

УДК 622.278

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ПОДЗЕМНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ

Садовенко И. А., Инкин А. В.

(Государственное ВУЗ "НГУ", г. Днепропетровск, Украина)

*Розроблена математична модель теплоперенесення в підземних водах покриваючих порід вугільного пласта при його спалюванні. Для гірничо-геологічних умов ділянки "Ольхова Нижня" за допомогою програми чисельного моделювання ModFlow 2009 отримані параметри зміни розмірів і форми теплових аномалій, що формуються у водопроникних породах.*

*A mathematical model of heat transport in groundwater which saturate the overlying rocks of the coal seam by burning it. For the geological site conditions "Olhova Nizhnyaya" using simulation ModFlow 2009 estimates of changes in the size and shape of thermal anomaly formed in permeable rocks above the roof of the coal seam, depending on the angle of his fall, and the stage of combustion.*

**Введение.** По оценкам ведущих нефтегазовых компаний, начало XXI века ознаменовалось значительным увеличением доли угля в топливно-энергетическом балансе ряда стран мира [1]. Рост его потребления был вызван, с одной стороны, ограниченностью запасов нефти и природного газа, а также перемещением разрабатываемых месторождений в труднодоступные районы, с другой стороны, проблемами безопасности атомных электростанций и высокими затратами на захоронение радиоактивных отходов.

Вместе с тем, увеличение добычи и переработки угля традиционными способами привело к превращению угледобывающих регионов в зоны экологического бедствия. Так, работа небольшой

угольной электростанции мощностью 200 МВт сопровождается ежегодным выбросом в атмосферу 100 тыс. т твердых частиц, 15 тыс. т сернистых соединений и 2 тыс. т окислов азота [2].

Расширение сферы использования угольных ресурсов возможно путем их преобразования на месте залегания в экологически более чистый газообразный энергоноситель. Наиболее технически освоенным процессом такой переработки является подземное сжигание угля (ПСУ). Однако, несмотря на почти вековой научно-промышленный опыт развития, оно до сих пор не получило широкого распространения ввиду значительного рассеивания вырабатываемой тепловой энергии в породном массиве [3].

**Постановка задачи исследований.** Для повышения КПД данной технологии в работе [4] уже была установлена возможность отбора и количественная характеристика теплового потока поступающего из реакционного канала в выше залегающий водоносный горизонт. Целью данной работы является количественный анализ пространственно-временной динамики формирования гидрогеотермических полей, образующихся в водоносном пласте при сжигании угля. Это позволит обосновать рациональные технологические параметры извлечения тепла из откачиваемых нагретых вод.

**Материал и результаты исследований.** Двумерная в плане миграция тепла в подземных водах описывается уравнениями, приведенными в работе [5]. 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 объемный блок малой толщины в виде параллелепипеда, расположенный непосредственно над нагретым водоупором, где происходит теплообмен (рис. 1). Баланс тепла в блоке определяется на основании равенства потока тепла снизу от реакционного канала ( $Q_0$ ) трем составляющим: конвективному выносу тепла фильтрационным потоком ( $Q_2$ ), убыли тепла в результате замещения теплой воды холодной ( $Q_1$ ), кондуктивного потока тепла вверх ( $Q_3$ ), а также тепла, затрачиваемого на изменение температуры подземных вод и горных пород непосредственно в блоке.

При учёте баланса тепла в блоке приняты следующие допущения: 1) баланс тепла определяется для последовательности периодов (например, длительностью 1 сут), в течение каждого из которых теплофизические параметры осредняются; 2) боковая теплоотдача из блока не учитывается, поскольку она на порядок меньше теплоотдачи через его верхнюю границу; 3) коэффициенты граничного условия задачи теплопереноса определяются на основе предварительно рассчитанного поля скоростей фильтрации; 4) температура в блоке осредняется по ее начальным и конечным значениям в каждый период; 5) температура воды и породы в блоке одинакова и выравнивается условно мгновенно при втекании и вытекании воды с разной температурой.

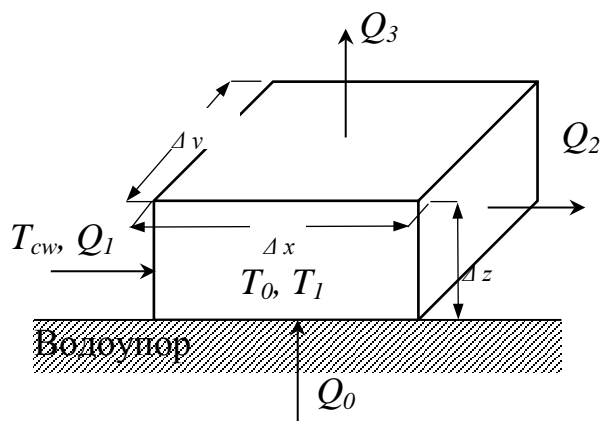


Рис. 1. Схема баланса тепла в блоке водоносного пласта над кровлей реакционного канала при сжигании угля

При сделанных допущениях изменение температуры воды и пород в блоке определяется уравнением баланса тепла:

$$Q_0 + Q_1 - Q_2 - Q_3 = (T_1 - T_0) \cdot B, \quad (1)$$

где 
$$B = \rho_w c_w V_w + \rho_n c_n V_n, \quad (2)$$

$$Q_0 = q \Delta x \Delta y, \quad (3)$$

$$Q_1 = AT_{cw}, A = \Delta y \cdot \Delta z \cdot V \cdot \tau \cdot c_w \rho_w T_{cw}, \quad (4)$$

$$Q_2 = A \cdot \frac{T_1 + T_0}{2}, \quad (5)$$

$$Q_3 = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \frac{\lambda}{\Delta z} \left( \frac{T_1 + T_0}{2} - T_{cw} \right) = D \cdot \left( \frac{T_1 + T_0}{2} - T_{cw} \right). \quad (6)$$

Здесь  $T_{cw}$  – фоновая температура воды в водоносном горизонте (температура холодной воды);

$T_0, T_1$  – соответственно температура воды и пород в блоке сетки размерами  $\Delta x \Delta y \Delta z$  в начале и в конце периода времени осреднения  $\tau$ ;

$q$  – мощность теплового потока от реакционного канала;

$V$  – скорость фильтрации;

$\lambda$  – теплопроводность водоносного пласта;

$\rho_w, c_w, V_w$  – соответственно плотность, теплоемкость и объем воды в блоке;

$\rho_n, c_n, V_n$  – плотность, теплоемкость и объем пород в блоке.

Подставляя выражения (2)–(6) в (1), получим

$$T_1 = \frac{Q\tau - (A + D) \cdot (T_0 / 2 - T_{cw}) + BT_0}{B + A/2 + D/2}.$$

Прибавим и вычтем из числителя  $(A + D) \frac{T_0}{2}$ , тогда

$$T_1 = T_0 + \frac{Q\tau - (A + D) \cdot (T_0 - T_{cw})}{B + A/2 + D/2}, \quad (7)$$

если рассчитывается временной ряд температур то

$$T_i = T_{i-1} + \frac{Q_i\tau - (A + D) \cdot (T_{i-1} - T_{cw})}{B + A/2 + D/2}, \quad (8)$$

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

Изменение теплоемкости  $C$  и теплопроводности  $\lambda$  водоносного пласта в зависимости от температуры  $T$  выражается следующими уравнениями [6]

$$C_n = C_{20} + 0,1n(T - 20) \quad (9)$$

$$\lambda = \lambda_{20} / (1 + \alpha \lambda_{20} T) \quad (10)$$

где  $C_{20}$ ,  $\lambda_{20}$  – соответственно теплоемкость и теплопроводность водоносных пород в нормальных условиях (при  $T = 20$  °С);  $n$ ,  $\alpha$  – постоянная (зависящая от типа пород) и поправочный коэффициент соответственно.

Изменение коэффициента фильтрации в зависимости от температуры воды учитывается изменением вязкости воды  $\mu$  (Па·с)

$$\mu = 0,000183 / (1 + 0,0337 T + 0,000221 T^2). \quad (11)$$

В результате последовательных расчетов по формуле (8) можно определить переменную во времени температуру, которая задается в блоке конечно-разностной сетки при численном моделировании. В остальных блоках над водоупором вне реакционного канала задаются нулевые потоки тепла и воды.

Коэффициенты граничных условий были определены по формуле (8) в программе Mathcad для горно-геологических условий участка «Ольхово нижнее», расположенного в пределах Чистяково-Снежнянского угленосного района Донецкого бассейна. Каменноугольные отложения данной территории (рис. 2) представлены смоляниновской свитой ( $C_2^3$ ), в разрезе которой между отрабатываемыми угольными пластами  $h_8$  и  $h_{11}$  развиты несколько нерабочих угольных пластов ( $h_9$ ,  $h_{10}^n$ ,  $h_{10}^1$ ) с углами падения от 10 до 30° [7]. Данные пласты имеют простое строение и повсеместное распространение в пределах выделенного участка. Угли относятся к антрацитам ( $W^a = 2,5$  %,  $A^c = 17$  %,  $S_{об}^c = 1,8$  %). Для свиты  $C_2^3$  характерно развитие обводненной толщи «бабаковских» песчаников  $h_{10}Sh_{11}$  мощностью 50–60 м, залегающих выше угольного пласта  $h_{10}^1$ . В пределах этой толщи подземные воды имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав с минерализацией до 3 г/л и не используются для питьевого водоснабжения. Учитывая требования, предъявляемые к угольным пластам, отрабатываемым способом ПСУ [3] и фактические данные о строении участка, можно считать, что на данной территории оптимальным будет разработка угольного пласта  $h_{10}^1$  с использованием в качестве теплоносителя воды песчаников  $h_{10}Sh_{11}$ .

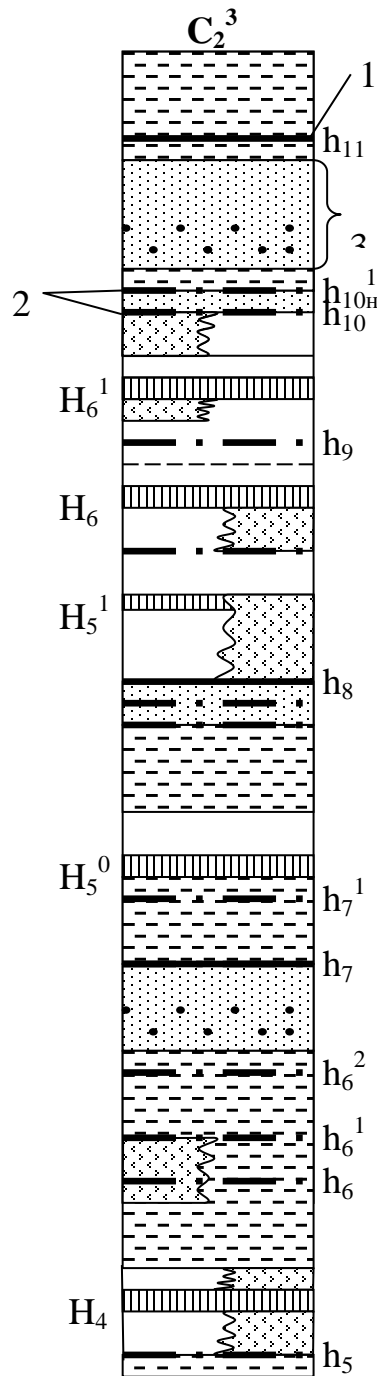


Рис. 2. Литолого-стратиграфический разрез Смоляниновской свиты: 1, 2 – соответственно рабочие и нерабочие угольные пласты; 3 – водоносный горизонт, нагреваемый при сжигании угля

На рисунке 3 приведены результаты расчета температуры блока обводненных песчаников, залегающих над сжигаемым угольным пластом при различных скоростях фильтрации подзем-

ных вод, соответствующих периодам отбора, простоя и закачки воды в условиях участка «Ольхово нижнее»:  $T_{cw} = 12\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\Delta x = \Delta y = 25\text{ м}$ ;  $\Delta z = 1\text{ м}$ ;  $\rho_n = 1900\text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda_{20} = 1,07\text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 1\text{ сут}$ ;  $n = 2,33$ ;  $\alpha = 10^{-3}\text{ м/Вт}$ ;  $C_{20} = 900\text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ ;  $V_w = 125\text{ м}^3$ ;  $C_w = 4182\text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ ;  $Vn = 500\text{ м}^3$ ;  $\rho_w = 1000\text{ кг/м}^3$ .

Величина теплового потока  $q$ , поступающего из реакционного канала в водоносный горизонт, рассчитывалась по методике [4] при мощности водоупора 5 м. Значение скоростей фильтрации подземных вод  $V$  было определено в результате решения гидродинамической задачи методом численного моделирования в программе ModFlow 2009.

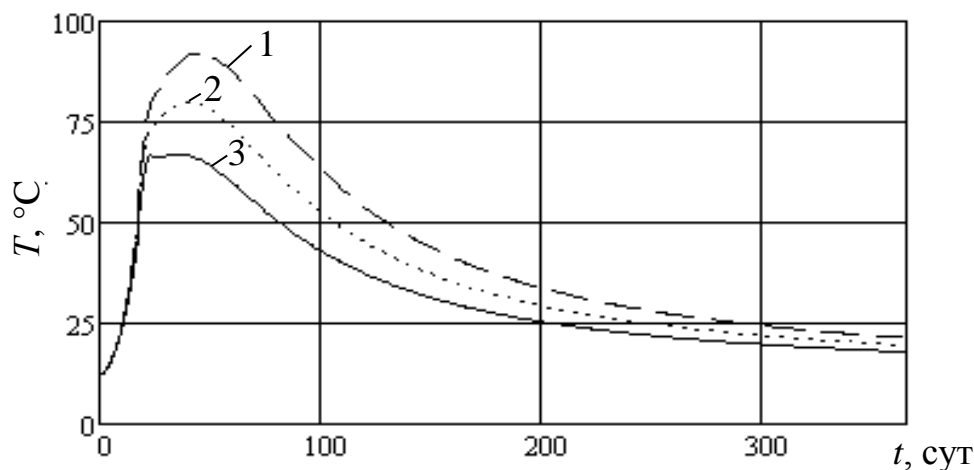


Рис. 3. Изменение температуры пород водоносного горизонта непосредственно над кровлей сжигаемого угольного пласта с углом падения  $10^\circ$ : 1 –  $V=0,92\text{ м/сут}$  (природный режим фильтрации); 2 –  $V=1,13\text{ м/сут}$  (закачка воды в пласт); 3 –  $V=1,45\text{ м/сут}$  (отбор подземных вод)

Моделирование теплопереноса было выполнено для «Бабаковской» водоносной толщи при закачке и отборе теплоносителей в течение одного года. Для решения поставленной задачи использовалась разработанная и протестированная в [5] численная модель с нестационарными источниками воды и тепла, позволяющая описывать переходные режимы.

Предложенная модель позволяет определять количество отбираемого тепла в зависимости от скорости фильтрации воды в пласте, его наклона, мощности, расположения скважины относительно реакционного канала, нестационарного характера тепловыделения и т.д. Дебит скважины, пробуренной до подошвы водоносного горизонта, принимался в соответствии с годовой динамикой потребления тепловой энергии жилищно-коммунальным сектором: 0–30 сут (сжигание угольного пласта); 30–180 сут (отбор теплоносителя в холодное время года с дебитом  $200 \text{ м}^3/\text{сут}$ ); 180–245 сут (простой); 245–335 сут (закачка воды в пласт летом с расходом  $333 \text{ м}^3/\text{сут}$ ); 335–365 сут (подготовительные работы). На рисунках 4, 5 приведены размеры и формы гидрогеотермических полей, возникающих в «бабаковских» водоносных песчаниках при сжигании угольного пласта  $h_{10}^1$  в различные периоды времени.

Анализируя полученные результаты можно отметить тесную взаимосвязь между температурой водоносного горизонта, скоростью фильтрации подземных вод и углом наклона пласта. Конфигурация изотерм не совпадает с изогипсами водоносного горизонта – они располагаются асимметрично по отношению к реакционному каналу и вытягиваются по движению потока (рис. 4, а). Ореол нагретых вод постепенно растет вверх, приближаясь к кровле водоносного горизонта, и одновременно растекается по ней. При этом по мере удаления от водоупора термические зоны в пласте снижают свою температуру и интенсивно перемещаются от теплового источника с разрывом тепловых аномалий (рис. 4, б).

Расширение во времени области теплового воздействия происходит вследствие конвективного переноса нагретых вод под влиянием природного потока, а также под воздействием молекулярной (кондуктивной) теплопроводности. При этом конвективная составляющая теплопереноса имеет преобладающее значение в горизонтальном направлении, а кондуктивная – в вертикальном.



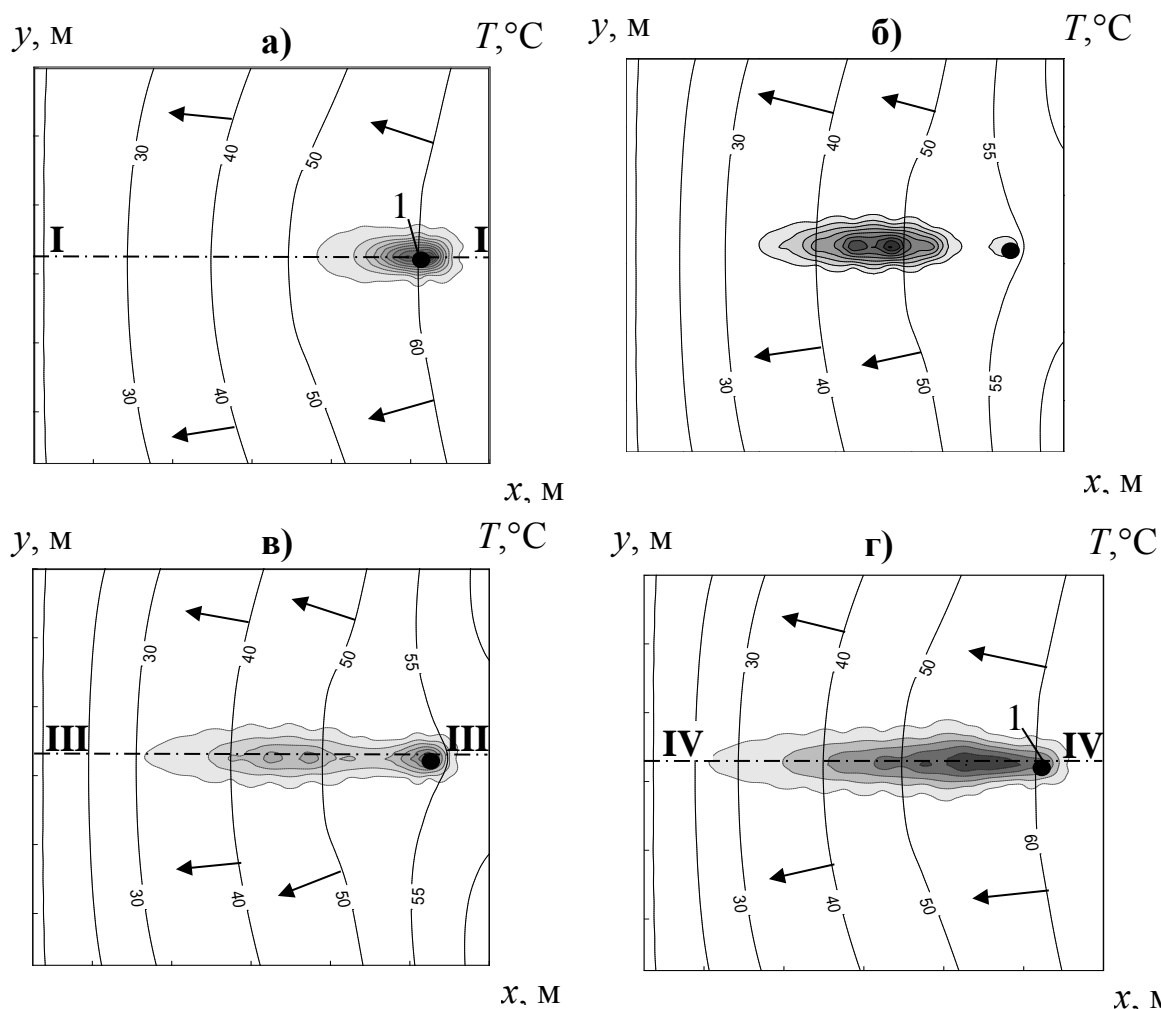


Рис. 4. Распределение уровня подземных вод (изогипсы) и их температуры (оттенки серого цвета) в водоносном горизонте, залегающем над угольным пластом при его отработке способом ПСУ: а), б) – по окончании сжигания угля ( $t = 30$  сут) соответственно на высоте 1 и 3 м от водоупора; в) при завершении отбора нагретых вод ( $t = 180$  сут); г) после последующего простоя ( $t = 245$  сут); 1 – эксплуатационная скважина над реакционным каналом. Стрелками показаны направления течения подземных вод

После ликвидации теплового источника (окончания сжигания угольного пласта, рис. 4 в, г) распространение теплового воздействия в подземных водах обусловлено растеканием сформированного ранее ореола нагретых вод и рассеиванием тепла в горном массиве.

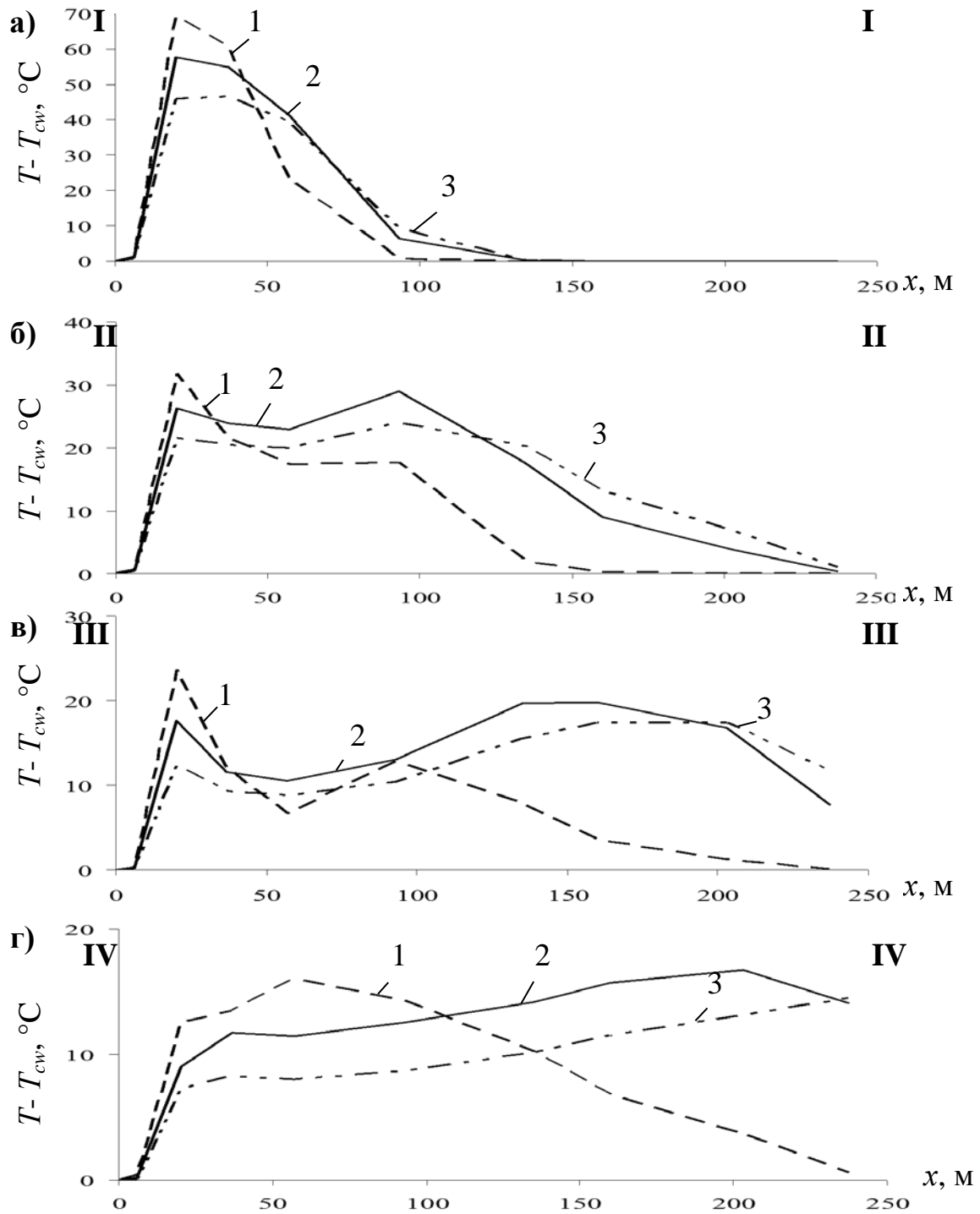


Рис. 5. Превышение температуры подземных вод в обводненных породах над кровлей угольного пласта при его сжигании по различным профилям (I – I, II – II, III – III и IV – IV) спустя  $t=30$  сут (а),  $t=100$  сут (б),  $t=180$  сут (в) и  $t=245$  сут (г), при угле падения водоносного горизонта: 1–10°; 2–20°; 3–30°

После завершения отработки угольного пласта способом ПСУ (рис. 5, а) максимум температурной аномалии ( $T - T_{cw}$ ) располагается в пределах блока водоносных пород над реакционным каналом ( $x = 20$  м). По мере увеличения угла наклона водоносной толщи он медленно перемещается по потоку подземных вод, при этом его максимальное значение уменьшается с 70 до 45 °С. Наибольшие температуры подземных вод характерны для наиболее пологого водоносного пласта. Разницы температур нагретых и естественных подземных вод по профилю I – I при  $x = 70$  м в пластах с углами падения 10 и 20° соответственно равны 20 и 40 °С, а при  $x = 100$  м разницы температур по тому же профилю в пластах с углами падения 20 и 30° равны 5 и 10 °С. Таким образом, возникающие температурные аномалии не постоянны во времени и в пространстве. Продвижение теплового фронта навстречу движению потока не происходит на всех этапах эксплуатации скважины, даже при отборе воды, что свидетельствует о преобладании конвективного теплопереноса над кондуктивным и указывает на необходимость увеличения дебита скважины, отбирающей теплоноситель.

**Выводы.** Разработана математическая модель для расчета теплопереноса в подземных водах, отражающая изменение их температуры в процессе сжигания угольного пласта и отбора теплой воды. Идентификация модели выполнена при гидрогеологических и теплофизических параметрах, соответствующих горно-геологическим условиям смоляниновской свиты Чистяково-Снежнянского угленосного района, пригодной для разработки способом ПСУ.

Расчеты теплового баланса в блоке водоносной толщи, залегающей над реакционным каналом, позволили оценить размеры и формы тепловых аномалий, формирующихся в обводненных породах кровли угольного пласта в зависимости от угла его падения и стадии отработки. Размеры аномалий в течение одного года не превышают 250 м в длину и 50 м в ширину. Превышение температуры над фоновой изменяется от 20° до 70 °С. Полученные конфигурации термальных зон отражают течение воды в обводненных песчаниках и могут использоваться для определения мест отбора нагретых вод в разные периоды времени.

Результаты исследований позволяют, обосновано подойти к определению эксплуатационных запасов нагретых вод и возможности их отбора при конкретизации геотехнологической схемы, которая предполагает закачку воды через систему нескольких скважин, с синхронизацией годового графика температур и периодов сжигания угольного пласта.

### СПИСОК ССЫЛОК

1. На рынке энергетического угля ожидается увеличение спроса и цен [Электронный ресурс] / И. Марьяненко // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». — 2011. — № 11. — Режим доступа к журн. : [http://www.esco.co.ua/journal/2011\\_11/art164.htm](http://www.esco.co.ua/journal/2011_11/art164.htm). — Название с экрана.
2. Батурина И. М. Горное дело и окружающая среда. Геодинамика недр : Учебное пособие для вузов / Батурина И. М., Петухов И. М., Батурин А. С. — М : Издательство Московского государственного горного университета, 2009. — 120 с.
3. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля : Монография / [под ред. О. В. Колоколова]. — Днепропетровск : НГА Украины, 2000. — 281 с.
4. Садовенко И. А. Численное исследование теплового поля вокруг подземного газогенератора / И. А. Садовенко, Д. В. Рудаков, А. В. Инкин // Збірник наукових праць НГУ. — 2012. — № 39. — С. 11—20.
5. Рудаков Д. В. Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии / Д. В. Рудаков, И. А. Садовенко, А. В. Инкин // Науковий вісник НГУ. — 2012. — № 1. — С. 40—45.
6. Гончаров С. А. Термодинамика: Учебник / Гончаров С. А. — М : Издательство Московского государственного горного университета, 2002. — 440 с.
7. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 1. Угольные бассейны и месторождения юга Европейской части СССР / [Лагутина В. В., Левенштейн М. Л., Попов В. С. и др.]; под ред. И. А. Кузнецова. — М. : Госгеолтехиздат, 1963. — 210 с.