучасних інвестиційних критеріїв.

**Методика.** Виконані економічні та термогідродинамічні розрахунки за оцінкою потенційної теплопродуктивності та чистої дисконтної вартості (*NPV*) систем теплопостачання будинків з урахуванням геологічних особливостей території України. Оцінка ефективності використання геоциркуляційних систем (ГЦС) виконана з урахуванням відкачування води на земну поверхню, вилучення тепла та повторного закачування охолодженої води в резервуар.

**Результати.** Визначені параметри водоносних горизонтів розташованих у межах Закарпатського прогину, Волино-Подільської плити, Дніпровсько-Донецької та Причорноморської западини які характеризуються підвищеним значеннями геотермального градієнта та є перспективними для освоєння термальних вод. Зокрема, виконана оцінка діапазону глибин відбору та очікуваного дебіту термальних вод. Ці данні використовувались для створення карт потенційної теплопродуктивності ГЦС на території України.

**Наукова новизна.** На основі встановлення теплопродуктивності ГЦС була виконана економічна оцінка рентабельності їх експлуатації з використанням параметру *NPV* в якості основного критерію. Використання ГЦС дозволяє збільшити роль геотермальних ресурсів в енергетичному балансі деяких регіонів, оскільки ці системи дозволяють відбирати тепло від нагрітих водоносних гірських порід.

**Практична значимість.** Створені карти дозволяють визначити найбільш перспективні території для інвесторів з точки зору геотехнічної та гідрогеологічної можливості розташування геотермальних систем. Максимальна ефективність ГЦС очікується у північному Криму та Причорноморському регіоні (20 – 30 Гкал/добу на глибині 1,5 км при дебіті 500 м<sup>3</sup>/добу та 120 – 180 Гкал/добу на глибині 3 км при дебіті 1500 м<sup>3</sup>/добу). Параметр *NPV* досягає позитивних значень 0,5 – 1 млн євро навіть у районах із середнім тепловим потоком ( $\approx 60$  мВт/м<sup>2</sup>) та дебітом свердловини 200 м<sup>3</sup>/добу.

**Ключові слова:** термальні води, геоциркуляційна система, теплопродуктивність, чиста дисконтна вартість, районування

**ABSTRACT (IN RUSSIAN)**

**Цель.** Районирование и картирование территории Украины по потенциальной производительности геотермальных систем теплоснабжения зданий и рентабельности их эксплуатации на основе современных инвестиционных критериев.

**Методика.** Выполнены экономические и термогидродинамические расчеты по оценке потенциальной теплопродуктивности и чистой дисконтированной стоимости (*NPV*) систем теплоснабжения зданий с учетом геологических особенностей территории Украины. Оценка эффективности использования геоциркуляционных систем (ГЦС) выполнена с учетом откачки воды на земную

поверхность, извлечения тепла и повторной закачки охлажденной воды в резервуар.

**Результаты.** Определены параметры водоносных горизонтов расположенных в пределах Закарпатского прогиба, Вольно-Подольской плиты, Днепровско-Донецкой и Причерноморской впадины которые характеризуются повышенными значениями геотермального градиента и являются перспективными для освоения термальных вод. В частности, выполнена оценка диапазона глубин отбора и ожидаемого дебита термальных вод. Эти данные использовались для создания карт потенциальной теплопродуктивности ГЦС на территории Украины.

**Научная новизна.** На основе установления тепловой мощности ГЦС была выполнена экономическая оценка рентабельности их эксплуатации с использованием параметра *NPV* в качестве основного критерия. Использование ГЦС позволяет увеличить роль геотермальных ресурсов в энергетическом балансе некоторых регионов, поскольку эти системы позволяют отбирать тепло от нагретых водоносных горных пород.

**Практическая значимость.** Созданные карты позволяют определить наиболее перспективные территории для инвесторов с точки зрения геотехнической и гидрогеологической возможности расположения геотермальных систем. Максимальная эффективность ГЦС ожидается в северном Крыму и Причерноморском регионе (20 – 30 Гкал/сут на глубине 1,5 км при дебите 500 м<sup>3</sup>/сут и 120 – 180 Гкал/сут на глубине 3 км при дебите 1500 м<sup>3</sup>/сут). Параметр *NPV* достигает положительных значений 0,5 – 1 млн евро даже в районах со средним тепловым потоком ( $\approx 60$  мВт/м<sup>2</sup>) и дебитом скважины 200 м<sup>3</sup>/сут.

**Ключевые слова:** термальные воды, геодирекционная система, теплопроизводительность, чистая дисконтированная стоимость, районирование

## ABOUT AUTHORS

Inkin Oleksandr, Doctor of Technical Science, Professor of Department of Hydrogeology and Engineering geology Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005. Institute for Physics of the Mining Processes of National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: inkin@ua.fm.