

чання показує, що найбільш розвинутою галуззю є застосування геотермальних теплових насосів, які використовують тепло верхніх шарів Землі. Серед усіх джерел геотермальної енергії на даний час вони становлять більш ніж 50% від загальної потужності всіх інших джерел.

2. В Україні геотермальні теплові насоси використовуються в системах теплопостачання більш ніж 120 котеджів, басейнів, офісних центрів, учбових корпусів, адміністративних будівель та готелів.

3. Розрахунки показують, що застосування системи підключення геотермальних теплових насосів з використанням підземного акумулятора теплоти і застосуванням для його роботи нічного тарифу може знизити собівартість теплоти на 26-30%.

1. *L. Rybach*, 2010 (<http://www.wgc2010.org>).
2. *Lund J., Boyd T.* Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review // Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
3. *Снежкін Ю.М.* Энергозберігаючі теплонасосні технології для систем теплопостачання житлово-комунального господарства і промисловості (<http://www.minregion.gov.ua>).
4. *Соколов Е.Я., Бродянский В.М.* Энергетические основы трансформации тепла и процессы охлаждения. – Москва. – 1968. – С. 327.
5. *Ierrell Robert E.* Performance and analysis of "series" heat pump-assisted solar heated residence in Madison // Wisconsin. Solar energy. – 1979. – Vol. 23. – No. 5. – 451–453 p.
6. *Corman Y.C., Mc.Gowan Y.G., Peter W.D.* Solar augmented home heating heat pump systems. // 9-th Intersoc. Energy Convers. Eng. Convers. – San-Francisco, California.
7. [www.atmosfera.ua](http://www.atmosfera.ua)
8. *Пособие по проведению* технико-экономических исследований. – Методика ЮНИДО, 1986. – 292 с.

УДК 556.322.63.001.57

**И.А.Садовенко**, докт.техн.наук, **А.В.Инкин**, канд.техн.наук (Национальный горный университет, Днепропетровск)

### **Верификация математической модели переноса тепловой энергии в обводненных породах сжигаемого угольного пласта**

*Статья направлена на тестирование разработанной ранее математической модели переноса тепла и установление динамики формирования гидротермических полей в водоносном горизонте, залегающем над сжигаемым угольным пластом. Решение эпизодической задачи было выполнено на основании данных, полученных в ходе проведения крупнейшего научно-исследовательского проекта по подземному сжиганию угля на месторождении Наппа в США. Относительная погрешность определенных положений уровня и температур подземных вод не превысила 5%, что свидетельствует о возможности использования предложенной модели в практических расчетах по оценке эксплуатационных запасов образующейся геотермальной энергии и установлению геотехнологических параметров ее отбора.*

**Ключевые слова:** подземное сжигание угля, тепловая энергия, водоносный горизонт.

*Стаття спрямована на тестування розробленої раніше математичної моделі переносу тепла та встановлення динаміки формування гідротермічних полів у водоносному горизонті, який залягає над вугільним пластом, що спалюється. Розв'язання епізодичної задачі було виконано на підставі даних, отриманих у ході проведення найбільшого науково-дослідного проекту з підземного спалювання вугілля на родовищі Наппа в США. Відносна похибка певних положень рівня і температур підземних вод не перевищила 5%, що свідчить про можливість використання запропонованої моделі в практичних розрахунках для оцінки експлуатаційних запасів геотермальної енергії та встановлення геотехнологічних параметрів її відбору.*

**Ключові слова:** підземне спалювання вугілля, теплова енергія, водоносний горизонт.

**Введение.** Максимальная эффективность отработки шахтных полей достигается путем совмещения добычи залегающего в наиболее благоприятных условиях угля с первоначальной дегазацией вмещающих пород и подземным сжиганием остаточных угольных запасов. При этом количество неизвлеченного угля в зависимости от применяемых технологических методов разработки изменяется от 30 до 50% и объясняется сложными геолого-гидрогеологическими условиями угольных месторождений Украины: неустойчивостью и высокой обводненностью горных пород, малой мощностью и низкой маркой пластов, большой глубиной и высокой газообильностью подземных выработок. Разработка такого количества остаточного угля (технологические целики, выбросо- и удароопасные зоны, забалансовые запасы) может существенно повысить энергетическую безопасность страны и требует модернизации способа подземного сжигания, основные принципы и недостатки которого состоят в следующем.

Для взаимодействия угля с дутьем в пласте между скважинами создается реакционный канал, при образовании которого применяют фильтрационную, гидроразрывную, электрическую и буровую сбойку, после чего происходит поджиг угля и подача химических реагентов (воздуха, кислорода или водяного пара) в виде дутья через нагнетательную скважину [1, 2]. Участок угольного пласта, где производится его сжигание (подземный теплогенератор), можно условно разделить на две части, которым соответствуют различные реакции горения. В первой по направлению газового потока части (зона отработанного угля и окисления) содержится свободный кислород, вследствие чего в ней преобладают окислительные реакции, во второй происходят восстановительные. Тепло, образующееся за счет гетерогенных и гомогенных реакций в зоне окисления, расходуется на восстановительные реакции и существенным образом влияет на температуру и химический состав вы-

рабатываемого газа. Таким образом, длина зоны окисления определяет минимально необходимое расстояние между эксплуатационными скважинами. Образовавшийся газ по продуктивной скважине выводится на поверхность и через трубопровод попадает в установки для очистки. Утилизация его физического тепла производится в теплообменниках, работающих в широких диапазонах: высокотемпературном (800-600°C), средне- (600-400°C) и низкотемпературном (400-150°C). В зависимости от температуры исходящего газа получаемая тепловая энергия может быть в виде горячей воды или пара.

Существенным преимуществом способа подземного сжигания угля (ПСУ), обусловившим его широкомасштабное использование, является экологическая чистота производимой тепловой энергии, незначительная степень воздействия на природный ландшафт и отсутствие опасного подземного труда горнорабочих. Кроме того, повышенный интерес к этой геотехнологии обоснован возможностью разработки значительного количества угля, залегающего в сложных горно-геологических условиях (большие глубины залегания, малая мощность пластов, тектонические нарушения), что подтверждается мировым научно-практическим опытом ее применения [3]. Промышленно-экспериментальные работы по подземному сжиганию угольных пластов различной мощности проводились в бывшем СССР на глубинах до 250 м, в США – до 300 м, в Австралии – до 500 м и в Европе – до 1300 м (рис. 1). Однако, несмотря на универсальность, ресурсно-энергетические преимущества и вековой научно-промышленный опыт развития, ПСУ до сих пор не получило широкого распространения ввиду больших потерь вырабатываемого тепла и газа в породном массиве. Неконтролируемые утечки из подземного генератора приводят к непроизводительным затратам энергии, резко снижают технико-экономические показатели и требуют разработки мер по усовершенствованию этой геотехнологии.

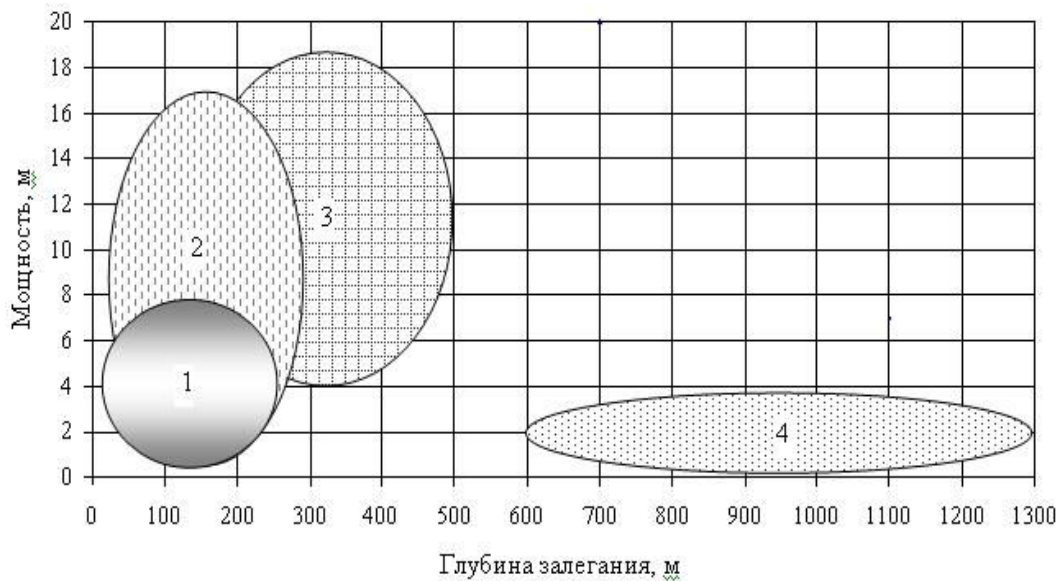


Рис. 1. Сравнительная характеристика горно-геологических условий угольных пластов, разрабатываемых методом ПСУ в разных странах: 1-4 – соответственно в бывшем СССР, США, Австралии и Европе.

**Постановка задачи.** В работах [4, 5] для повышения эффективности ПСУ уже была установлена возможность отбора подземных вод, нагреваемых тепловым потоком, поступающим из реакционного канала в вышелегающие породы, и разработана математическая модель, отражающая пространственно-временные изменения их температуры. Показана эвентуальность использования тепла вод, насыщающих породы кровли подземного теплогенератора, для теплоснабжения зданий и сооружений, что позволит повысить до 85% КПД процесса подземного сжигания. Целью данной работы является тестирование и проверка адекватности предложенной модели переноса тепла в обводненных породах сжигаемого угольного пласта путем решения эпигнозной задачи, основанной на данных промышленного эксперимента. Это позволит оценить возможность ее использования в практических расчетах по обоснованию рациональных технологических параметров извлечения аккумулирующейся тепловой энергии.

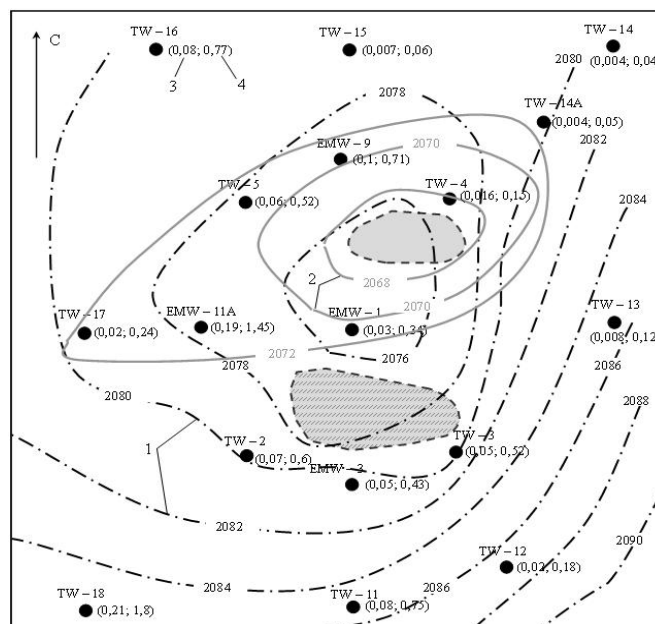
**Результаты.** Исходными данными для решения обратной задачи могут служить результаты, полученные в ходе проведения крупнейшего исследовательского проекта по ПСУ (стоимостью 10 млн долл.) на месторождении Hanna в США [6]. Промышленный эксперимент осуществлялся с помощью 2-х модулей, на одном из которых работы велись по методу CRIP (с управ-

ляемым переносом точки подачи дутья), на другом методом ELW (путем сбивания скважин). С помощью обоих методов подземному сжиганию подвергался угольный пласт Hanna-1 средней мощностью 10 м и 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 (A, B, C, D), залегающих от более старых к молодым. При этом блок D, состоящий из иловых сланцев, имеет мощность от 5 до 30 м, а блок C при мощности 30-45 м представлен в основном песчаниками, чередующимися с алевролитовыми и глинистыми включениями. Породы блоков A и B являются породной кровлей угольного пласта и сложены преимущественно алевролитами с прослоями песчаников. В их пределах залегает водоносный горизонт, приуроченный к крупнозернистым песчаникам, заключенным между слоями алевролитов.

Для наблюдения за изменениями уровня, химического состава и температуры подземных вод, установления факторов, влияющих на эти показатели, и оценки соответствия технологии ПСУ экологическим нормам (WDEQ, LQD) использовались 22 мониторинговые скважины диа-

метром 0,18 м, расположенные вокруг модулей внутренним и внешним кольцом. Цель внешнего кольца скважин состояла в наблюдении за изменениями на всем участке Hanna-1, внутреннего – в непосредственной близости от реакционного канала. Кроме того, данные о колебании уровня подземных вод применялись для нахождения гидродинамических параметров водоносного горизонта [7]. Пробы воды для тестирования регулярно отбирались с помощью пневматических насосов из всех скважин с интервалом 30-60 мин, однако скважины TW-14А и EMW-4 периодически прекращали свою работу из-за технических проблем. Отбор проб проводился в стеклянные бутылки объемом 0,3 дм<sup>3</sup>, которые затем герметизировались и направлялись на изучение. При этом температура, Eh, pH, проводимость и щелочность воды определялась сразу же на экспериментальном участке с помощью хроматографа, а в лаборатории устанавливалось количество твердых веществ, аммония, сульфатов, сульфидов, аммиака, бикарбонатов, цианидов и фенолов, содержащихся в подземных водах.

Замерами положения уровня подземных вод было установлено, что в начале эксперимента центр воронки депрессии находился между двумя действующими участками и постепенно снижался в процессе сжигания угля. При этом общее направление течения подземных вод сохраняло свое северо-западное направление. Изменение ориентации потока происходило по мере развития саженого пространства в виде эллиптического закругления пьезоизогипс вокруг образующихся полостей (рис. 2). Более значительное понижение уровня произошло после закрытия модуля ELW и прекращения подачи дутья. В результате снижения избыточного давления воронка депрессии сместилась в центр неиспользуемой полости, резко понизила отметки (до 60 м) и нарушила свою симметричную форму. Полученные результаты показывают, что помимо природной анизотропии водоносного горизонта конфигурация формирующейся при ПСУ пьезометрической поверхности существенно зависит от давления в подземном теплогенераторе.



**Рис. 2. Уровневая поверхность подземных вод на экспериментальном участке Hanna-1 в процессе ПСУ:** 1, 2 – соответственно пьезоизогипсы до и после закрытия модуля ELW; 3, 4 – значения коэффициентов фильтрации (м/сут) и водопроницаемости (м<sup>2</sup>/сут) водоносного горизонта.

После прекращения подземного сжигания угля периодичность наблюдений за уровнем подземных вод резко сократилась до квартальных и полугодовых замеров. Поэтому сведения, характеризующие дальнейшее колебания пьезометрической поверхности на экспериментальном участке, зачастую непоследовательны и имеют случайный характер [7]. Однако даже имеющиеся незначительные данные однозначно свидетельствуют об активном восстановлении уровня подземных вод в первый год после завершения опытных работ и их базового режима в декабре 1992 г.

Кроме уровневых режимов подземные воды в процессе ПСУ существенно изменяли свою температуру, значения которой первостепенно зависели от близости экспериментальных модулей, времени и направления фильтрации [6–8]. Так, наибольшие увеличения температуры на участке Hanna-1 были зафиксированы в эксплуатационных скважинах (CPW-2, VIW-1), откуда после прекращения сжигания угля выходил перегретый пар (200-250°C), поменявший по мере поступления радиального потока в полость сжигания своё агрегатное состояние до горячей

воды (60-70°C). Мониторинговые скважины, расположенные вблизи этой зоны (TW-2, EMW-1 и EMW-3), также показали заметный рост температуры подземных вод на 45-55°C, а скважины, удаленные от модулей (TW-5, TW-14 и EMW-9) – ее слабое увеличение на 5-10°C. Однако после закрытия модуля ELW и перемены направления течения и подхода теплого фронта подземных вод со стороны участков сжигания температура в северо-западных скважинах резко возросла на 20-30°C. Изменения температуры вод, связанные с их смешением, также наблюдались после прекращения ПСУ в процессе заполнения образовавшихся полостей и восстановления естественного гидродинамического режима на экспериментальном участке.

Полученные результаты показывают, что в процессе сжигания угля в вышележащем водоносном горизонте происходят изменения гидродинамического режима, химического состава и температуры подземных вод. Возникающие воронки депрессии формируются в направлении распространения максимальных коэффициентов фильтрации и после прекращения подачи дутья перемещаются в сторону подземных теплогенераторов с резким понижением своих абсолютных отметок. При этом полное восстановление естественной пьезометрической поверхности происходит только спустя несколько лет после окончания опытных работ. Вызванные сжиганием угля термальные аномалии в водоносном пласте с течением времени перемещаются и меняют свою температуру в зависимости от направления и скорости фильтрации подземных вод.

Согласно предложенной в работах [4, 5] модели переноса тепла в водоносных породах сжигаемого угольного пласта, для нахождения температуры подземных вод сначала необходимо определить их скорость фильтрации. При этом, ввиду неоднородности граничных условий и проницаемости пород, аналитические формулы, несмотря на их разнообразие, не позволяют сколь-нибудь точно приблизиться к расчетной зависимости, которая бы отражала реальную гидрогеологическую картину на участках ПСУ.

Основные законы динамики подземных вод осложняются здесь зонами локальной дискретизации потоков в нарушенных термической обработкой горных породах, реакционных каналах и полостях, образованных сжиганием угля. Поэтому для прогнозирования гидродинамической обстановки в таких условиях используется метод математического моделирования.

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости применения численного моделирования фильтрации при изучении режима подземных вод на участке Hanna-1 и его реализации в программном комплексе MODFLOW v.4.5, являющимся мировым лидером в решении пространственно-временных задач геофильтрации. Согласно рекомендациям, предложенным в работе [9], разбивка исследуемого участка размерами 500×500 м производится сеткой с шагом 25×25 м и его увеличением в 5 раз возле модулей сжигания, что позволяет точно фиксировать конфигурацию формирующихся термо- и пьезоизогипс. 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 (рис. 3). Расположенная в ее пределах Скалистая гора, простирающаяся с юго-востока на северо-запад, является барьером для движения воды и задается в виде непроницаемой гидродинамической границы ( $Q = 0$ ). По остальному контуру участка Hanna-1, ввиду отсутствия детальной информации об области питания и разгрузки водоносного горизонта, задаются граничные условия первого рода ( $H = \text{const}$ ) 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 ( $H = f(t)$ ). Положение этих границ определялось путем нанесения контуров отработанных участков на расчетные слои. При моделировании работы модулей ПСУ после прекращения подачи дутья внутренние граничные условия не задавались.

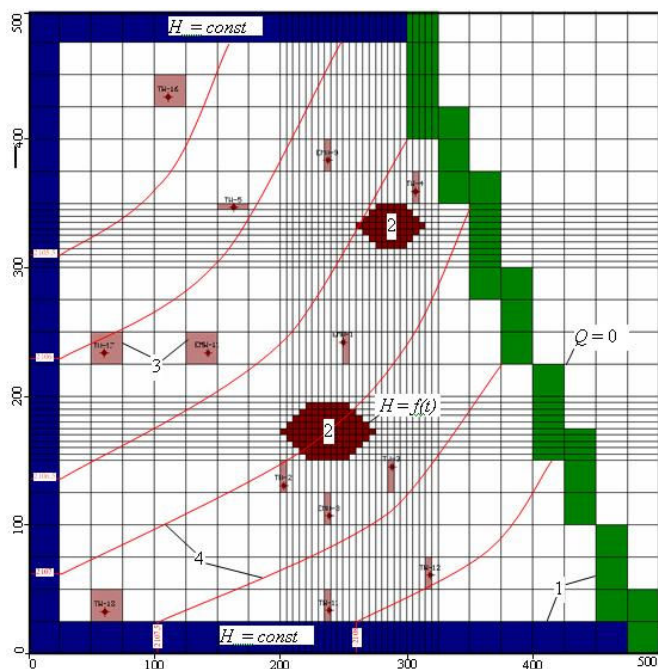


Рис. 3. Модель участка Hanna-1 в программном комплексе MODFLOW v.4.5: 1 – гидродинамические границы; 2 – модули ПСУ; 3 – скважины; 4 – пьезоизогипсы.

Исходя из существующих теоретических представлений о техногенной проницаемости и трещиноватости породной кровли угольного

пласта при его подземном сжигании, величина пористости и коэффициента фильтрации в пределах этого слоя на модели была задана увеличенной в 10 раз по сравнению с областями вне разработки угля. На остальных участках эти параметры принимались зонально по геологоразведочным данным, приведенным на рис. 2. Величина инфильтрации была задана в пределах верхнего слоя модели с интенсивностью, определенной в ходе метеорологических наблюдений: 135-155 мм/год.

Решение обратной гидродинамической задачи производилось в условиях нестационарного режима фильтрации, при этом основным критерием ее адекватности являлось сходство фактической и модельной пьезометрической поверхности на участке Hanna-1 в различные моменты времени. Результаты показывают, что на модели удалось практически полностью отразить динамику понижения и подъема уровня подземных вод в процессе эксплуатации модулей ELW и CRIP. Абсолютная погрешность между фактическими и расчетными данными находится в пределах 2-6 м (таблица 1).

Таблица 1. Погрешность определения положения уровня подземных вод на участке Hanna-1

Месяц	Абс. отм. пьезометрического уровня в скважинах (фактическая / на модели), м				Средняя абсолютная погрешность, м
	EMW-1	TW-3	TW-12	TW-16	
12.87	$\frac{2103,2}{2101,8}$	$\frac{2105,4}{2102,3}$	$\frac{2106,7}{2103,5}$	$\frac{2106,1}{2104,3}$	2,34
01.88	$\frac{2088,5}{2089,7}$	$\frac{2091,1}{2087,2}$	$\frac{2092,4}{2090,3}$	$\frac{2093,5}{2091,2}$	2,37
02.88	$\frac{2065,3}{2061,8}$	$\frac{2068,4}{2063,4}$	$\frac{2071,2}{2068,4}$	$\frac{2076,4}{2073,5}$	3,55
09.88	$\frac{2046,2}{2040,8}$	$\frac{2048,1}{2042,5}$	$\frac{2057,1}{2050,8}$	$\frac{2060,9}{2055,8}$	5,60
12.88	$\frac{2045,3}{2041,2}$	$\frac{2047,2}{2042,1}$	$\frac{2058,3}{2052,8}$	$\frac{2060,2}{2055,1}$	4,95
05.90	$\frac{2087,5}{2084,8}$	$\frac{2090,8}{2087,9}$	$\frac{2086,4}{2083,9}$	$\frac{2092,3}{2090,4}$	2,50
12.92	$\frac{2102,4}{2100,7}$	$\frac{2104,5}{2102,4}$	$\frac{2101,5}{2098,8}$	$\frac{2101,9}{2100,2}$	2,05

Анализ данных, характеризующих модельное и реальное распределение уровня подземных вод на территории экспериментального участка до, во время и после подземного сжигания угля (в период с 01.12.87 г. по 01.12.92 г.), показывает, что формирующаяся на модели воронка депрессии практически полностью повторяет свои естественные контуры. Наибольшие погрешности расчета (5-6 м) приурочены к периоду сжигания угля, что объясняется резким изменением гидродинамической структуры потока при образовании выгазованных пространств, по мере затопления которых отмеченные погрешности сглаживаются. Таким образом, предложенная геофильтрационная модель участка Hanna-1 идентично отображает динамику уровня подземных вод на всех этапах работы модулей ПСУ.

Установленные на модели скорости фильтрации подземных вод, изменяющиеся от 0,01 м/сут (естественный режим) до 0,2 м/сут (период затопления полостей сжигания), использовались для определения температуры блоков водоносных пород, залегающих над породной кровлей подземного теплогенератора [4, 5]. Затем эти значения задавались в соответствующие ячейки геофильтрационной модели в последовательности, отвечающей продвижению огневого забоя и динамике сжигания угольного пласта. Распределение температуры по площади простирающегося водоносного слоя производилось с помощью численной модели переноса тепла, подробно изложенной и протестированной в работе [10]. По результатам расчетов на рис. 4 приведены термо- и пьезоизогипсы, формирующиеся в водоносном пласте на участке Hanna-1 после прекращения ПСУ, анализ которых показывает возникновение локальной воронки депрессии, направленной на затопление полостей сжигания и уменьшения температуры подземных вод по мере удаления от них. Это подтверждает наличие установленной во время промышленного эксперимента зависимости распределения температуры подземных вод от направления и скорости их фильтрации.

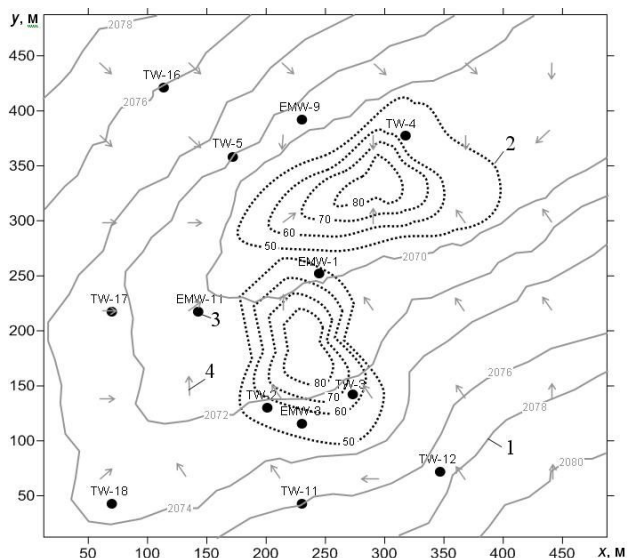


Рис. 4. Модельное распределение температуры и уровней подземных вод на участке Hanna-1 после завершения процесса ПСУ: 1, 2 – соответственно пьезо- и термоизогипсы; 3 – скважины; 4 – направления фильтрации подземных вод.

Для проверки точности разработанной модели и проведенных вычислений на рис. 5 выполнено сопоставление натуральных и модельных данных об изменениях температуры подземных вод в скважинах, расположенных вблизи модулей сжигания. Анализ графиков показывает, что максимальная относительная погрешность расчетов не превышает 5% и свидетельствует о достоверности полученных результатов. Приведенные данные подтверждают адекватность и точность разработанной модели переноса тепла в обводненных породах кровли сжигаемого угольного пласта.

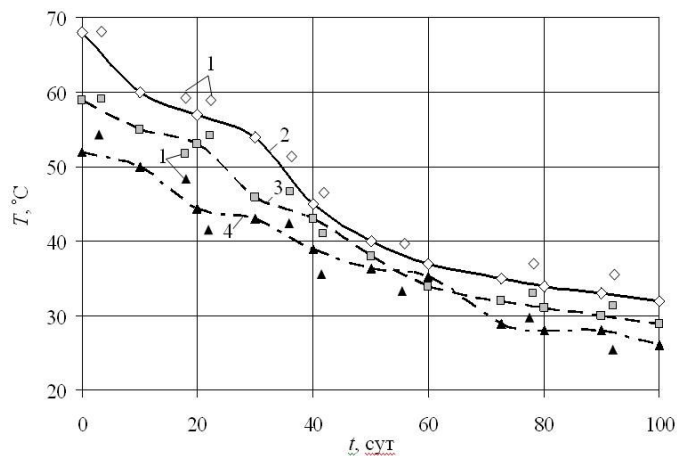


Рис. 5. Динамика изменения температуры подземных вод по натуральным (1) и модельным данным в скважинах TW-3 (2), TW-4 (3) и EMW-1 (4).

**Выводы.** Выполненная на основе научно-промышленного эксперимента на участке Hanna верификация модели переноса тепла в покрывающих породах сжигаемого угольного пласта показала ее инвариантность описываемому процессу. Оцененная динамика уровня подземных вод в процессе эксплуатации модулей ELW и CRIP, учитывающая изменение ориентации потока по мере увеличения саженного пространства, согласуется с фактическими данными в течение большей части периода эпигноза с абсолютной погрешностью 2-6 м и адекватным отражением формирующейся на участке воронки депрессии. На основании сопоставления в скважинах натуральных и реальных данных установлено, что результаты расчета на модели соответствуют фактическому изменению температуры в залегающем над реакционным каналом водоносном горизонте; при этом их относительная погрешность не превышает 5%.

С помощью протестированной численной модели переноса тепла возможно определение пространственно-временного расположения геотермических полей, формирующихся в водоносном пласте, залегающем над подземным генератором. Полученные результаты позволят определить количество тепловой энергии, накапливающейся в обводненных породах в зависимости от горно-геологических условий и стадии сжигания угольного пласта, а также технологические параметры ее отбора на практике.

Дальнейшее развитие предложенной модели целесообразно путем ее апробации на реальной геотехнологической схеме, которая предполагает одновременный отбор нагретых вод через систему из нескольких скважин. Кроме того, необхо-

дима оценка экономической эффективности использования тепловой энергии водоносных горизонтов при ПСУ.

1. Подземная газификация угольных пластов / *Е.В. Крейнин, Н.А. Федоров, К.Н. Звягинцев, Т.М. Пьянкова.* – М.: Недра, 1982. – 151 с.
2. *Путин Р.Н.* Подземная газификация / *Р.Н. Путин, И.Л. Фарберов.* – М.: Академиздат, 1955. – 80 с.
3. *Burton E.A., Upadhye R., Friedmann S.J. Leif R., McNab W., Knauss K., Ezzedine S., Smith J.R.* – 2004, Assessment of UCG site locations. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. Internal report.
4. *Садовенко И.А.* Численное исследование особенностей теплового поля вокруг подземного газогенератора / *И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, А.В. Инкин* // Збірник наукових праць НГУ. – 2012. – №39 – С. 11–20.
5. *Садовенко И.А.* Моделирование геотермических полей при подземном сжигании угольных пластов / *И.А. Садовенко, А.В. Инкин* // Геотехническая механика: Межведомственный сборник научных трудов / Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск 2014. – Вып. 120. – С. 160–170.
6. *Lindblom S.R.* Rocky Mountain 1 Underground Coal Gasification Test Hanna, Wyoming Groundwater Evaluation. Final Report June 10, 1988 – June 30, 1993 / *S.R. Lindblom, V.E. Smith.* – 1993. – 84 p.
7. *Marcouiller B.A.* Overburden characterization and post-burn study of the Hanna 4, underground coal gasification site, Wyoming, and comparison to other Wyoming UGG sites / *B.A. Marcouiller, L.K. Burns, F.G. Ethridge.* – 1984. – 277 p.
8. *Berdan G.* A restoration plan for the Hanna. Wyoming. Underground coal gasification site in carbon county. Wyoming / *G. Berdan.* – 1993. – 128 p.
9. *Садовенко И.А.* Синтезирование численных моделей при решении задач управления геофильтрационным состоянием горного массива / *И.А. Садовенко* // Известия вузов. Горный журнал. – 1991. – №12. – С. 19–22.
10. *Садовенко И.А.* Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии // *И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, А.В. Инкин* // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 1. – С. 40–45.