

УДК 622.272

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.203>

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СХЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДОНБАССА

¹Инкин А.В., ²Кобец А.С., ²Пугач А.Н., ¹Деревягина Н.И.

¹Национальный технический университет «Днепровская политехника», ²Днепровский государственный аграрно-экономический университет

ОБҐРУНТУВАННЯ ГЕОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І СХЕМ ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ ДОНБАСУ

¹Інкін О.В., ²Кобець А.С., ²Пуґач А.М., ¹Дерев'ягіна Н.І.

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», ²Дніпровський державний аграрно-економічний університет

SUBSTANTIATION OF GEOTECHNOLOGICAL PARAMETERS AND SCHEMES OF USE OF NATURAL-TECHNOGENIC DEPOSITS OF DONBASS

¹Inkin O.V., ²Kobets A.S., ²Puhach A.M., ¹Dereviahina N.I.

¹National Technical University "Dnipro Polytechnic", ²Dnipro State Agrarian and Economic University

Аннотация. Целью данной работы является теоретическое и технологическое обоснование параметров и схем формирования и использования природно-техногенного теплового и ёмкостного ресурсов отработанных угольных месторождений с помощью комплекса геомодулей, обеспечивающих их активизацию, отбор и хранение синхронно с сезонной неравномерностью потребления энергоносителей. Для достижения поставленной цели применён комплексный подход, включающий сбор, систематизацию и анализ фактических данных о фильтрационных и физико-механических свойствах вмещающих пород и горнотехнических условий разработки пластов, влияющих на формирование природно-техногенных месторождений, а также аналитические и численные методы решения уравнений гидрогазодинамики и тепломассопереноса. Оценена динамика формирования и конфигурация объёмов теплового ресурса в водоносном горизонте, залегающего над угольным пластом, сжигаемого в зависимости от угла его падения, стадии разработки угля и мощности водопоров.

Обоснованы геотехнологические модули, обеспечивающие эффективное освоение теплового ресурса затопленной шахты за счёт отбора и закачки вод различных горизонтов для тепло- и холодоснабжения зданий в соответствии с температурой наружного воздуха, а также его периодическую активизацию путём подземного сжигания остаточных угольных запасов. Разработана и протестирована пространственная нестационарная модель переноса тепла, воспроизводящая направление фильтрации, скорость и температуру подземных вод при нагнетании и отборе теплоносителей из водоносного горизонта для отопления и охлаждения зданий с учётом температуры наружного воздуха. Исследован механизм теплопереноса в затопленном горном массиве ликвидированной шахты, сопровождается периодической закачкой и отбором шахтных вод различных горизонтов, а также их нагреванием естественным геотермическим теплом и подземным сжиганием остаточных запасов угля.

Обоснованы параметры эксплуатации геотехнологических модулей для многократного использования теплового ресурса затопленных горных выработок путём отбора и закачки шахтных вод различных горизонтов для тепло- и холодоснабжения зданий. На примере ликвидированной шахты «Новгородовская 2» доказано, что тепловой поток, который образуется при сжигании угля и откачке нагретых вод практически полностью покрывает тепловые потребности населённого пункта с 15 тыс. жителей.

Ключевые слова: угольные месторождения, гидротермальные ресурсы, тепловая энергия, геокриуляционные системы

Постановка задачи исследований. Для старых угледобывающих регионов характерна существенная техногенная перестройка разрабатываемых геологических структур и критическая экологическая ситуация, что с учётом существующей острой проблемы нехватки энергоносителей, свидетельствует о технологическом отставании отрасли в использовании природно-техногенных ресурсов сосредоточенных на отработанных площадях [1, 2, 3]. Основной причиной

сложившейся ситуации является несогласованность разных стадий разведки, разработки и свёртывания горных работ, в особенности, на угольных месторождениях. В технико-экономических и геотехнических прогнозах эффективности отработки шахтных полей недостаточно рассматриваются предпосылки формирования сопутствующих полезных компонентов и коллекторов, гидротермальный ресурс которых, оценивается как негативный на этапе разработки угольных пластов, а на этапе завершения горных работ вообще не учитывается.

Для определения условий формирования и потенциала техногенных гидротермальных месторождений, технологического обоснования комплексного освоения энерго-ёмкостного ресурса угленосных площадей и ликвидируемых горнодобывающих предприятий, способных на современном уровне экономической эффективности удовлетворить потребности рынка страны в тепловой энергии, необходимы соответствующие количественные оценки. Поэтому совмещение этапов отработки угольных месторождений на единой теоретической основе, с определением параметров геотехнологических модулей по использованию природно-техногенного ресурса энергии и ёмкостных свойств отработанного массива и смежных площадей является актуальной и стратегически важной научно-практической задачей.

В работе представлено теоретическое и технологическое обоснование параметров и схем формирования и использования природно-техногенного теплового и ёмкостного ресурсов отработанных угольных месторождений с помощью комплекса геомодулей, обеспечивающих их активизацию, отбор и хранение синхронно с сезонной неравномерностью потребления энергоносителей.

Обоснование моделей аккумуляции теплоносителей в водоносных горизонтах. Система подземного аккумулирования тепла рентабельна в условиях, когда её горно-геологические условия и технологические режимы работы исключают возможность взаимного влияния тепловых ореолов скважин; при этом потери тепловой энергии не должны превышать 25 % [4,5]. С учётом сложности протекающих физических процессов и основанных на мировом научно-практическом опыте рекомендаций [6,7], применение данной геотехнологии должно быть обосновано численным моделированием фильтрации и теплопереноса в водоносном горизонте, который используется как коллектор нагретой и охлаждённой воды.

Уравнение фильтрации при нагнетании и откачке в напорном режиме записывается в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Km \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Km \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q_{\Sigma} - \frac{K_1}{m_1} (H_1 - H) - \frac{K_2}{m_2} (H - H_2) = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где K и m – коэффициент фильтрации и мощность водоносного горизонта;
 K_1 и m_1 , K_2 и m_2 – соответственно те же параметры его кровли и подошвы;
 H , H_1 и H_2 – напор в водоносном горизонте, выше- и нижележащем водоносных пластах соответственно;

Q_{Σ} – переменная во времени суммарная интенсивность отбора и нагнетания воды скважинами

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i, y - y_i),$$

где Q_i – дебит i -й скважины;

x_i, y_i – её координаты;

S_s – упругоёмкость пласта.

Двухмерная в плане миграция тепла в подземных водах описывается уравнением

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda m \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_w C_w v_x m T \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda m \frac{\partial T}{\partial y} - \rho_w C_w v_y m T \right) + \\ + m q_{\Sigma} - q_b - q_t = m \left[n \rho_w C_w + (1-n) \rho_{sk} C_{sk} \right] \frac{\partial T}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности пород водоносного горизонта;

ρ_w, ρ_{sk} – плотности воды и скелета пород;

T – температура подземной воды;

q_t и q_b – тепловые потоки из водоносного горизонта в его кровлю и подошву;

C_w, C_{sk} – удельные теплоёмкости подземной воды и скелета пород;

q_{Σ} – распределённая в объёме пласта интенсивность источников и стоков тепла

$$q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N q_i \delta(x - x_i, y - y_i),$$

где q_i – интенсивность i -го источника (стока) тепла, который соответствует месту расположения i -й скважины для нагнетания (отбора) воды.

Интенсивность теплового потока при нагнетании и отборе воды через скважину определяется по формуле

$$q_i = C_w \rho_w Q_i \Delta T_i,$$

где $\Delta T_i = T_i - T_0$ – при закачке; $\Delta T_i = T(x_i, y_i, t) - T_0$ – при отборе воды. Здесь T_i – температура воды, нагнетаемой через i -ю скважину; $T(x_i, y_i, t)$ – температура воды, отбираемой из i -й скважины; T_0 – существующая температура подземных вод.

Теплофизические свойства воды определяются для участка водоносного горизонта вблизи скважины.

Потоки тепла через кровлю и подошву пласта определяется по формулам

$$q_t = - \frac{\lambda}{n} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=m}; \quad q_b = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}.$$

Разделив обе части уравнения (2) на произведение $n C_w \rho_w$, можно перейти к уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda m}{C_w \rho_w n} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{v_x m}{n} T \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda m}{C_w \rho_w n} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{v_y m}{n} T \right) + \frac{m q_{\Sigma} - q_b - q_t}{C_w \rho_w n} = m R_T \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

где $R_T = 1 + \frac{1-n}{n} \cdot \frac{\rho_{sk} C_{sk}}{\rho_w C_w}$ – коэффициент, аналогичный т.н. коэффициенту запаздывания в уравнении массопереноса в подземных водах;
 n – пористость.

Численная модель, основанная на уравнениях (1) и (3) с нестационарными источниками и стоками воды и тепла, позволяет описывать переходные режимы теплопереноса с произвольным расположением нескольких скважин, различной температурой закачиваемой и отбираемой воды, неоднородной структурой и переменной мощностью водоносного горизонта. Получить соответствующее аналитическое решение такой краевой задачи теплопереноса не представляется возможным.

Оценивание теплового баланса в водоносных породах над подземным газогенератором. Для обоснования технологически рациональных параметров отбора накапливающейся тепловой энергии необходимо выполнить моделирование распространения геотермических полей, формирующихся в водоносном пласте при сжигании угля.

Принципиально важным этапом разработки модели является корректная формулировка граничного условия по температуре на подошве водоносного горизонта над реакционным каналом. Для определения температуры подземных вод в данной части водоносного пласта выделяется объёмный блок малой толщины в виде параллелепипеда, расположенный непосредственно над нагретым разделяющим пластом (водоупором), где происходит теплообмен (рис. 1) [5].

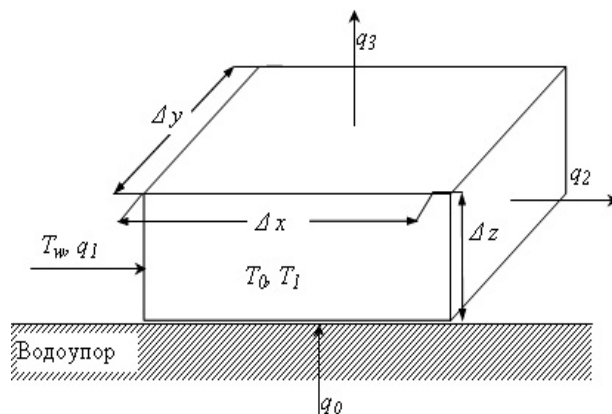


Рисунок 1 – Схема баланса тепла в блоке водоносного пласта над кровлей реакционного канала

Баланс тепла в блоке устанавливается на основе равенства количества тепла (U_Σ), которое приходит в блок или выносится из него за промежуток времени τ и количества тепла, которое расходуется на нагрев подземных вод и горных пород непосредственно в блоке ($U_{нагр.}$).

Изменение температуры воды и пород в блоке определяется уравнением баланса тепла [6,7]

$$U_\Sigma = (q_0 + q_1 - q_2 - q_3) \tau = U_{нагр.} = (T_1 - T_0) \cdot B; \quad (4)$$

где

$$q_1 = AT_w; \quad (5)$$

$$q_2 = A \cdot \frac{T_1 + T_0}{2}; \quad (6)$$

$$q_3 = D \cdot \left(\frac{T_1 + T_0}{2} - T_w \right); \quad (7)$$

$$D = \frac{\lambda \Delta x \Delta y}{\Delta z}, \quad (8)$$

$$A = \Delta y \cdot \Delta z \cdot v \cdot C_w \rho_w; \quad (9)$$

$$B = \rho_w C_w V_w + \rho_{sk} C_{sk} V_{sk}; \quad (10)$$

где T_0, T_1 – соответственно температура воды и пород в блоке объёмной сетки размерами $\Delta x \Delta y \Delta z$ на начало и в конце промежутка времени τ ,

v – скорость фильтрации;

V_w, V_{sk} – объём воды и пород в блоке;

q_0 – тепловой поток от реакционного канала;

q_1 и q_2 – конвективные потоки тепла вдоль направления фильтрационного потока;

q_3 – кондуктивный тепловой поток от блока к блоку расположенному выше;

λ – теплопроводность водоносного пласта;

ρ_w, C_w, V_w – плотность, теплоёмкость и объём воды в блоке;

ρ_n, C_n, V_n – плотность, теплоёмкость и объём пород в блоке.

Подставляя выражения (5)-(10) в (4), получим уравнение для временного ряда температур

$$T_i = T_{i-1} + \frac{q_0 - (A + D) \cdot (T_{i-1} - T_w)}{B + (A + D)\tau/2} \cdot \tau,$$

где T_i – температура в блоке объёмной сетки в течение i -го периода осреднения.

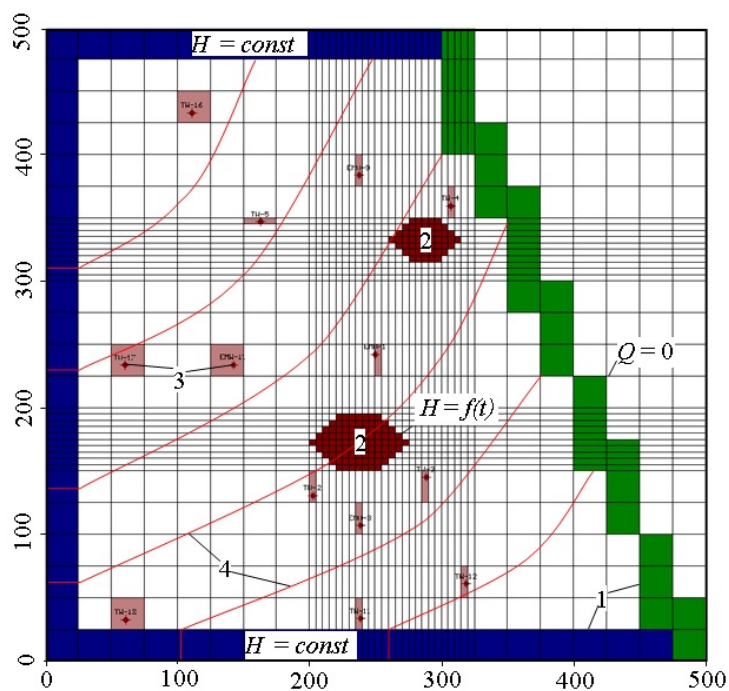
Оценка точности модели путём решения эпигнозной задачи. Разработанный способ активизации энергоёмкости водонасыщенного массива затопленной шахты в параметрическом модельном воспроизведении тестировался на опубликованных фактических данных масштабного промышленного эксперимента по подземной газификации угля (участок Rocky Mountain, США) (Berdan, 1993). В этом эксперименте использованный нами эффект рассматривался как побочное осложнение.

Согласно рекомендациям, предложенным в работах [9,10], разбивка исследуемого участка Hanna-1 [8] размерами 500×500 м аппроксимируется сеткой с шагом 25×25 м и его уменьшением в 5 раз вблизи модулей сжигания, что позволяет точно фиксировать конфигурацию формирующихся термо- и пьезоизогипс (рис. 2). В соответствии с данными геологического строения область фильтрации рассматривается как многослойная толща со средней мощностью угольного пласта 10 м, водоупора – 7 м и водоносного пласта – 15 м. Подземному сжиганию подвергался угольный пласт Hanna-1 глубиной залегания кровли от 100 до 130 м. Угли пласта не вспучивающиеся, битуминозные, обладают большим количеством летучих компонентов и углефицированных пропластков с 40-75 % зольности. Их единственным тектоническим нарушением является сброс с амплитудой не более 9 м. Стратиграфический разрез угленосных пород состоит из нескольких блоков (А, В, С, D), залегающих от более старых к молодым. При этом блок D, состоящий из иловых сланцев, имеет мощность от 5 до 30 м, а блок

С при мощности 30-45 м представлен в основном песчаниками, чередующимися с алевролитовыми и глинистыми отложениями. Блоки А и В являются кровлей угольного пласта и представлены преимущественно алевролитами с прослоями песчаников. В их пределах залегает водоносный горизонт, приуроченный к крупнозернистым песчаникам, заключённым между слоями алевролитов. Расположенная в пределах области Скалистая гора, простирающаяся с юго-востока на северо-запад, является барьером для движения воды и задаётся в виде непроницаемой гидродинамической границы. По остальному контуру участка Hanna-1, ввиду отсутствия детальной информации об области питания и разгрузки водоносного горизонта, задаются граничные условия первого рода с величинами напоров, воспроизводящими реальный гидравлический уклон подземных вод (0,006).

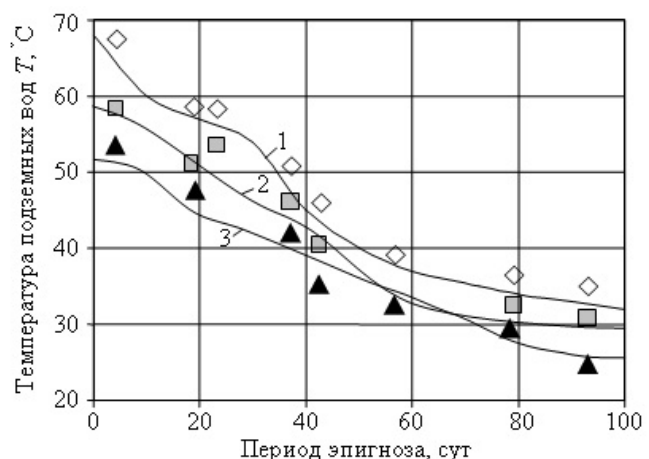
Внутренними границами модели являются полости сжигания, также отображаемые граничными условиями первого рода с величиной гидродинамического напора, равной абсолютной отметке почвы угольного пласта. Положение этих границ осуществлялось путём нанесения контуров отработанных участков на расчётные слои. При моделировании работы модулей PSU (подземного сжигания угля) после прекращения подачи дутья внутренние граничные условия отключались.

На рис. 3 представлено сопоставление натуральных и модельных данных об изменении температуры подземных вод в скважинах, расположенных вблизи модулей сжигания угля. Анализ графиков показывает, что максимальная



1 – гидродинамические границы; 2 – модули PSU; 3 – скважины; 4 – пьезоизогипсы

Рисунок 2 – Схематизация модели участка Hanna – 1 в программном комплексе ModFlow



— по данным моделирования: 1, 2, 3 – соответственно в скважинах TW 3, TW 4 и EMW 1;
по натурным данным: $\diamond$ – скважина TW 3;
 $\square$ – скважина TW 4; $\blacktriangle$ – скважина EMW 1

Рисунок 3 – Динамика изменения температуры подземных вод на участке Hanna – 1

относительная погрешность расчётов не превышает 5 % и свидетельствует о достоверности полученных результатов. Приведённые данные подтверждают адекватность предложенной модели теплопереноса и возможность её использования в практических задачах по оценке теплового ресурса водоносных горизонтов при подземном сжигании угольных пластов.

Параметризация освоения, активизации и использования теплового потенциала ликвидируемой шахты «Новгородовская 2». В геолого-структурном отношении поле шахты расположено в пределах юго-западного крыла Кальмиус-Торецкой котловины и приурочено к лежащему крылу крупного регионального тектонического нарушения – Селидовского надвига. В строении участка принимают участие отложения свит среднего карбона (C_2^6 и C_2^5), перекрытые палеоген-неогеновыми песками и четвертичными суглинками [11,12]. Свита C_2^5 в нижней части содержит большое количество песчаников и незначительное количество углей [13]. В средней части сосредоточены угольные пласты и прослои изменчивой мощности. Из пластов свиты, пригодных для промышленного освоения, шахтой «Новгородовская 2» до отметки –370,3 м отрабатывался угольный пласт k_8 , при средних водопритоках в горные выработки 100 – 120 м³/ч и частых прорывах воды из вышележащих песчаников и известняков. Такой характер поступления подземных вод обусловлен наличием в кровле пласта k_8 мощных водоносных горизонтов, приуроченных к закарстованному известняку L_1 и песчаникам L_{1sl1} и l_{1sl3} . Со стороны почвы пласт обводнялся из песчаников, удаленных от него на 5-10 м.

Свита C_2^6 в пределах поля шахты «Новгородовская 2» является наиболее угленасыщенной и содержит 7 угольных пластов и пропластков, из которых промышленной разработке подвергался только пласт l_1 «Шестичетвертовый». Необходимо отметить, что водонасыщенный песчаник l_{1sl3} , залегающий непосредственно в пласте l_1 обуславливал значительный водоприток (200 – 250 м³/ч) в горные выработки. Балансовые запасы угля оцениваются в 17355 тыс.т, а промышленные – 12644 тыс. т, что соответствует потерям в размере 4711 тыс.т. Забалансовые запасы свиты C_2^6 , в основном сосредоточенные в пластах в пластах l_4 и l_5 оцениваются в 3215 тыс.т.

Малоамплитудная разрывная нарушенность в пределах шахты «Новгородовская 2» обусловлена влиянием простирающихся с юго-запада на юго-восток среднеамплитудных (Новгородовского и Гродовского) сбросов. Всего на угольных пластах k_8 и l_1 зафиксировано 15 малоамплитудных разрывов, определивших коэффициент нарушенности (отношение суммы произведений амплитуд разрывов на их длину к исследуемой площади) шахтного поля – 0,93 [11, 13].

Гидрогеологические условия поля шахты «Новгородовская 2» тесно связаны с её геологическим строением [11, 14]. Так в залегающих первыми от дневной поверхности четвертичных отложениях выделяются два водоносных горизонта. Один из которых, горизонт голоценовых аллювиальных отложений (aH), приурочен к современным аллювиальным образованиям и заполняет долину реки Солёной и днища впадающих в неё балок. Его водовмещающие породы представлены пылеватыми песками, суглинками и супесями мощностью от первых метров до 10 м. Глубина залегания уровней грунтовых вод изменяется от 0,5

до 3 – 4 м. Водообильность горизонта низкая, значения коэффициентов фильтрации обычно составляют сотые-десятые доли м/сут. Второй водоносный горизонт четвертичных эолово-делювиальных суглинков развит на водораздельных участках и приурочен к суглинкам мощностью 5 – 20 м, залегающим на водоупоре плиоцен-нижнечетвертичных красно-бурых глин. В северной части шахтного поля данный водоносный горизонт развит практически повсеместно. Его питание осуществляется за счёт атмосферных осадков, а разгрузка – путём перетока в нижезалегающие палеоген-неогеновые пески и испарения. Преобладающая глубина залегания уровня грунтовых вод колеблется от 10 до 20 м. Их минерализация изменяется от 2,5 до 6,0 г/дм³, жёсткость – 18-50 ммоль/дм³ [14, 15]. Состав воды – сульфатный, реже – хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатный и кальциево-магниевый-натриевый.

Водоносный горизонт палеоген-неогеновых песков (P₃-N₁) приурочен к мелкотонкозернистым пескам, залегающим на выветрелых среднекаменноугольных отложениях. Мощность песков в пределах шахты «Новгородовская 2» достигает 40 м, уменьшаясь до 0,5 – 2 м в северо-восточной её части и выклиниваясь в юго-восточном направлении. В области выходов под кайнозой угольных пластов l_1 и k_8 палеоген-неогеновые пески часто полностью дренированы. Водообильность данного горизонта невысокая: дебиты скважин обычно составляют 1,5 – 2,0 м³/ч при понижениях 3 – 10 м, притоки в стволы – 5 – 6 м³/ч. Химический состав подземных вод чаще хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатный, реже кальциево-магниевый-натриевый, их минерализация изменяется от 1,1 до 5,0 г/дм³, жёсткость – от 4 – 5 до 30 – 36 ммоль/дм³.

Водоносный комплекс среднекаменноугольных отложений C_2 и его горизонты приурочены к песчаникам и известнякам, залегающим среди глинистых и углистых сланцев [11, 13]. В зоне выветривания, развитой до глубины 50 – 60 м ниже поверхности карбона, в той или иной степени обводнены все литологические разности пород. Мощность песчаников составляет в среднем 10 – 20 м, в отдельных случаях достигая 40 – 50 м. Наиболее выдержанными по мощности и простираю на рассматриваемой территории являются песчаники L_1sl_1 и l_1sl_3 . Их коэффициенты фильтрации изменяются в довольно широких пределах – от $n \cdot 10^{-4}$ до первых м/сут и закономерно уменьшаются с глубиной. Пористость в интервале от ±0 до –400 м снижается от 20,6 до 14,5 % соответственно.

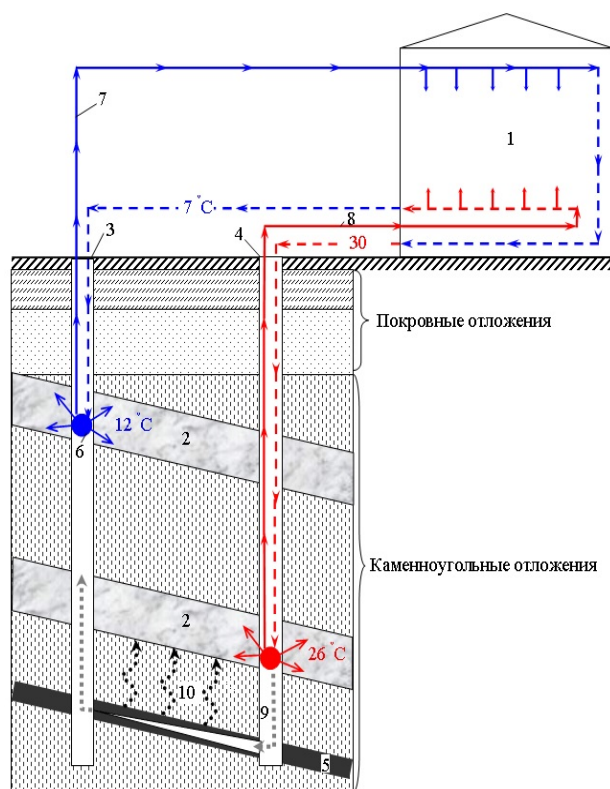
Химический состав подземных вод каменноугольных отложений в пределах достигнутых шахтой глубин преимущественно хлоридно- или гидрокарбонатно-сульфатный или кальциево-натриевый с минерализацией от 1 до 3,5-4,5 г/дм³. Воды в основном жёсткие (общая жёсткость до 34,4 ммоль/дм³), вспенивающиеся с большим количеством твёрдого котельного осадка при кипячении. Питание водоносного комплекса осуществляется путём перетока подземных вод из выше лежащих палеоген-неогеновых песков, реже приурочивается к выходам каменноугольных пород на поверхность. На шахтных полях ведущая роль в питании принадлежит поглощению поверхностного стока.

Шахтные воды ш. «Новгородовская 2», как и воды смежных с ней шахт, в период эксплуатации характеризовались сульфатным магниевый-кальциево-натриевым составом и минерализацией 3,1 – 3,4 г/дм³. При этом затопление

значительного объёма выработок пластов k_8 и l_1 (около 4 млн.м³) практически не отразилось на их химическом составе. В настоящее время воды шахты имеют минерализацию 3,3 – 3,7 г/дм³ и содержат следующие основные микрокомпоненты (мг/дм³): литий – 0,039 – 0,05; бром – 0,01 – 0,022; свинец – 0,017 – 0,05; марганец – 0,55 – 1,82. Необходимо отметить, что содержание практически всех компонентов не превышает предельно допустимую концентрацию ПДК. После сброса на поверхность и отстоя в Масловском пруде-осветителе, расположенном в верховьях ручья Солёного, шахтная вода практически также не изменяет своего состава. Однако в 100 м ниже по течению, после поступления в ручей коммунальных стоков с Новогородовских очистных сооружений, минерализация воды и жёсткость в нем снижаются до 2,2-2,7 г/дм³ и 15,0-21,7 ммоль/дм³ соответственно [11, 14].

По результатам предварительных расчётов было установлено, что общее количество тепловой энергии, аккумулированной водами, содержащимися в затопленных горных выработках шахты «Новогородовская 2», в среднем составляет 1300 ТДж [15, 16]. Её использование с помощью геомодуля может рассматриваться в двух технологических вариантах (рис. 4), первый из которых связан с освоением естественного теплового ресурса шахты («холодная скважина»), второй – с его дополнительной активизацией за счёт подземного сжигания остаточных запасов угля («тёплая скважина») [3, 7].

Анализ диаграмм рис. 5 показывает, что тепловой ресурс, вырабатываемый геомодулем по второму варианту, практически полностью покрывает тепловые потребности, возникающие во время отопительного периода в г. Новогородовка. Это даёт основание рассматривать данную технологическую схему как наиболее перспективную при использовании ресурсов ликвидируемой шахты «Новогородовская 2». В случае работы геомодуля по первому варианту и применению шахтных вод в качестве низкопотенциального источника энергии в тепловых насосах затрачиваемая ими энергия для отопления зданий в среднем составит 150 ГДж/сут, что в четыре раза меньше необходимого для этого теплового



1 – здание; 2 – продуктивная толща с затопленными горными выработками;
3, 4 – «холодная» и «тёплая» скважины; 5 – некондиционный угольный пласт;
6 – пакер; 7, 8 – путь движения шахтных вод из «холодной» и «тёплой» скважин;
9, 10 – направления течения дутьевого (газового) и теплового потоков при сжигании угля
Рисунок 4 – Технологическая схема геомодуля на территории поля шахты «Новогородовская 2»

потока. Результативность первой технологической схемы может быть повышена путем замены дорогостоящих тепловых насосов на систему отопления «теплый пол».

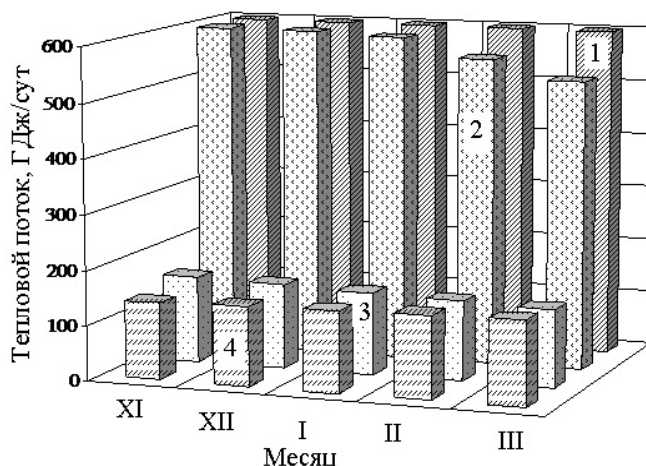
Выводы и рекомендации.

Длительная разработка угольных месторождений и ликвидация шахт в Украине привели к формированию на территории угледобывающих регионов природно-техногенной среды, содержащей большие запасы энергетических ресурсов в виде остаточных и некондиционных запасов угля, теплых шахтных и подземных вод. Нарушенный породный массив имеет значительный ёмкостный ресурс, способный аккумулировать теплоносители в объёме, достаточном для сглаживания сезонных колебаний их потребления.

Основным инструментом исследований были созданные модели фильтрации и теплопереноса в обводнённых породах, отражающие термогидродинамические процессы работы геоконвекционной системы, которая обеспечивает отопление и кондиционирование промышленных и гражданских зданий за счёт сохранения летнего тепла и зимнего холода в нарушенных водоносных породах.

Динамика формирования и конфигурация объёмов теплового ресурса в водоносном горизонте, залегающем над сжигаемым угольным пластом, в зависимости от угла его падения, стадии разработки угля и мощности водоупора воспроизведена численным моделированием. Модель идентифицирована на основе эпигнозного моделирования промышленного эксперимента по подземному сжиганию угля на месторождении Rocky Mountain (США). Относительная погрешность расчётов не превышает 5 %.

Обоснован геотехнологический модуль, обеспечивающий эффективное освоение теплового ресурса затопленной шахты за счёт отбора и закачки вод различных горизонтов для тепло- и холодоснабжения зданий в соответствии с температурой наружного воздуха, а также его периодическую активизацию путём подземного сжигания остаточных угольных запасов. На примере ликвидируемой шахты «Новгородовская 2» в Донбассе доказано, что образующийся при сжигании угля и откачке нагретых вод тепловой поток (500 – 580 ГДж/сут) практически полностью покрывает тепловые потребности населённого пункта с 15 тыс. жителей.



1 – 3 – тепловой поток соответственно, необходимый для обогрева г. Новгородовка, вырабатываемый модулем по второму и первому технологическим вариантам; 4 – тепловой эквивалент мощности, требуемой насосу для обогрева зданий при использовании шахтных вод (1-й вариант) в качестве источника низкопотенциальной энергии
Рисунок 5 – Производительность геомодуля на территории поля шахты «Новгородовская 2»

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ермаков В.Н., Семенов А.П., Улицкий О.А. Развитие процессов подтопления земной поверхности под влиянием закрывающихся шахт. *Уголь Украины*. 2001. №6. С. 12-13.
2. Гавриленко Ю.Н., Ермаков В.Н. Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины. Донецк: Норд-Пресс, 2003. 631 с.
3. Formation of thermal fields by the energy-chemical complex of coal gasification / Falshtynskyi V.S., Dychkovskiy R.O., Saik P.B., Lozynskyi V.H., Cáceres Cabana E. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. No. 5. P. 36-42.
4. Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis / Dickinson J.S., Buik N., Matthews M.C., Snijders A. *Géotechnique*. 2009.No. 59 (3). P. 249-260.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.249>
5. Садовенко И.А., Инкин А.В. Моделирование гидрогеотермических полей при подземном сжигании угольных пластов. *Геотехническая механика*. 2015. Вып. 120. С. 161-171.
6. Andersen L.J., Madsen B., Bull N. Hydrogeological investigations as a basis for heat storage in aquifers. New York: IANS Publ., 1985. 154 p.
7. Inkin O., Dereviachina N. Study of the migration processes in the roof of an underground gas-generator. *Dniprop. Univer. bulletin, Geology, geography*. 2018. No. 26 (1). P. 64-70.
DOI: <https://doi.org/10.15421/111807>
8. Berdan G.A. Restoration plan for the Hanna. Underground coal gasification site in carbon county, Wyoming, 1993. 128 p.
9. Садовенко И.А. Синтезирование численных моделей при решении задач управления геофильтрационным состоянием горного массива. *Горный журнал*. 1991. №12. С. 19-22.
10. Rudakov D.V. Modeling in hydrogeology. Dnepropetrovsk: Natsionalnyi hirnychiy universytet, 2011. 88 p.
11. Тригуб Н.Г., Ковалева Л.И. Каталог гидрогеологических скважин Красноармейского угледобывающего региона с 1939 по 1978 годы. Артемовск: Труды «Артемгеология», 1978.
12. Estimation of effectiveness of development of heat potential of flooded mine field. Traditions and Innovations of resource-saving technologies in mineral mining and processing / Sadovenko I.O., Inkin O.V., Dereviachina N.I., Sotskov V.O. Petrosani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 2019. P. 383-402.
13. Краснопольский О.Н. Заключение «Прогноз изменения экологических и гидрогеологических условий в границах горных отводов ликвидируемого рудника №2 «Новгородовская», ликвидируемого Селидовского рудника и рудника им. Д.С. Коротченко, а также прилегающие к ним шахты: научно-исследовательский отчет. Артемовск, 2006. 232 с.
14. Рубан С.А., Ніколішина А.В. Ґрунтові води України. Дніпропетровськ: ДВ УкрДГПІ, 2005. 426 с.
15. Sadovenko I.A., Rudakov D.V., Inkin A.V. Numerical study of the features of the thermal field around an underground gas generator. *Zbirnik naukovikh prats NGU*. 2012. No 39. P. 11-20.
16. Optimization of parameters of overworked mining gallery support while carrying out long-wall face workings / Sotskov V.O., Demchenko Yu.I., Salli S.V., Dereviachina N.I. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. No. 6. P. 34-40.

REFERENCES

1. Ermakov, V.N., Semenov, A.P. and Ulitskiy, O.A. (2001), "Development of processes of flooding of the earth's surface under the influence of the closing mines", *Ugol Ukrainy*, no. 6, pp. 12-13.
2. Gavrilenko, Yu.N. (2003), *Tekhnogenyye posledstviya zakrytiya ugol'nykh shakht Ukrainy* [Technogenic consequences of the closure of the coal mines of Ukraine], Nord-press, Donetsk, Ukraine.
3. Falshtynskyi, V.S., Dychkovskiy, R.O., Saik, P.B., Lozynskyi, V.H and Cáceres Cabana, E. (2017), "Formation of thermal fields by the energy-chemical complex of coal gasification", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 5, pp. 36-42.
4. Dickinson, J.S., Buik, N., Matthews, M.C. and Snijders, A. (2009), "Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis", *Géotechnique*, no. 59 (3), pp. 249-260.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.249>
5. Sadovenko, I.A. and Inkin, A.V. (2015), "Modeling of hydrogeothermal fields at underground combustion of the coal seams", *Geo-Technical Mechanics*, no. 120, pp. 161-171.
6. Andersen, L.J., Madsen, B. and Bull, N. (1985), *Hydrogeological investigations as a basis for heat storage in aquifers*, IANS Publ., New York, USA.
7. Inkin, O. and Dereviachina, N. (2018), "Study of the migration processes in the roof of an underground gas-generator", *Dniprop. Univer. bulletin, Geology, geography*, no. 26 (1), pp. 64-70.
DOI: <https://doi.org/10.15421/111807>
8. Berdan, G.A. (1993), *Restoration plan for the Hanna. Underground coal gasification site in carbon county*, Wyoming, USA.
9. Sadovenko, I.A. (1991), "Synthesis of numerical models for solving problems of controlling the geofiltration state of a mountain massif", *Gornyy zhurnal*, no. 12, pp. 19-22.
10. Rudakov, D.V. (2011), *Modelirovaniye v gidrogeologii* [Modeling in hydrogeology], Natsionalnyi hirnychiy universytet, Dnepropetrovsk, Ukraine.
11. Trigub, N.G. and Kovaleva, L.I. (1978), *Katalogi gidrogeologicheskikh skvazhin Krasnoarmeyskogo ugledobyvayushchego regiona s 1939 po 1978 gody* [Catalogs of hydrogeological wells of the Krasnoarmeysky coal-mining region from 1939 to 1978], *Tруды «Артемгеология»*, Artyomovsk, USSR.
12. Sadovenko, I.O., Inkin, O.V., Dereviachina, N.I and Sotskov V.O. (2019), *Estimation of effectiveness of development of heat potential of flooded mine field. Traditions and Innovations of resource-saving technologies in mineral mining and processing*, UNIVERSITAS Publishing, Petrosani, Romania.

13. Krasnopol'sky, O.N. (2006), Zaklyucheniye «Prognoz izmeneniya ekologicheskikh i gidrogeologicheskikh usloviy v granitsakh gornyykh otvodov likvidiruyemogo rudnika № 2 «Novogradovskaya», likvidiruyemogo Selidovskogo rudnika i rudnika im. D.S. Korochenko, a takzhe prilegayushchiye k nim shakhty: nauchno-issledovatel'skiy otchet [Conclusion "Forecast of changes in the ecological and hydrogeological conditions within the boundaries of the mining allotments of Mine No. 2 "Novogradovskaya", which is being liquidated, of the liquidated Selidovskaya Mine and Mine named after D.S. Korochenko, which is subject to liquidation, as well as the adjacent mines with them: a research report], Artyomovsk, Ukraine.
14. Ruban, S.A. and Nikolishina, A.V. (2005), *Podzemnyye vody Ukrainy* [Groundwater of Ukraine], DV UkrDGRI, Kyiv, Ukraine.
15. Sadovenko, I.A., Rudakov, D.V. and Inkin, A.V. (2012), "Numerical study of the features of the thermal field around an underground gas generator", *Zbirnik naukovikh prats NGU*, no. 39, pp. 11-20.
16. Sotskov, V.O., Demchenko, Yu.I., Salli, S.V. and Dereviahina, N.I. (2017), "Optimization of parameters of overworked mining gallery support while carrying out long-wall face workings", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 6, pp. 34-40.

Об авторах

Инкин Александр Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» (НТУ «ДП»), г. Днепр, Украина, inkin@ua.fm

Кобец Анатолий Степанович, доктор наук государственного управления, профессор, ректор, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), г. Днепр, Украина, agro@dsau.ua

Пугач Андрей Николаевич, доктор наук по государственному управлению, профессор кафедры менеджмента, публичного управления и администрирования, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, г. Днепр, Украина, puhach.a.m@dsau.dp.ua

Деревягина Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» (НТУ «ДП»), г. Днепр, Украина, natali.derev@gmail.com

About the authors

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

Kobets Anatolii Stepanovych, Doctor of Public Administration, Professor, Rector, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, agro@dsau.ua

Puhach Andrii Mykolaiovych, Doctor of Science in Public Administration, Professor of the Department of Management, Public Administration and Administration, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, puhach.a.m@dsau.dp.ua

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

Анотація. Метою даної роботи є теоретичне і технологічне обґрунтування параметрів і схем формування та використання природно-техногенного теплового і ємнісного ресурсів відпрацьованих вугільних родовищ за допомогою комплексу геомодулів, що забезпечують їх активізацію, відбір і зберігання синхронно із сезонною нерівномірністю споживання енергоносіїв. Для досягнення поставленої мети застосований комплексний підхід, що включає збір, систематизацію та аналіз фактичних даних про фільтраційні і фізико-механічні властивості вміщуючих порід, і гірничотехнічні умови розробки пластів, що впливають на формування природно-техногенних родовищ, а також аналітичні та чисельні методи рішення рівнянь гідрогазодинаміки і тепломасопереносу. Оцінена динаміка формування і конфігурація обсягів теплового ресурсу в водоносному горизонті, що залягає над вугільним пластом, що спалюється, в залежності від кута його падіння, стадії розробки вугілля і потужності водотриву.

Обґрунтовано геотехнологічний модуль, що забезпечує ефективне освоєння теплового ресурсу затопленої шахти за рахунок відбору та закачування вод різних горизонтів для тепло- і холодопостачання будівель відповідно до температури зовнішнього повітря, а також його періодичну активізацію шляхом підземного спалювання залишкових вугільних запасів. Розроблена і протестована просторова нестационарна модель перенесення тепла, що відтворює напрямки фільтрації, швидкість і температуру підземних вод при нагнітанні і відборі теплоносіїв з водоносного горизонту для опалення та охолодження будинків з урахуванням температури зовнішнього повітря. Досліджено механізм теплопереносу в затопленому гірському масиві ліквідованої шахти, що супроводжується періодичним закачуванням і відбором шахтних вод різних горизонтів, а також їх нагріванням природним геотермічним теплом і підземним спалюванням залишкових запасів вугілля.

Обґрунтовано параметри експлуатації геотехнологічного модуля для багатократного використання теплового ресурсу затоплених гірничих виробок шляхом відбору і закачування шахтних вод різних горизонтів для тепло- і холодопостачання будівель. На прикладі ліквідованої шахти «Новоградівська 2» доведено, що тепловий потік, який утворюється при спалюванні вугілля і відкачування нагрітих вод практично повністю покриває теплові потреби населеного пункту з 15 тис. жителів.

Ключові слова: вугільні родовища, гідротермальні ресурси, тепла енергія, геодинамічні системи

Abstract. Objective of this work was to substantiate theoretically and technologically both parameters and schemes of formation and use of natural-technogenic and capacity resources of the mined-out coal deposits with the help of a set of geomoduli for providing these resources activation, extraction, and storage depending upon seasonable irregularity of

energy consumption. Complex approach was applied to reach this objective. The approach involves collection, systematization, and analysis of actual data concerning filtration and physical and mechanical characteristics of enclosing rocks, and seam mining conditions effecting formation of natural and technogenic deposits in addition to analytical and numerical methods in order to solve equations of hydraulic gas dynamics and heat and mass transfer.

The models reflect thermodynamic processes of geocirculating system performance providing both heating and conditioning of industrial facilities and civic buildings since it accumulates summer warmth and winter coldness within the disturbed water-bearing rocks. Numerical modeling was applied to simulate formation dynamics and a pattern of heat resource within water-bearing level occurring over the coal seam being burnt depending upon its inclination angle, coal mining stage, and aquifuge thickness. Spatial nonstationary model of heat transfer, simulating filtration direction, velocity of underground water and its temperature while carrier pumping and extracting from a water-bearing level for heat and cool supply of buildings according to ambient temperature was developed and tested. Heat-transfer mechanism within the flooded rock mass in an abandoned mine, followed by periodical injection and extraction of mine water from different levels, and its heating with the help of natural geothermal heat as well as underground burning of residual coal reserves has been analyzed.

Operation parameters of geotechnological modulus for reuse of thermal resource of the flooded mine workings while extracting and injecting water from different levels for heat and cool supply of buildings were substantiated. It was proved (in terms of Novogrodovskaia 2 mine being under liquidation) that the thermal flow, being formed while coal burning and heated water pumping, was quite sufficient for satisfying calorific requirements of a town with population of 15 thousand people.

Keywords: coal deposits, hydrothermal resources, thermal energy, geocirculating systems

Статья поступила в редакцию 10.02.2020

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом