

anchors in time because destruction of the roof rocks is minimal and work gives the necessary effect. But in case of blast-hole drilling, excavation work breaks natural monolithic rock. Determination of the stress field around the coal face before, during and after explosion of blast-hole charges will allow estimation of the impact of the explosion on the stability of roof bolting and its ability to keep roof rocks in an undisturbed state. Thus the purpose of the research was the study of state the roof rocks fixed by the roof bolting in an excavation made by method of blast-hole drilling by means of mathematical modeling and mining experiments and observations data analysis. The article presents the results of numerical

modeling of geomechanical and filtration processes around the mine working fixed by the roof bolting during explosion of blast-hole charges. The state of unfixed roof over the coal face with different delays of roof bolting installation from the coal face was done. It is shown, that roof bolting prevents rock foliation and destruction of the roof rocks even in an excavation made by method of blast-hole drilling.

Keywords: *roof bolting, blast-hole drilling, numerical modeling*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук С.І. Скіпочкою. Дата надходження рукопису 04.08.11

УДК 556.322.63.001.57

Д.В. Рудаков¹, д-р техн. наук, ст. научн. сотр.,
И.А. Садовенко¹, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Инкин¹, канд. техн. наук, доц.,
З.Н. Якубовская², канд. техн. наук

1 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: inkin@ua.fm

2 – Государственное высшее учебное заведение „Украинский государственный химико-технологический университет“, г. Днепропетровск, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ ПРИ АККУМУЛЯЦИИ И ОТБОРЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

D.V. Rudakov¹, Dr. Sci. (Tech.), Senior Research Fellow,
I.A. Sadovenko¹, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
A.V. Inkin¹, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Z.N. Yakubovskaya², Cand. Sci. (Tech.)

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: inkin@ua.fm

2 – State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Engineering”, Dnipropetrovsk, Ukraine

MODELING OF HEAT TRANSPORT IN AN AQUIFER DURING ACCUMULATION AND EXTRACTION OF THERMAL ENERGY

Сезонная неравномерность потребления и ограниченность запасов природных энергоносителей в Украине приводит к необходимости поиска нетрадиционных способов добычи и хранения тепловой энергии. В сформированных горно-геологических и климатических условиях страны снижение энергетических нагрузок может быть достигнуто за счет создания систем подземного аккумулирования теплоносителей. Эти системы обеспечат отопление, горячие водоснабжение и кондиционирование инженерных сооружений за счет сохранения летнего тепла и зимнего холода в водоносных пластах. Эффективность применения данной геотехнологии должна быть обоснована численным моделированием фильтрации и теплопереноса в пласте, используемом в качестве коллектора.

Цель работы. Обоснование применения данной геотехнологии математическим моделированием фильтрации и теплопереноса в водоносном горизонте, который используется как коллектор нагретой и охлажденной воды. Вычислительная реализация математической модели была выполнена с помощью программы ModFlow 2009 (Schlumberger W.S.). Тестирование модели выполнено на основе аналитического решения задачи радиального теплопереноса. Максимальные отклонения между профилями температуры, рассчитанными двумя методами, не превышают 2 °C (менее 10% от разности температур) и характерны только для зоны раздела теплой и холодной воды (в полосе шириной 15–20 м). С течением времени отклонение между численным и аналитическим решением не возрастает. Оцененная погрешность модели может считаться приемлемой для решения практических задач.

На основе численного анализа теплового баланса установлено, что к моменту завершения закачки в водоносном горизонте остается более 98% тепла, поступившего через скважину, в диапазоне реальных значений коэффициента теплопроводности пласта. Показано, что суммарные потери тепла через кровлю и подошву в период закачки, для принятых исходных данных, отличаются незначительно. Более заметны отличия между потерями тепла в течение следующего периода: после паузы и последующей откачки. Так, в результате откачки эквивалентного объема воды, с тем же дебитом и в течение того же периода, через скважину удастся отобрать от 62 до 74% исходной тепловой энергии, в зависимости от значений коэффициента теплопроводности пласта.

Ключевые слова: *теплоперенос, аккумуляция, водоносный горизонт, тепловая энергия, моделирование*

Введение. Сезонная неравномерность потребления топлива в Украине и ограниченность его запасов при-

водит к необходимости эффективного использования альтернативных источников тепловой энергии. В условиях сложившейся структуры энергопотребления и климатических условий страны, перспективной техно-

логией, направленной на экономию ископаемого топлива, может стать сезонное аккумулирование теплоносителей в водоносных пластах. Освоение гидрогеотермальных ресурсов позволит решить проблему тепло- и холодоснабжения инженерных сооружений в периоды пиковых спросов и будет иметь ряд преимуществ по сравнению с традиционными источниками энергии. Экономическая конкурентоспособность применения геотермальных систем обусловлена повсеместным распространением природных коллекторов, пригодных для хранения теплоносителей, возможностью их локализации и экологической чистотой.

На сегодняшний день в ряде стран мира [1] аккумулирование тепловой энергии в водоносных пластах осуществляется по энергосберегающей технологии с помощью двух скважин [2], через которые вода откачивается или закачивается в зависимости от времени года. Вода, закачанная зимой, отбирается летом из „холодной“ скважины с температурой около 10⁰С. Отдав холод потребителю (кондиционирование, холодильные установки, химическая промышленность и т.д.), уже с температурой 25⁰С вода через „теплую“ скважину поступает в пласт-коллектор. Зимой теплая вода используется тепловым насосом для отопления гражданских и промышленных объектов, после чего, охлажденная до температуры 6⁰С, через „холодную“ скважину вновь возвращается в водоносный горизонт.

Система подземного аккумулирования энергии позволяет производить обогрев и кондиционирование зданий площадью до 100 000 м², при этом годовая экономия электроэнергии составляет 320 000 кВт·ч, природного газа – 95 000 м³. Кроме того, применение этой технологии позволяет сократить выбросы в атмосферу углекислого газа до 400 т./г. Внедрение такой технологии поддерживается правительствами ряда стран (Нидерланды, Германия, США) и международными организациями (International Energy Agency).

Система подземного аккумулирования тепла рентабельна в условиях, когда ее горно-геологические условия и технологические режимы работы исключают возможность влияния тепловых ореолов скважин друг на друга. При этом потери тепловой энергии не должны превышать 15%. С учетом сложности физических процессов, применение данной геотехнологии должно быть обосновано математическим моделированием фильтрации и теплопереноса в водоносном горизонте, который используется как коллектор нагретой и охлажденной воды.

Достижение этой цели требует решения следующих задач: 1) сформулировать математическую модель переноса тепла при закачке (отборе) нагретой (холодной) воды; 2) провести вычислительную реализацию модели с помощью специального программного обеспечения; 3) протестировать численный алгоритм на основе аналитического решения задачи радиального теплопереноса.

Формулировка модели. Миграция тепла в водоносном горизонте небольшой мощности при аккумулировании и извлечении тепловой энергии может быть

описана с помощью двумерной в плане модели теплопереноса [3–5], с учетом следующих допущений.

1. Справедливы предпосылки гидравлической теории фильтрации относительно осреднения напора и скорости фильтрации по мощности пласта.

2. Теплоперенос в проницаемом пласте осуществляется конвективным и кондуктивным путем, а в слабопроницаемых прослойках – только кондуктивным путем.

3. Закачка воды в пласт и ее отбор производится через скважины, которые считаются совершенными.

4. Выравнивание температуры между подземной водой и скелетом породы происходит мгновенно.

5. Коэффициент фильтрации изменяется в соответствии с зависимостью вязкости воды от температуры.

6. Температура пород кровли и подошвы пласта при теплопереносе в водоносном горизонте существенно не изменяется.

Рассматриваемый процесс описывается системой уравнений фильтрации подземных вод и переноса тепла в них за счет конвекции и кондукции.

Уравнение фильтрации при нагнетании и откачке в напорном режиме записывается в виде [3]

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

где K и m – коэффициент фильтрации и мощность водоносного горизонта; K_1 и m_1 , K_2 и m_2 – соответственно те же параметры кровли и подошвы водоносного горизонта; H , H_1 и H_2 – напор в водоносном горизонте, выше- и нижележащем водоносных горизонтах 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 – ее координаты; μ – упругость пласта.

Двумерная в плане миграция тепла в подземных водах описывается уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda m \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_f C_f v_x m T \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda m \frac{\partial T}{\partial y} - \rho_f C_f v_y m T \right) + m q_{\Sigma} - q_b - q_t = m [n \rho_f C_f + (1 - n) \rho_{sk} C_{sk}] \frac{\partial T}{\partial t},$$

где λ – коэффициент теплопроводности пород водоносного горизонта; C_f , C_{sk} – удельные теплоемкости подземной воды и скелета пород; T – температура подземной воды; q_t и q_b – тепловые потоки из водоносного горизонта в его кровлю и подошву соответственно (Вт/м²); q_{Σ} – распределенная в объеме 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 ($\text{Вт}/\text{м}^3$), который соответствует месту расположения i -й скважины для нагнетания (отбора) воды.

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

$$q_i = C_f \rho_f Q_i \Delta T_i,$$

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 – естественная температура подземных вод. Теплофизические свойства воды определяются для участка водоносного горизонта вблизи скважины.

Потоки тепла через кровлю и подошву пласта определяются по формулам

$$q_t = -\frac{\lambda}{n} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=m}; \quad q_b = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}. \quad (2)$$

Разделив обе части уравнения (1) на произведение $n C_f \rho_f$, перейдем к уравнению

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

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

Для минимизации потерь тепла при закачке и отборе нагретой или охлажденной воды целесообразно выбирать относительно изолированные участки водоносного горизонта с замедленным водообменом вдали от границ с поверхностными водоемами и водотоками. Поэтому рассматривается схема с удаленными границами пласта в плане, на которых задается постоянный напор H_0 и постоянная температура T_0 подземных вод

$$H_\Gamma = H_0, \quad T_\Gamma = T_0, \quad (4)$$

где Γ – внешний контур участка, на котором производится закачка и отбор воды из пласта.

В момент времени, соответствующий началу нагнетания и откачки, во всей области фильтрации задаются естественные напор и температура подземных вод. Для пластов в зоне замедленного водообмена на небольших участках допустимо принять однородное распределение напора и температуры

$$H(x, y, 0) = H_0, \quad T(x, y, 0) = T_0. \quad (5)$$

Баланс тепла в водоносном горизонте за период времени $(0, t)$ определяется на основе равенства тепловых потоков от внутренних источников (стоков),

потерь тепла через кровлю и подошву интегральному изменению тепловой энергии в эксплуатируемой части водоносного горизонта

$$\int_{\Omega} \int_0^t [mq_\Sigma(\tau) - q_t(\tau) - q_b(\tau)] d\tau d\Omega = \left[n \rho_f C_f + (1-n) \rho_{sk} C_{sk} \right] \int_{\Omega} \Delta T m d\Omega, \quad (6)$$

где Ω – область активного водо- и теплообмена в водоносном горизонте, $\Delta T = T(x, y, t) - T_0$, температура $T(x, y, t)$ рассчитывается по уравнению (3).

Поступление тепла через i -ю скважину с переменным дебитом в течение периода времени $(0, t)$ определяется по соотношению

$$\int_0^t q_i d\tau = C_f \rho_f \int_0^t Q_i(\tau) \Delta T_i(\tau) d\tau.$$

Аналогично определяется количество тепла, отбираемое откачивающей скважиной.

Кинематическая вязкость воды в диапазоне ее изменения от 6 до 25 °С, характерном для аккумуляции и использования тепла, изменяется от $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ до $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что соответственно изменяет коэффициент фильтрации. При этом следует учитывать, что изменения температуры подземных вод характерны для ограниченных по площади участков вокруг скважин. Поэтому для расчета рассматриваемых технологических процессов, в случае нескольких скважин, в первом приближении допустимо задавать усредненный коэффициент фильтрации, определяемый при средневзвешенной температуре пласта и подземных вод в зоне активного водо- и теплообмена.

Вычислительная реализация математической модели выполнена с помощью программы ModFlow 2009 (Schlumberger W.S.), предназначенной для конечно-разностного решения уравнений фильтрации и переноса в водоносных горизонтах.

При численном решении краевой задачи (1), (3) – (5) формулы (2) заменяются следующими

$$q_t = -\frac{\lambda}{n} \frac{(T - T_1)}{\Delta z}; \quad q_b = \frac{\lambda}{n} \frac{(T - T_2)}{\Delta z},$$

где T_1, T_2 – температура в породах кровли и подошвы пласта; Δz – среднее расстояние между центрами блоков, соответствующих водоносному горизонту и кровле (подошве) пласта.

Тестирование численной модели. 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.

Поэтому доказать вычислительную корректность разработанной модели можно для случая отдельной скважины, нагнетающей нагретую воду, для которого Лапшин Н.Н. получил аналитические решения на основе схемы и формулы Ловерье [6]. Эти решения не учитывают кондуктивный перенос в водоносном горизонте, что допустимо при высоких дебитах и скоростях нагнетания.

В случае нагнетания нагретой воды через одиночную скважину, формула для расчета температуры подземных вод имеет вид

$$T(r, t) = T_0 + (T_s - T_0) \operatorname{erfc} \frac{(\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}) \pi (r^2 - r_s^2) m}{Q_s C_f \sqrt{t - \eta}};$$

$$\eta = \frac{\pi (r^2 - r_s^2) m}{Q_s \bar{C}}; \quad \bar{C} = \frac{C_f}{C_{sk}}, \quad (7)$$

где Q_s – дебит скважины; r_s – ее радиус; T_s – температура нагнетаемой воды.

Сопоставительные расчеты по формуле (7) и в программе ModFlow были выполнены для гидрогеологических условий участка на территории Западного Донбасса, который может быть использован для аккумуляции и отбора тепловой энергии. Свойства горных пород сведены в таблицу. Размер шага сетки численной модели принят равным 5 м, дебит скважины $Q_s=300 \text{ м}^3/\text{сут}$, температура нагнетаемой воды $T_s=25^\circ\text{C}$, начальная температуры подземных вод 12°C , среднее значение теплоемкости воды в этом диапазоне $4120 \text{ Дж}/(\text{К}\cdot\text{м}^3)$, средняя мощность пласта $m=20 \text{ м}$, упругость $\mu=0,0001$, пористость $n=0,2$. Результаты расчетов представлены на рис. 1–3.

Сравнение результатов показывает хорошую согласованность численной модели с аналитическим решением. Более крутой фронт температуры, полученный по формуле (7), объясняется двумя факторами: наличием члена „диффузионного“ типа – кондуктивного потока тепла в уравнении (3), который не учитывается в формуле (7), а также погрешностью численного решения [7].

Таблица

Теплофизические и фильтрационные свойства горных пород, принятые при моделировании

Слой	C_{sk} , Дж/(К·м ³)	λ , Дж/(сут·м·К)	ρ , кг/м ³	K , м/сут
Кровля (глина)	1656000	149472	1800	10^{-4}
Пласт-коллектор (песчаник)	1670000	150480	1900	3
Подошва (мергель)	1840000	221184	2000	0,1

Максимальные отклонения между профилями температуры, рассчитанными двумя методами, не превышают 2°C (менее 10 % от разности температур) и характерны только для зоны раздела теплой и холодной воды (в полосе шириной 15–20 м). С течением

времени отклонение между численным и аналитическим решением не возрастает. При уменьшении коэффициента теплопроводности водоносного горизонта температурный фронт, рассчитанный с помощью численной модели, становится более крутым. Вместе с тем, не следует ожидать полного совпадения двух профилей, поскольку численное решение получено для уравнения диффузионного типа, а аналитическое – для уравнения гиперболического типа, для которого характерны разрывы первой производной [7].

Кондуктивный теплоперенос в водоносном горизонте усиливает размывание границы раздела теплой и холодной воды. Следует отметить, что фактически численная модель оказывается ближе к реальности за счет макродисперсии, сопровождающей явления переноса в фильтрационных потоках, когда происходит ускоренная миграция отдельных струек теплой воды впереди основного фронта вытеснения.

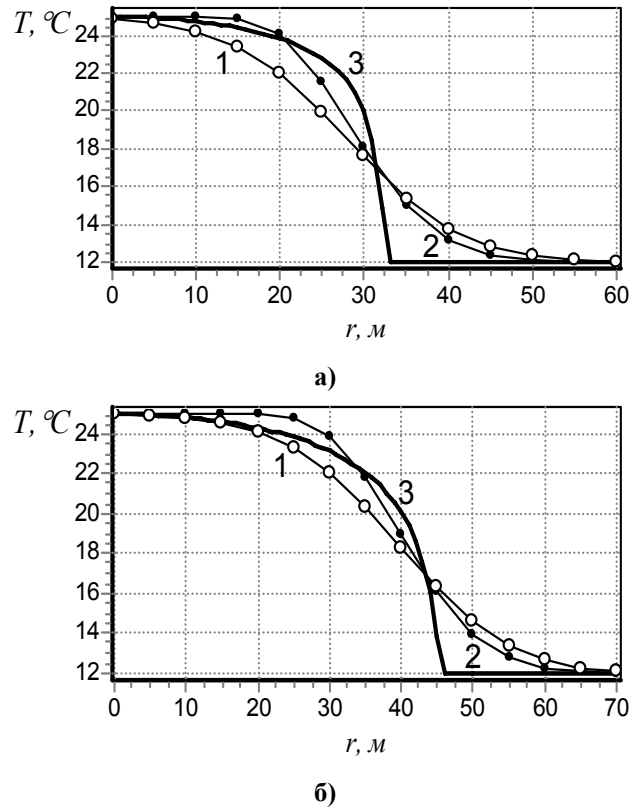


Рис. 1. Распределение температуры подземных вод (T) вокруг нагнетательной скважины в моменты времени 90 сут (а) и 180 сут (б): 1 – численное решение при значении λ из таблицы; 2 – численное решение при 0.02λ ; 3 – аналитическое решение; r – расстояние от скважины

При сравнении расчетов, выполненных двумя методами, необходимо учитывать, что размер блока сетки сопоставим с размером области максимальных отклонений между двумя профилями температуры. На прак-

тике отклонения до 3°C не являются решающими, их вообще затруднительно подтвердить *in-situ*. Поэтому оцененная погрешность модели может считаться приемлемой для решения практических задач.

Корректность численного решения была подтверждена также путем проверки условия баланса тепловой энергии в эксплуатируемом водоносном горизонте (6). Рассматривалась следующая схема аккумуляции и отбора тепловой энергии: выполняется закачка в течение 3 месяцев, затем, после паузы той же продолжительности, производится откачка теплой воды из скважины.

Анализ рис. 2 позволяет количественно оценить длительность периодов прогрева подземных вод в процессе закачки и их охлаждения в процессе отбора теплой воды. С увеличением теплопроводности пород водоносного горизонта – замедляется прогрев воды и возрастают потери тепла.

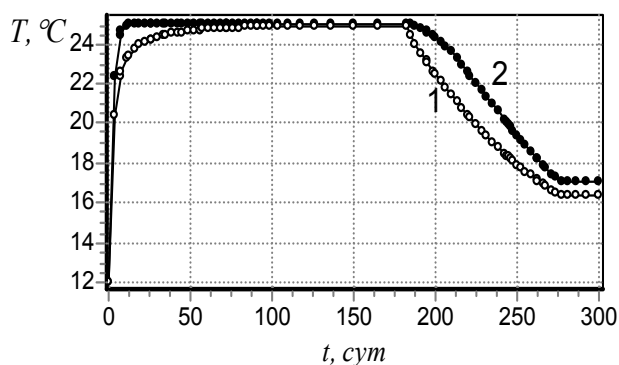
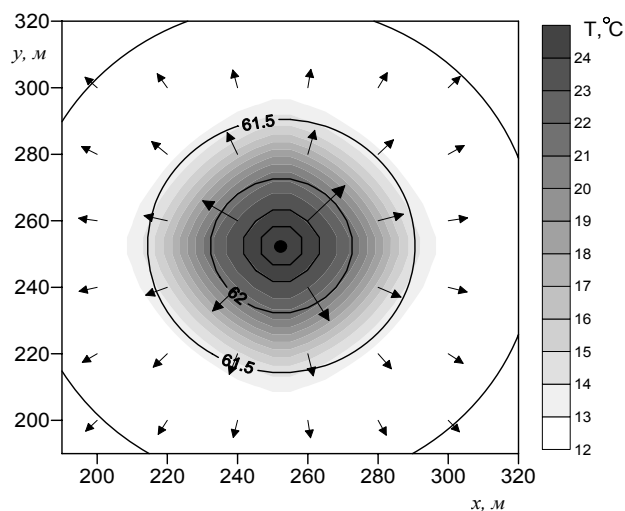


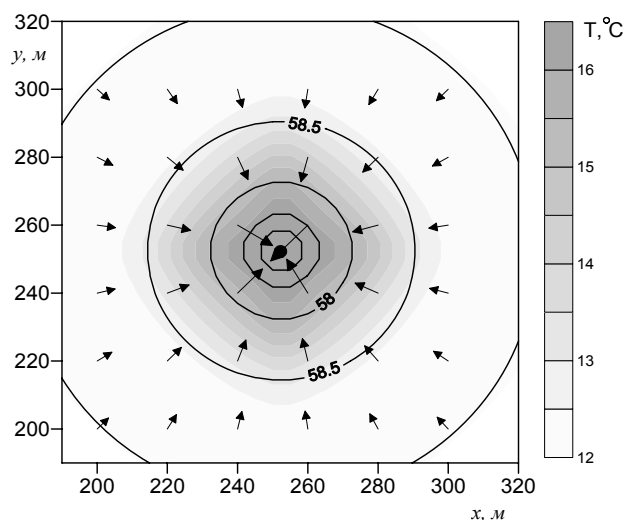
Рис. 2. Изменение температуры подземных вод (T) вблизи нагнетательной скважины по результатам численного моделирования. Обозначения см. рис. 1; t - время

Согласно расчетам, к моменту завершения закачки (в течение 3 месяцев) в водоносном горизонте остается 98,17% тепла, поступившего через скважину при значении теплопроводности λ , взятому из таблицы. При меньшем значении коэффициента теплопроводности ($0,02 \lambda$) в водоносном горизонте, к моменту завершению закачки, остается 98,31% исходного тепла. Таким образом, суммарные потери тепла через кровлю и подошву в период закачки, для принятых исходных данных, отличаются незначительно.

Более заметны отличия между потерями тепла в течение более продолжительного периода: после паузы и последующей откачки. Так, в результате откачки эквивалентного объема воды с тем же дебитом в течение того же периода через скважину удастся отобрать всего 61,92% исходной тепловой энергии. Если свести к минимуму потери тепла через кровлю и подошву водоносного горизонта (при коэффициенте теплопроводности кровли и подошвы $0,02 \lambda$), то удастся отобрать существенно больше аккумулированной тепловой энергии – 73,87% от ее исходного количества. Остальная часть тепла остается в водоносном горизонте на участке вблизи скважины (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Распределение уровня подземных вод (изолинии) и их температуры (оттенки серого цвета) в водоносном горизонте: а) к моменту окончания закачки; б) после паузы и откачки воды. Стрелками показаны направления течения подземных вод

Выводы. Разработана численная модель фильтрации и теплопереноса в водоносном горизонте, используемом в качестве сезонного хранилища тепловой энергии. Используемые при тестировании модели гидрогеологические и теплофизические параметры соответствуют условиям реального объекта, пригодного для подземного хранения тепловой энергии. Сравнение результатов численного моделирования с соответствующим аналитическим решением теплопереноса в радиальном потоке подземных вод показало удовлетворительную точность, приемлемую при решении практических задач. Расчеты теплового баланса позволили оценить роль теплопроводности пород водоносного горизонта, его кровли и подошвы на величину тепловых потерь в процессе его эксплуатации.

Дальнейшее развитие данной модели целесообразно путем повышения ее адекватности реальной геотехнологической схеме, которая предполагает одновременную закачку и отбор воды разной темпера-

туры через систему нескольких скважин. Кроме того, необходима оценка экономической эффективности подземного хранения тепловой энергии на основе результатов моделирования.

Список литературы / References

1. Арнс В.Ж. Физико-химическая геотехнология: Учеб. пособие / Арнс В.Ж. – М: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. – 656 с.

Arens, V.Zh. (2001), *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya* [Physical and Chemical Geotechnology], Tutorial, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, Moscow, Russia, 656 p.

2. Снайдерс А.Л. Подземное аккумулярование тепла и холода в водоносных слоях / А.Л. Снайдерс, О.А. Потапова // АВОК. – 2001. – № 3. – С. 30–37.

Snaiders, A.L. and Potapova, O.A. (2001), "Underground Accumulation of Heat and Cold in Aquifers", *AVOK*, no.3, pp. 30–37.

3. Бэр Я. Физико-математические основы фильтрации воды / Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. – М.: Мир, 1992. – 451 с.

Bear, J., Zaslavsky, D. and Irmay, S. (1992), *Fiziko-matematicheskiye osnovy filtratsyi vody* [Physical Principles of Water Percolation], Mir, Moscow, Russia, 451 p.

4. Гончаров С.А. Термодинамика: Учебник / Гончаров С.А. – М: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 440 с.

Goncharov, S.A. (2002), *Termodinamika* [Thermodynamics] Textbook, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, Moscow, Russia, 440 p.

5. Bundschuh, J. and Suárez, M.A. (2010), *Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems: Fundamentals of Mass, Energy and Solute Transport in Poroelastic Rocks*, CRC Press, 522 p.

6. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика / Шестаков В.М. – М.: КДУ, 2009. – 336 с.

Shestakov, V.M. (2009), *Hydrogeodinamika* [Hydrogeodynamics], KDU, Moscow, Russia, 336 p.

7. Фрид Ж. Загрязнение подземных вод / Фрид Ж. – М.: Недра, 1993. – 304 с.

Fried, J. (1993), *Zagryaznenie podzemnykh vod* [Groundwater Pollution], Nedra, Moscow, Russia, 304 p.

Сезонна нерівномірність споживання і обмеженість запасів природних енергоносіїв в Україні призводить до необхідності пошуку нетрадиційних способів збереження і добичі теплової енергії. У гірничо-геологічних і кліматичних умовах країни зниження енергетичних навантажень може бути досягнуте за рахунок створення систем підземної акумуляції теплоносіїв. Ці системи забезпечать опалювання, гаряче водопостачання і кондиціонування інженерних споруд за рахунок збереження літнього тепла і зимового холоду у водоносних пластах. Ефективність застосування цієї геотехнології має бути обґрунтованою чисельним моделюванням фільтрації і теплоперенесення в пласті, що використовується в якості колектора.

Обчислювальна реалізація математичної моделі була виконана за допомогою програми ModFlow 2009 (Schlumberger W.S.). Тестування моделі виконано на основі аналітичного рішення задачі радіального теплоперенесення. Максимальні відхилення між профілями температури, розрахованими двома методами, не перевищують 2 °С (менше 10 % від різниці температур) і характерні тільки для зони розділу теплої і

холодної води (у смузі шириною 15–20 м). Із часом відхилення між чисельним і аналітичним рішенням не зростає. Оцінена похибка моделі може вважатися прийнятною для вирішення практичних завдань.

На основі аналізу теплового балансу встановлено, що до моменту завершення закачування у водоносному горизонті залишається понад 98% тепла, що надійшло через свердловину, у діапазоні реальних значень коефіцієнта теплопровідності пласта. Таким чином сумарні втрати тепла через покрівлю і підшову в період закачування, для прийнятих початкових даних, відрізняються несуттєво. Помітніші відмінності між втратами тепла впродовж наступного періоду: після паузи і подальшого відкачування. Показано, що в результаті відкачування еквівалентного об'єму води з тим же дебітом і впродовж того ж періоду, через свердловину вдається відібрати від 62 до 74% початкової теплової енергії, залежно від значень коефіцієнта теплопровідності пласта.

Ключові слова: теплоперенесення, акумуляція, водоносний горизонт, тепла енергія, моделювання

Seasonal variations of consumption and limited sources of supplying natural fuels in Ukraine result in the necessity of searching for unconventional methods to extract and store thermal energy. Under the formed mining, geological, and climate conditions of the country the power loads can be smoothed through creating the systems of underground accumulation of coolants. These systems will provide heating, hot water supply and climate conditioning of engineering buildings owing to keeping summer heat and winter cold in aquifers. The efficiency of this geotechnology has to be justified by numerical modeling ground water flow and heat transport in a layer used as a coolant collector.

Calculating implementation of the mathematical model was made in the program ModFlow 2009 (Schlumberger W.S.). A model was validated based on an analytical solution of the radial heat transport problem. Maximal deviation between the temperature profiles obtained by two methods does not exceed 2 °C, which is less than 10% of the temperature difference, and characteristic only for the zone of warm and cold water contact in a stripe of 15–20 m width. The deviation between numerical and analytical solutions does not increase in time. The estimate model accuracy can be considered acceptable to the decision of practical tasks.

As a result of numerical analysis of heat balance it was established that more than 98% of heat stored through a well remain in the aquifer by the time to stop pumping; this corresponds to the actual range of heat conductance in the confining layers. It was shown that total heat loss through the aquifer roof and bed during the pumping period varies insignificantly for the given data range. The differences in heat loss are more significant during a next period, after a pause and subsequent pumping. Thus, as a result of pumping and extracting the equivalent water volume with the same discharge during the same period it is achievable to extract from 62 to 74% of initial thermal energy through a well; this depends on heat conductance of the confining layers.

Keywords: heat transport, accumulation, aquifer, thermal energy, modeling

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.А. Ковалевською. Дата надходження рукопису 22.06.11