

УДК 622.51:622.817.4

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.229>

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОД ШАХТЫ «СТАШКОВА» ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

<sup>1</sup>Садовенко И.А., <sup>1</sup>Инкин А.В., <sup>1</sup>Деревягина Н.И., <sup>1</sup>Хрипливец Ю.В.

*Национальный технический университет «Днепровская политехника»*

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА І ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОД ШАХТИ «СТАШКОВА» ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ БУДІВЕЛЬ

<sup>1</sup>Садовенко І.О., <sup>1</sup>Інкін О.В., <sup>1</sup>Дерев'ягіна Н.І., <sup>1</sup>Хрипливець Ю.В.

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*

## TECHNICAL-ECONOMICAL AND ECOLOGICAL ESTIMATION OF EFFECTIVENESS OF USAGE OF WATER OF "STASHKOV" MINE FOR HEAT SUPPLY OF BUILDINGS

<sup>1</sup>Sadovenko I.A., <sup>1</sup>Inkin A.V., <sup>1</sup>Dereviahina N.I., <sup>1</sup>Hryplyvec Ju.V.

*National Technical University "Dnipro Polytechnic"*

**Аннотация.** Целью работы является обоснование экономически эффективной технологической схемы освоения теплового ресурса шахты «Сташкова» после её закрытия, обеспечивающей поддержание благоприятного энергетического и эколого-гидрогеологического режима в регионе. Применён комплексный подход, включающий сбор, систематизацию и анализ фактических данных о фильтрационных и физико-механических свойствах вмещающих пород и горнотехнических условиях разработки пластов, влияющих на формирование природно-техногенных месторождений, а также аналитические и численные методы решения уравнений теплопереноса при работе геомодуля в различных условиях. Обоснована геотехнологическая схема экологически безопасного использования шахтных вод, предполагающая откачку вод на поверхность, отбор тепла и обратное их нагнетание в пласты. Предложенная циркуляционная система характеризуется повышенным энергетическим балансом, так как с её помощью извлекается практически всё тепло подземных вод, а также часть тепла вмещающих пород. С целью оценки эффективности применения данной технологии, в программном комплексе Mathcad произведены расчёты использования шахтных вод в качестве источника низкопотенциальной энергии в тепловых насосах в сравнении с другими альтернативными вариантами (грунтовые воды и поверхностные водотоки), и установлено, что это даёт их большие коэффициенты преобразования (5,2-5,8 при  $T_2 = 50$  °С и 3,2-3,9 при  $T_2 = 70$  °С). Разработана геотехнологическая схема использования шахтных вод, учитывающая перенос тепла, направление фильтрации, скорость и температуру подземных вод при нагнетании и отборе теплоносителей из водоносного горизонта для отопления и охлаждения зданий. Исследован механизм теплоотбора в затопленном горном массиве ликвидируемой шахты с обоснованием экологически безопасного использования шахтных вод. Проведённые исследования позволили обосновать параметры эксплуатации экономически целесообразной геотехнологической схемы, позволяющей стабилизировать энергопотребление и экологическую ситуацию в угледобывающих регионах путём комбинации в едином модуле технологий по выработке тепловой энергии, дренажированию шахт, регулированию водного режима и очистке шахтных вод.

**Ключевые слова:** термальный водоносный горизонт; гециркуляционная система; тепловая энергия; чистая дисконтированная стоимость

**Введение.** В соответствии с разными программами реструктуризации угольной отрасли, количество запланированных к ликвидации шахт в Украине постоянно увеличивается. Согласно оценкам на её территории в ближайшее время появятся значительное количество закрытых шахт несущих значительную угрозу окружающей среде и требующих существенных расходов на поддержание их гидродинамической безопасности и ликвидацию вынужденной безработицы [1, 2]. Так, например, закрытие в 2021 году расположенной в Западном Донбассе шахты им. Н.И. Сташкова приведёт к затоплению отработанного

пространства и угрозе стремительного подъёма уровня шахтных вод к дневной поверхности [3]. Кроме того, множество близлежащих населённых пунктов на фоне постоянно растущих цен на энергоносители, станут ощущать острую нехватку в тепловой энергии. Вместе с тем, в затопленных горных выработках будут сосредоточены значительные ресурсы шахтных вод с температурой до 20 °С, которые в настоящее время практически не используются.

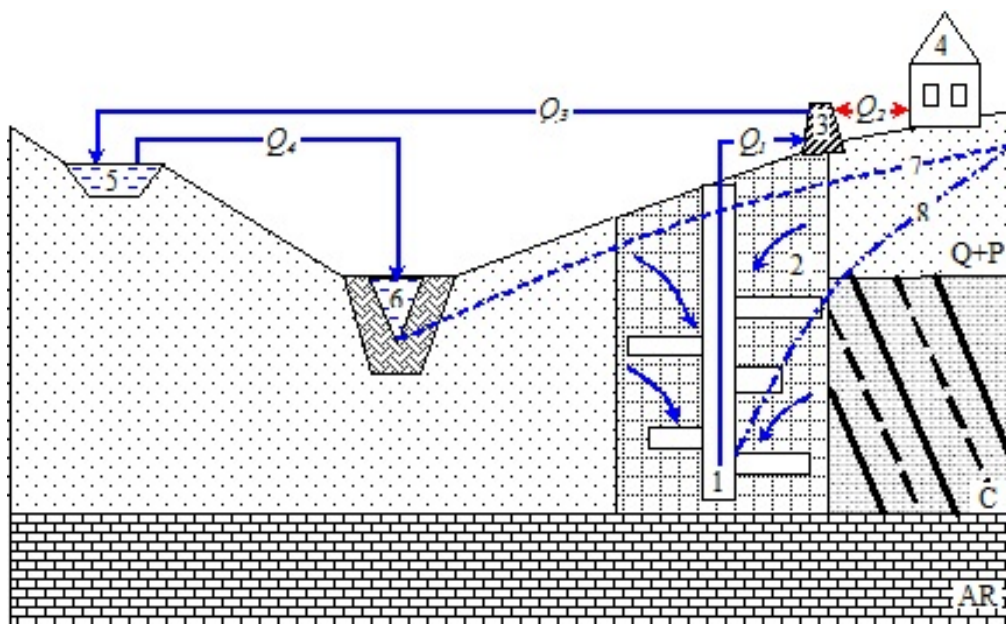
Зарубежный научно-практический опыт освоения тепла вод из затопленных горных выработок [4, 5] показывает возможность применения и рентабельность этой технологии. В настоящее время осуществляется множество локальных проектов, в которых тепло воды ликвидированных шахт употребляется для обогрева одно-двухэтажных зданий (Германия, Франция, Англия). Наиболее масштабным считается голландский проект, который получил название MinewaterProject. В г. Херлен вода шахты, простоявшей затопленной почти 30-ти лет, сейчас обогревает район с 350 зданиями, из которых более 200 – жилые дома. Вместе с тем, отбор шахтных вод сопряжён с техническими трудностями связанными, прежде всего, с высокой минерализацией вод и наличием в них различных веществ, что требует применения специального оборудования и организации экологически безопасного цикла использования воды.

Рентабельность применения тёплых шахтных вод для отопления и горячего водоснабжения резко возрастает при использовании тепловых насосов. Так, на шахте «Благодатная» ОАО «Павлоградуголь ДТЭК» отбор шахтных вод в количестве 200 м<sup>3</sup>/ч с коэффициентом преобразования тепла 3,5 обеспечил годовую экономию около 60 тыс. долларов США [6]. При этом работа насоса не создаёт вредных выбросов в окружающую среду, что особенно важно для угледобывающих регионов. Однако, применение тепловых насосов на шахтах не получило широкого распространения в виду больших капитальных затрат на их установку и обслуживание. В связи, с чем целью данной работы является обоснование экономически эффективной технологической схемы освоения теплового ресурса шахты «Сташкова» после её закрытия обеспечивающей поддержание благоприятного энергетического и эколого-гидрогеологического режима в регионе.

**Изложение основного материала исследований.** При разработке технологической схемы по использованию тепла шахтных вод необходимо иметь в виду, что после закрытия шахты и её затопления фильтрационные потоки в породном массиве будут характеризоваться увеличением скорости и выполаживанием уровней вблизи природных русел за счёт многократного увеличения проницаемости нарушенных горных пород. Это приведёт к подтоплению и проседанию дневной поверхности. Природными руслами будут дренироваться потоки низкопотенциального тепла из техногенного водоносного горизонта, содержащего экологически вредные компоненты. В связи с чем, целесообразно производить отбор тепла шахтных вод в сочетании с технологиями по их очистке, которые экономически более эффективны именно при наличии бросового низкопотенциального тепла.

Основные элементы предлагаемой технологической схемы представлены на рис. 1, исходя из которой, для предотвращения подтопления территории вокруг шахты необходим систематический отбор вод из затопленных горных

выработок разных горизонтов с помощью водозаборных скважин. При этом максимальная эффективность работы скважин достигается путём совмещения их стволов с магистральными выработками. Подъём вод на дневную поверхность осуществляется с помощью электроцентробежных насосов (General Electric, Centrilift, Новомет и др.), применение которых 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 10000 м<sup>3</sup>/сут).



1 – горные выработки; 2 – отработанный угольный массив; 3 – тепловой насос; 4 – здание; 5 – пруд-накопитель; 6 – поверхностный водоток; 7, 8 – уровень шахтных вод до и после их откачки на дневную поверхность;  $Q_1 - Q_4$  – соответственно расход шахтных вод из выработок, теплоносителя из насоса, отработанных вод в пруд-отстойник и отстоявшихся вод в реку

Рисунок 1 – Технологическая схема геомодуля по освоению тепла шахтных вод

После поступления вод на дневную поверхность они направляются в межтрубное пространство испарителя теплового насоса, где используются в качестве низкопотенциального источника тепловой энергии и охлаждаются за счёт кипения в трубном пространстве испарителя хладона (рабочего тела, которым являются низкокипящие фторхлорсодержащие углеводороды). Хладон постоянно циркулирует в замкнутом контуре насоса, претерпевая изменения агрегатного состояния в его аппаратах и перенося теплоту от возобновляемого источника шахтных вод к потребителю теплоты среднего потенциала за счёт затраты энергии высокого потенциала в компрессоре. При этом для работы центробежного и теплового насоса затрачивается электроэнергия, количество которой пропорционально мощности теплового потока идущего на обогрев зданий. Охладившиеся, в результате отдачи тепловой энергии испарителю насоса, шахтные воды поступают в пруды-накопители расположенные в балках Косьминная, Свидовок и Таранова, откуда они сбрасываются в р. Самара. Необходимо отметить, что для

снижения влияния шахтных вод на качество воды в реке их сброс должен производиться порционно в зависимости от гидрогеологического режима реки.

Предложенная технологическая схема использования шахтных вод обладает рядом очевидных экологических (предотвращения подтопления территории, снижение воздействия на окружающую среду) и энергетических (отопление зданий) преимуществ. Однако для её внедрения необходимо выполнить технико-экономическое обоснование эффективности работы схемы, задачи которого состоят в следующем:

- оценить максимально возможный тепловой поток, возникающий при отборе подземных вод с различных горизонтов шахты;
- определить коэффициент преобразования тепловых насосов в зависимости от температуры шахтных вод;
- выполнить сравнительный анализ использования шахтных вод в тепловых насосах с другими видами природных низкопотенциальных источников тепловой энергии;
- путём определения затрат электроэнергии на работу центробежного и теплового насоса, а также стоимости вырабатываемого ими тепла, установить прибыль получаемую от работы предложенного геомодуля;
- количественно оценить предотвращение выбросов CO<sub>2</sub> за счёт применения тепловых насосов.

Для решения поставленных задач необходимо определить температуру вод сосредоточенных в горных выработках различных горизонтов шахты «Сташкова». При этом в первом приближении можно принять, что гидродинамические параметры пластов не зависят от процессов теплопереноса [7], а температура воды и температура скелета пород совпадают в каждой точке. Считаем, что в пределах шахтного поля движение шахтных вод осуществляется по затопленным выработкам, теплообмен в расчётной плоскости отсутствует [8], ось  $H$  направлена вниз. Снизу, из глубины, в обводнённые горные выработки поступает тепловой поток  $q$ , вызванный выделением тепла в земных недрах. Сверху, ниже 10 м от дневной поверхности, залегает нейтральный слой пород, температура которого постоянна и равна среднегодовой температуре в регионе (+9 °C). При данных условиях дифференциальное уравнение теплопроводности относительно оси  $H$  с учётом конвекции имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial H^2} - \frac{V}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial H} = 0, \quad (1)$$

при следующих граничных условиях

$$\begin{aligned} T &= T_1 \text{ при } H = H_1; \\ q &= -\lambda \partial T / \partial H \text{ при } H = H_2. \end{aligned}$$

Общее решение уравнения (1) при заданных граничных условиях имеет вид [9]

$$T = T_1 + \frac{q}{\lambda B} \left[ \exp B(H - H_2) - \exp B(H_1 - H_2) \right]; \quad B = \frac{V}{a}. \quad (2)$$

При этом тепловой поток шахтных вод, содержащихся в затопленных выработках, определяется из выражения

$$Q = CQ_1(T - T_{omp}), \quad (3)$$

где  $T_1, H_1$  – температура и расстояние до нейтрального слоя;  $H$  – глубина залегания;  $a, \lambda$  – температуропроводность и теплопроводность водонасыщенных пород;  $V$  – вертикальная скорость фильтрации;  $q$  – тепловой поток из земных недр;  $C, T, T_{omp}$  – объёмная теплоёмкость и температура шахтных вод до и после использования соответственно.

В таблице показана рассчитанная по формулам (2) – (3) температура и естественный тепловой потенциал шахтных вод, содержащихся в горных выработках. Согласно полученным данным, тепловой поток возрастает с увеличением глубины залегания пластов и количества отбираемой воды. При этом суммарный тепловой потенциал шахты «Сташкова» составляет 1,72 ТДж/сут. Необходимо отметить, что для соблюдения гидродинамического равновесия, расход шахтных вод принимался равным прогнозируемому притоку воды в каждый угольный пласт, определенному ранее с помощью математического моделирования [10]. Глубина залегания пласта бралась как среднее значение интервала его разработки. Теплофизические свойства горных пород задавались характерными для условий Западного Донбасса:  $q = 54$  Дж/сут·м<sup>2</sup>;  $C_6 = 4187$  кДж/м<sup>3</sup>;  $\lambda_{cp} = 245$  кДж/м·сут·°С;  $a_{cp} = 0,05$  м<sup>2</sup>/сут;  $T_1 = 9$  °С;  $T_{omp} = 5$  °С;  $H_1 = 10$  м.

При оценке эффективности работы предложенного геомодуля необходимо выполнить расчёт коэффициента преобразования теплового насоса при использовании шахтных вод. Данный показатель представляет собой отношение его теплопроизводительности к потребляемой им электроэнергии и определяется из следующего выражения

$$K_T = h \cdot \frac{T_2}{T_2 - T_3}, \quad (4)$$

где  $h$  – коэффициент термодинамического совершенства насоса;  $T_2, T_3$  – температура конденсации (потребителя тепла) и испарения хладагента (источника низкопотенциальной энергии),  $K$ .

Таблица – Температура и тепловой потенциал вод, находящихся в горных выработках шахты «Сташкова»

Пласт	Средняя глубина залегания, м	Водоприток, м <sup>3</sup> /сут	Температура шахтных вод, °С	Тепловой поток, ТДж/сут
$C_{10}^6$	125	9600	12,45	0,30
$C_8^6$	175	4800	13,95	0,18
$C_6^n$	240	3240	15,90	0,15
$C_5$	270	22000	16,80	1,09

Для определения по формуле (4)  $K_T$  теплового насоса, использующего в качестве низкопотенциального источника тепловой энергии шахтную воду с определенного пласта, необходимо задаться её температурой (таблица), коэффициентом термодинамического совершенства насоса (принимаемым равным 0,6) и температурой потребителя тепла (температура горячей воды, поступающей в

систему теплоснабжения, от 50 до 70 °С в зависимости от наружного воздуха). Научно-практический интерес вызывает также выполнение сравнительного анализа использования шахтных вод в тепловых насосах с другими видами низкопотенциальных источников тепловой энергии (грунтовых вод и природных водных потоков). Для этого в программном комплексе Mathcad были построены графики (рис. 2) изменения  $K_T$  в зависимости от вида источника и температуры потребителя тепла. В выполненных расчётах приняты следующие параметры – в отопительный период температура грунта и водных водоёмов равна 9 и 5 °С соответственно.

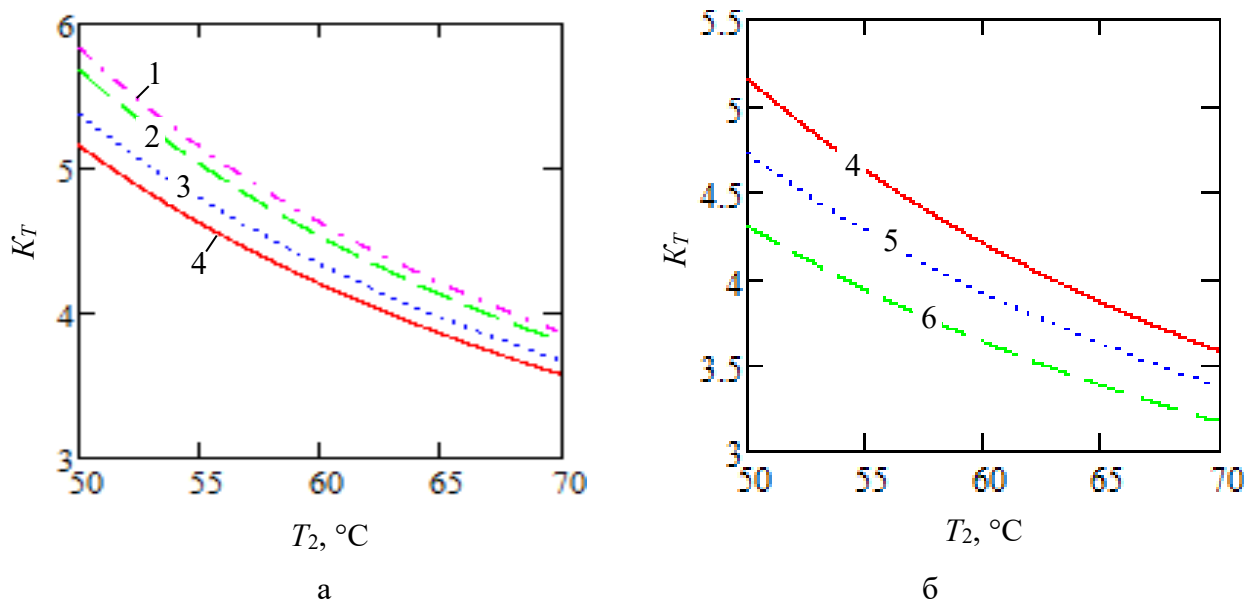


Рисунок 2 – Сопоставление коэффициента преобразования теплового насоса при использовании в качестве низкопотенциального источника энергии: 1 – 6 соответственно шахтных вод пласта  $C_5$ ,  $C_6^n$ ,  $C_8^g$ ,  $C_{10}^g$ , грунта и поверхностных водоёмов

Анализ полученных данных показывает увеличение коэффициента преобразования теплового насоса с ростом глубины отбора шахтных вод, а также его уменьшение с увеличением температуры подающегося потребителю теплоносителя. Это свидетельствует о повышении  $K_T$  при сокращении разности температур источника и потребителя тепла ( $T_2 - T_3$ ), и соответственно его уменьшении при увеличении этой разности. Данное обстоятельство однозначно подтверждает преимущество использования шахтных вод в тепловых насосах в сравнении с другими природными источниками низкопотенциальной энергии.

С целью установления эффективности работы теплового насоса для отопления зданий, помимо определения коэффициента преобразования необходимо вычислить расход потребляемой им электроэнергии, а также её стоимость. Для этого могут быть использованы следующие выражения

$$N_{\text{м.н.}} = \frac{Q_2}{K_T}; S_{\text{м.н.}} = N_{\text{м.н.}} \cdot T_3 \quad (5, 6)$$

где  $N_{\text{м.н.}}$ ,  $S_{\text{м.н.}}$  – электроэнергия, потребляемая для привода теплового насоса и её стоимость,  $T_3$  – действующий тариф на электроэнергию для предприятий (1 кВт·ч = 1,76 грн).

На рис. 3 приведены результаты расчётов по формулам (5) и (6). Их анализ показывает, что количество электроэнергии потребляемой тепловым насосом увеличивается с ростом разности температур источника и потребителя тепла, а также с количеством используемых шахтных вод.

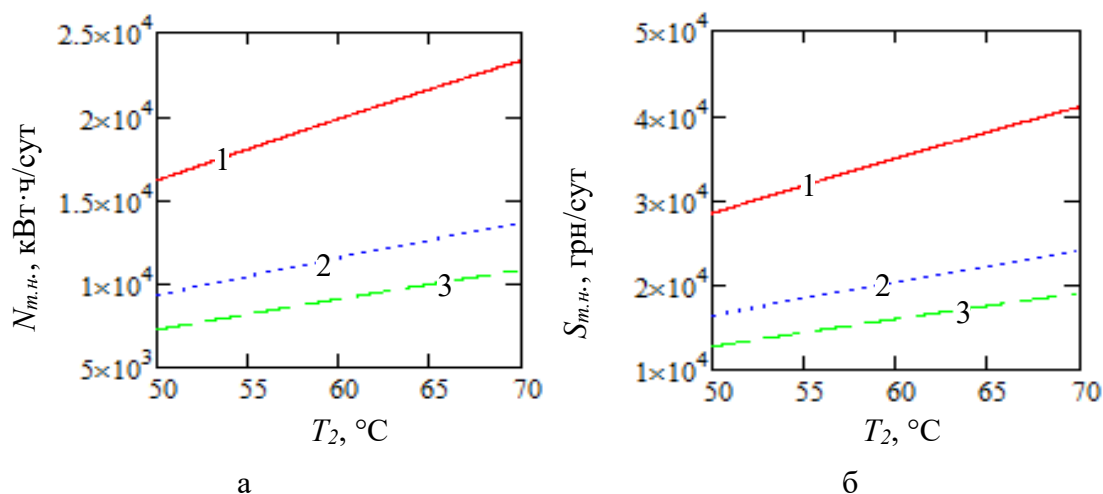


Рисунок 3 – Расход (а) и стоимость (б) электроэнергии потребляемой тепловым насосом при использовании: 1 – 3 соответственно шахтных вод пласта  $C_{10}^8$ ,  $C_8^8$  и  $C_6^8$

К затратной части геомодуля следует также отнести электроэнергию потребляемую центробежным насосом для отбора шахтных вод из горных выработок. При этом для определения её количества может быть использовано следующее выражение [11]

$$N = \kappa_z \frac{gQ_1 H \rho_v}{\eta_n \eta_p}, \quad (7)$$

где  $\kappa_z$  – коэффициент запаса, принимаемый в зависимости от двигателя насоса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $Q_1$  – дебит скважины;  $H$  – глубина залегания пласта;  $\rho_v$  – плотность воды;  $\eta_n, \eta_p$  – КПД насоса и передачи теплоносителя.

Необходимо отметить, что затраты на работу геомодуля ( $Z$ ) определяются как сумма стоимости электроэнергии обеспечивающей работу центробежного и теплового насоса, а прибыль ( $P$ ) – как разница между стоимостью вырабатываемой геомодулем тепловой энергии и затрачиваемой насосами электрической. На рис. 4 приведены значения этих показателей. При выполнении расчётов принимались действующие в настоящее время в Украине тарифы на тепловую энергию (4,18 ГДж  $\approx$  1416 грн).

Как видно из полученных результатов, прибыль от работы геомодуля оценивается величиной десятки тысяч гривен в сутки, что весьма эффективно в современных реалиях Украины. Однако необходимо иметь в виду, что полученные результаты носят ориентировочный характер и не учитывают первоначальные капитальные затраты на бурение скважин (в условии их отсутствия на шахтном поле) и промышленное оборудование (центробежные и тепловые насосы, системы теплоснабжения и т.д.). Вместе с тем, они могут быть использованы при составлении инвестиционных проектов и бизнес-планов направленных на альтернативные системы теплоснабжения зданий.



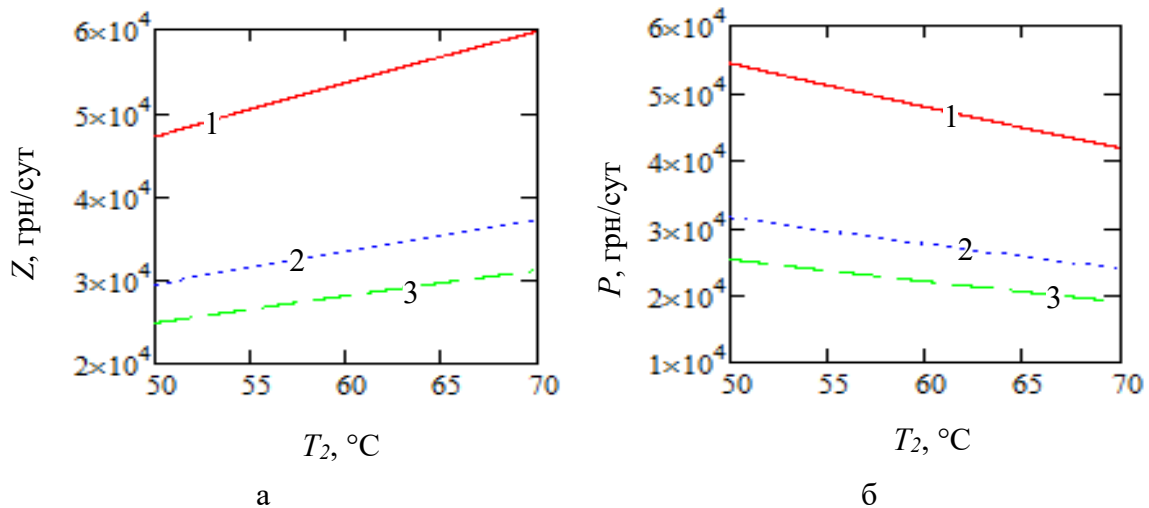


Рисунок 4 – Суммарные затраты на электроэнергию (а) обеспечивающую работу геомодуля и прибыль (б) получаемая от его работы. Обозначения см. рис. 3

Научно-практический и экономический интерес представляет построение комплексных графиков величины прогнозируемой прибыли, при работе предложенного геомодуля. Для этого, на рис. 5 приведено изменения этого параметра в зависимости от количества отбираемых с глубины 200 м шахтных вод и температуры потребителя тепла, а на рис. 6 значение этого же показателя в зависимости от глубины отбора и температуры потребителя при дебите скважины  $5000 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

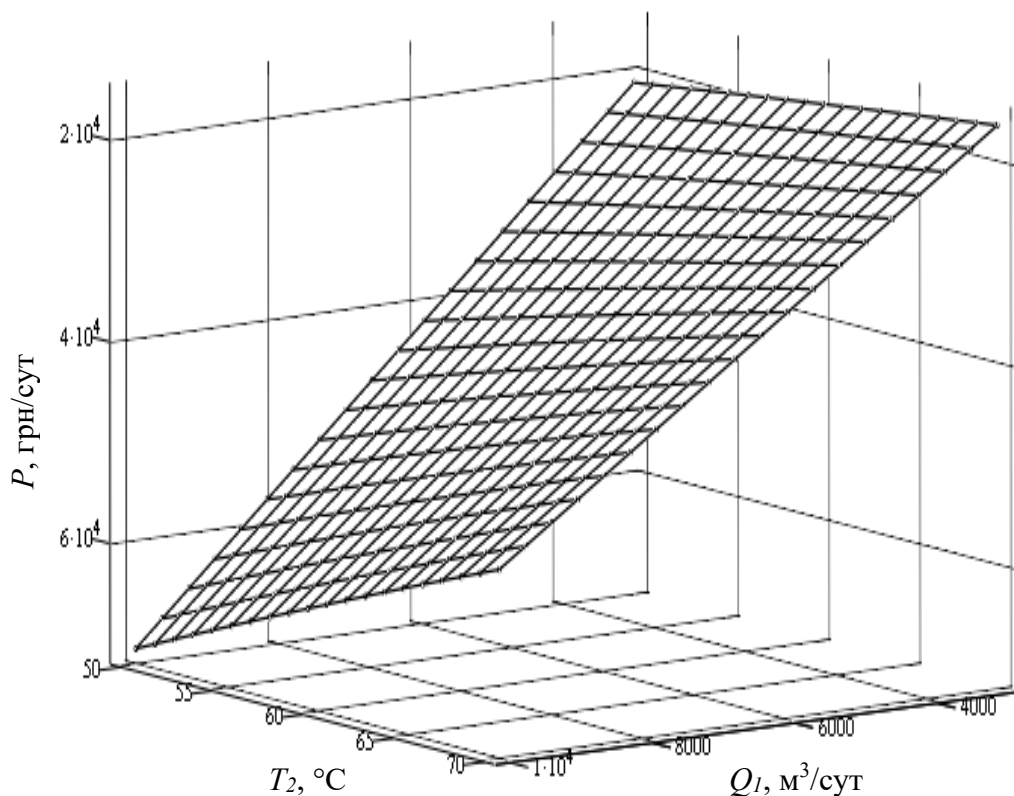


Рисунок 5 – Прогнозируемая прибыль от работы геомодуля в зависимости от количества откачиваемых шахтных вод и температуры потребителя тепла

Согласно обозначенным в данной работе задачам, помимо экономических показателей предложенного геомодуля, необходимо определить экологическую



целесообразность его применения. Это может быть выполнено путём установления предотвращения выбросов  $\text{CO}_2$  при использовании для отопления зданий тепловых насосов вместо традиционных энергоносителей (уголь, нефтепродукты и природный газ). Для решения поставленной задачи, воспользуемся методикой расчётов выбросов парниковых газов [12], согласно которой расчёт выбросов  $\text{CO}_2$  (т/сут) для каждого вида топлива производится по формуле

$$E = Q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (8)$$

где  $K_1$  – коэффициент окисления углерода в топливе (уголь – 0,98, нефтепродукты – 0,99, газ – 0,995);  $K_2$  – коэффициент выбросов углерода (уголь – 25,58 т/Дж, нефтепродукты – 20,84 т/Дж, газ – 15,04 т/Дж);  $K_3$  – коэффициент пересчёта углерода в углекислый газ (3,66).

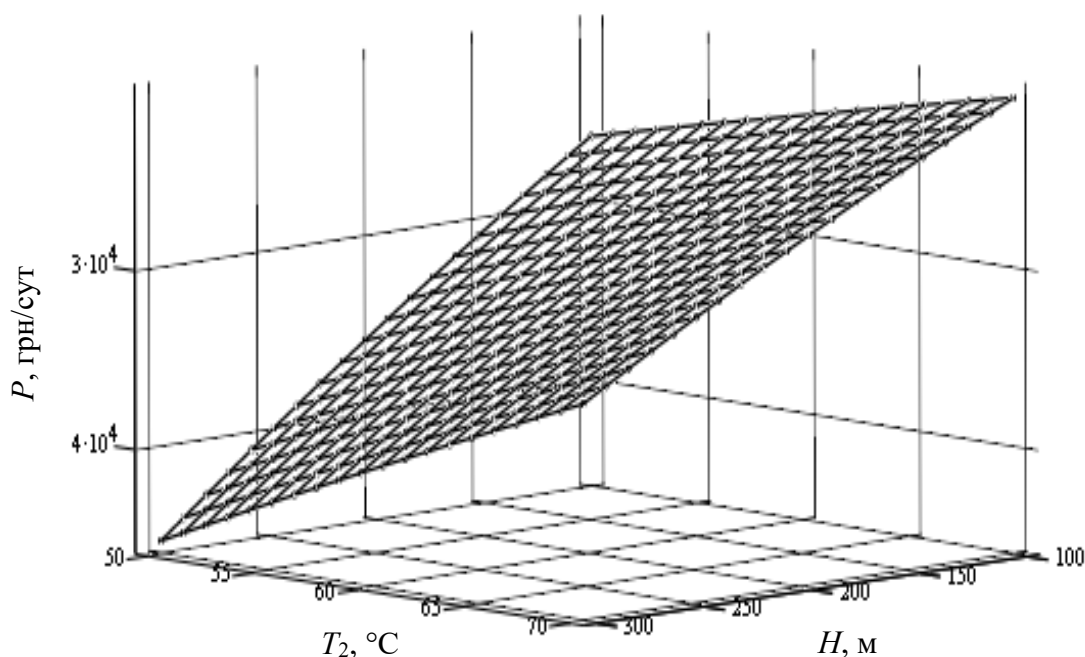


Рисунок 6 – Прогнозируемая прибыль от работы геомодуля в зависимости от глубины отбора шахтных вод и температуры потребителя тепла

На рис. 7 приведены результаты расчётов выполненных по формуле (8). При этом сокращение выбросов  $\text{CO}_2$  определено как для суточного периода времени (а) так и для всего отопительного сезона (б, ноябрь – март  $\approx 150$  суток). Анализ полученных данных показывает, что количество сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  в значительной степени зависит от расхода шахтных вод и принимаемого в качестве альтернативы источника теплоснабжения. В среднем при работе геомодуля на шахте «Сташкова» на полную мощность (при использовании для отопления шахтных вод со всех 4 пластов) эта величина будет составлять 120 т/сут, что соответствует предотвращению поступления в атмосферу 18000 тонн  $\text{CO}_2$  на протяжении отопительного сезона и однозначно свидетельствует об экологической целесообразности предложенной геотехнологии.

**Выводы.** Анализ работы топливно-энергетического комплекса и сложившаяся экологическая ситуация в угледобывающих регионах Украины указывает на необходимость консервации отработанных и нерентабельных шахт. Основные возникающие при этом проблемы связаны с регулированием уровня

подземных вод, как на ликвидируемых, так и на соседних с ними работающих шахтах. Кроме того, в районах угольных предприятий после закрытия шахт ограниченность запасов других видов природных энергоносителей приводит к прекращению отопления зданий и необходимости поиска альтернативных источников тепловой энергии. Вместе с тем закрытые шахты обладают её значительным техногенным ресурсом, сосредоточенным в шахтных водах.

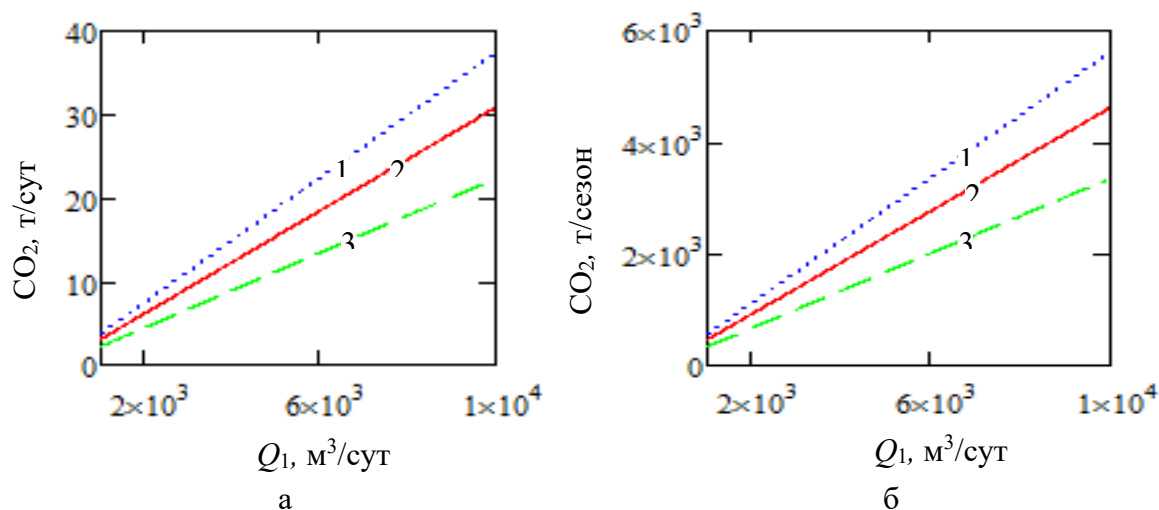


Рисунок 7 – Предотвращение выбросов CO<sub>2</sub> в сутки (а) и сезон (б) при работе геомодуля в сравнении с другими альтернативными вариантами теплоснабжения: 1 – 3 – углём, нефтепродуктами и природным газом

С целью комплексного использования теплового ресурса вод из затопленных горных выработок в работе обоснована геотехнологическая схема, позволяющие экономически целесообразно стабилизировать энергопотребление и экологическую ситуацию в угледобывающих регионах путём комбинации в едином модуле технологий по выработке тепловой энергии, дренированию шахт, регулированию водного режима и очистке шахтных вод. В соответствии с проведёнными в программном комплексе Mathcad расчётами использования шахтных вод в качестве источника низкопотенциальной энергии в тепловых насосах в сравнении с другими альтернативными вариантами (грунтовые воды и поверхностные водотоки) даст их большие коэффициенты преобразования (5,2-5,8 при  $T_2 = 50$  °С и 3,2-3,9 при  $T_2 = 70$  °С).

Оценка экономической эффективности предложенной геотехнологической схемы была выполнена путём определения прибыли от её эксплуатации. Данный показатель рассчитывался как разность между стоимостью вырабатываемой геомодулем тепловой энергии и потребляемой электрической (центробежным и тепловым насосом). Установлено, что прибыль от работы геомодуля, в зависимости от горизонта отбора шахтных вод и температуры потребителя тепла, изменяется от 20 до 55 тыс. грн в сутки. Кроме того, использование данного геомодуля для отопления зданий вместо традиционных энергоносителей (уголь, нефтепродукты и природный газ) позволит существенно сократить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу (до 120 т/сут при использовании для отопления шахтных вод со всех пластов).

Дальнейшее развитие данной работы целесообразно путём повышения точности используемой расчётной схемы за счёт учёта изменения температуры вод в процессе движения и влияния работы сразу нескольких скважин. Кроме того, необходима более детальная экономическая оценка предложенной геотехнологической схемы, основанная на установлении капитальных затрат на её создание и современных инвестиционных критериев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бездонные запасы. Уголь как основа сырьевой базы Украины. URL: <http://geonews.com.ua/news/detail/bezdonnye-zapasy-ugol-kak-osnova-9> (дата обращения: 06.04.2019).
2. Ермаков В.Н., Улицкий О.А., Спожагин А.И. Изменение гидродинамического режима шахт при затоплении. *Уголь Украины*. 1998. № 6. С. 11-13.
3. Snihur V., Malashkevych D., Vvedenska T. Tendencies of coal industry development in Ukraine. *Mining of mineral deposits*. 2016. Vol. 10(2). P. 1-8.
4. Wieber G. A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif. *Mine Water. Proceedings of the 10<sup>th</sup> IMWA Congress –2008 in Karlovy Vary, Check Republic. Technical University of Ostrava Faculty of Mining and Geology*. P. 113-116.
5. Robinson R. Mine gas hazards in the surface environment. *Mining Technology, Section A*. 2000. Vol. 109. P. A228-236.
6. Самуся В.И. Оценка эффективности теплонасосной технологии утилизации тепла воздушных турбокомпрессоров. *Научный вестник НГУ*. 2010. № 6. С. 78-82.
7. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 417 с.
8. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.А. Руководство по регулированию теплового режима шахт. Москва: Недра, 1977. 359 с.
9. Гончаров С.А. Термодинамика. Москва: Изд-во Московского гос. горного ун-та, 2002. 440 с.
10. Заключение о прогнозных величинах водопритоков в шахту им. Н.И. Сташкова на период полной отработки промышленных запасов и рекомендации по сбросу шахтных вод в речную сеть. ГГАУ; рук. В.Г. Пасечный. Днепропетровск, 1994. 81 с.
11. Политехнический словарь / под ред. А.Ю. Ишлинского и др. Москва: Советская энциклопедия, 1989. 656 с.
12. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Лакомкин В.Ю. Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO<sub>2</sub>). СПб: СПбГТУРП, 2014. 52 с.

#### REFERENCES

1. "Bottomless stocks. Coal as the basis of the raw material base of Ukraine", available at: <http://geonews.com.ua/news/detail/bezdonnye-zapasy-ugol-kak-osnova-9> (Accessed 6 April 2019).
2. Ermakov, V.N., Ulitsky, O.A and Spozhak, A.I. (1998), "Changes in the hydrodynamic mode of mines during flooding", *Ugol' Ukrainy*, no. 6, pp. 11-13.
3. Snihur, V., Malashkevych, D. and Vvedenska, T. (2016), "Tendencies of coal industry development in Ukraine", *Mining of mineral deposits*, Vol. 10(2), pp. 1-8.
4. Wieber, G.A. (2008), "Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif", *Proceedings of the 10<sup>th</sup> IMWA Congress*, Karlovy Vary, Check Republic, pp. 113-116.
5. Robinson, R. (2000), "Mine gas hazards in the surface environment", *Mining Technology, Section A*, Vol. 109, pp. A228-236.
6. Samusia, V.I. (2010), "Assessment of heat pump technology of air turbocompressor waste heat utilization", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 6, pp. 78-82.
7. Kirillin, V.A., Sychev, V.V. and Sheidlin, A.E. (1983), *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics], Energoatomizdat, Moskva, USSR.
8. Scherban, A.N., Kremnev, O.A. and Zhuravlenko, V.A. (1977), *Rukovodstvo po upravleniyu mineral'nyim teplom* [Mineral Heat Management Guide], Nedra, Moskva, USSR.
9. Goncharov, S.A. (2002). *Termodinamika* [Thermodynamics], Izd-vo Moskovskogo gos. gornogo un-ta, Moskva, USSR.
10. Pasechny, V.G. (1994), "The conclusion of the predicted values of water inflows into the mine to them. N.I. Stashkova for the period of full development of industrial reserves and recommendations for dumping mine water into the river network", GGAU; Dnepropetrovsk, Ukraine.
11. Ishlinskiy, A.Yu. (ed.) (1989), *Politekhnicheskii slovar* [Polytechnical dictionary], Sovetskaya entsiklopediya, Moskva, USSR.
12. Belousov, V.N., Smorodin, S.N. and Lakomkin, V.Yu. (2014), *Energoberezheniye i vybrosy parnikovykh gazov (CO<sub>2</sub>)* [Energy saving and emission of greenhouse gases (CO<sub>2</sub>)], SPbGTURP, St. Petersburg, Russia.

#### Об авторах

**Садовенко Иван Александрович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Национального технического университета «Днепропетровская политехника» (НТУ «ДП»), Днепр, Украина

**Инкин Александр Викторович**, д.т.н., профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Национального технического университета «Днепропетровская политехника» (НТУ «ДП»), Днепр, Украина, [inkin@ua.fm](mailto:inkin@ua.fm)

**Деревягина Наталья Ивановна**, к.т.н., доцент кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Национального технического университета «Днепропетровская политехника» (НТУ «ДП»), Днепр, Украина, [natali.derev@gmail.com](mailto:natali.derev@gmail.com)

**Хрипливец Юлия Владимировна**, научный сотрудник кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Национального

технічного університета «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), Дніпр, Україна

### About the authors

**Sadovenko Ivan Oleksandrovych**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine

**Inkin Oleksandr Viktorovych**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, inkin@ua.fm

**Derevyahina Nataliia Ivanivna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, natali.derev@gmail.com

**Нрыпльєв Yulia Volodymyrivna**, Researcher of Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine

**Анотація.** Метою роботи є обґрунтування економічно ефективної технологічної схеми освоєння теплового ресурсу шахти «Сташкова» після її закриття, що забезпечує підтримку сприятливого енергетичного і еколого-гідрогеологічного режиму в регіоні. Застосований комплексний підхід, що включає збір, систематизацію та аналіз фактичних даних про фільтраційні і фізико-механічні властивості вміщуючих порід, гірничотехнічних умов розробки пластів, що впливають на формування природно-техногенних родовищ, а також аналітичні та чисельні методи рішення рівнянь ефективності роботи геомодуля в різних умовах. Обґрунтовано геотехнологічну схему екологічно безпечного використання шахтних вод, що передбачає відкачування вод на поверхню, відбір тепла і зворотне їх нагнітання в пласти. Запропонована циркуляційна система характеризується підвищеним енергетичним балансом, так як з її допомогою витягується практично все тепло підземних вод, а також частина тепла вміщуючих порід. З метою оцінки ефективності застосування даної технології, в програмному комплексі Mathcad проведені розрахунки використання шахтних вод як джерела низькопотенційної енергії в теплових насосах в порівнянні з іншими альтернативними варіантами (грунтові води і поверхневі водотоки), і встановлено, що це дає великі коефіцієнти перетворення (5,2-5,8 при  $T_2 = 50$  °C та 3,2-3,9 при  $T_2 = 70$  °C). Розроблено геотехнологічну схему використання шахтних вод, що враховує перенесення тепла, напрямок фільтрації, швидкість і температуру підземних вод при нагнітанні і відборі теплоносії з водоносного горизонту для опалення та охолодження будинків. Досліджено механізм тепловідбору в затопленому гірському масиві ліквідованої шахти з обґрунтуванням екологічно безпечного використання шахтних вод. Проведені дослідження дозволили обґрунтувати параметри експлуатації економічно доцільної геотехнологічної схеми, що дозволяє стабілізувати енергоспоживання і екологічну ситуацію в вугледобувних регіонах шляхом комбінації в єдиному модулі технологій з вироблення теплової енергії, дренавання шахт, регулювання водного режиму та очищення шахтних вод.

**Ключові слова:** термальний водоносний горизонт, гециркуляційна система, тепла енергія, чиста дисконтована вартість

**Abstract.** The aim of the paper is justification of the economically efficient technological scheme for development of a thermal resource of "Stashkov" mine after its closure, ensuring the maintenance of a favorable energy and ecological-hydrogeological regime in the region. In order to achieve this aim, a complex approach was applied, including collecting, systematizing and analyzing actual data on filtration and physical-mechanical properties of host rocks and mining and technical conditions of development of seams that affect the formation of natural and technogenic deposits, as well as analytical and numerical methods of solving the equations of the geomodule operational efficiency under different conditions. A geotechnological scheme of environmentally safe usage of mine water was justified, involving water pumping up to the surface, heat removal and water reverse pumping into the seams. The suggested circulation system is characterized by an increased energy balance, since it is used to extract almost all the groundwater heat, as well as part of the heat of host rocks. In order to estimate the effectiveness of usage of this technology, calculations of usage of mine water as a source of low-potential energy in heat pumps in comparison with other alternatives (groundwater and surface water streams) using Mathcad software were performed, and it was established that this gives great conversion coefficients of mine water (5.2-5.8 when  $T_2 = 50$  °C and 3.2-3.9 when  $T_2 = 70$  °C). A geotechnological scheme of usage of mine water was developed, which considers heat transfer, filtration direction, velocity and temperature of groundwater during pumping and removal of heat-transfer fluid from an aquifer for heating and cooling of buildings. The mechanism of heat removal in a flooded rock massif of amine during liquidation was studied with justification of environmentally safe usage of mine water. Conducted research allowed justifying operational parameters of an economically feasible geotechnological scheme, which allows stabilizing energy consumption and environmental situation in coal mining regions by combining technologies for heat generation, mine drainage, water regime regulation and mine water treatment in a single module.

**Keywords:** thermal aquifer, geo-circulation system, thermal energy, net present value

Статья поступила в редакцию 15.01.2019

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко