

УДК [622.278:662.66].001.57

**Садовенко И.А.**, д-р техн. наук, профессор  
**Инкин А.В.**, канд. техн. наук, доцент  
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОТЕРМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ПОДЗЕМНОМ СЖИГАНИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

**Садовенко І.О.**, д-р техн. наук, професор  
**Інкін О.В.**, канд. техн. наук, доцент  
(Державний ВНЗ «НГУ»)

## **МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОГЕОТЕРМІЧНИХ ПОЛІВ ПРИ ПІДЗЕМНОМУ СПАЛЮВАННІ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ**

**Sadovenko I.A.**, D. Sc. (Tech.), Professor  
**Inkin A.V.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor  
(State HEI «NMU»)

## **MODELING OF HYDROGEOTERMAL FIELDS AT UNDERGROUND COMBUSTION OF THE COAL SEAMS**

**Аннотация.** Статья направлена на разработку математической модели переноса тепла в подземных водах, насыщающих покрывающие породы угольного пласта при его подземном сжигании. Кроме того, в задачу исследований входило установление динамики формирования гидротермических полей в водоносном горизонте, залегающем над реакционным каналом.

Разработанная математической модель основана на установление теплового баланса в объеме водоносной толщи, расположенном непосредственно над нагреваемым водоупором. Вычислительная реализация модели была выполнена с помощью программы ModFlow 2009 (Schlumberger W.S.). Для горно-геологических условий участка «Ольхово нижнее» Донецкого бассейна получены параметры изменения размеров и формы тепловых аномалий, формирующихся в водопроницаемых породах над кровлей угольного пласта в зависимости от угла его падения и стадии сжигания.

Результаты исследований позволяют оценить конфигурации термальных зон, отражающие течение воды в обводненных породах кровли угольного пласта и могут использоваться для установления оптимальных периодов отбора нагретых вод из водоносного горизонта. Полученные результаты также могут быть применены для определения эксплуатационных запасов термальных вод и параметров геотехнологии их отбора.

**Ключевые слова:** подземное сжигание угля, водоносный горизонт, теплоперенос, моделирование.

**ВВЕДЕНИЕ.** По оценкам ведущих нефтегазовых компаний, начало XXI века ознаменовалось значительным увеличением доли угля в топливно-энергетическом балансе ряда стран мира [1, 2]. 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 [3, 4].

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 [5, 6].

Для повышения КПД данной технологии в работе [7] 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.

**МЕТОДИКА.** Двумерная в плане миграция тепла в подземных водах описывается уравнениями приведенными в работе [8]. 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).

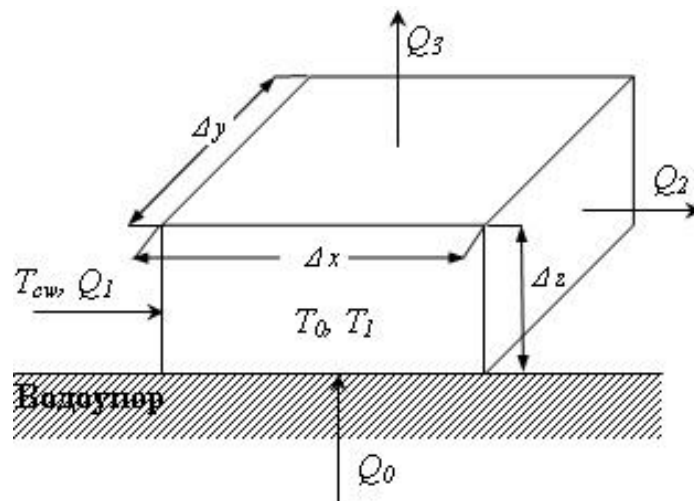


Рисунок 1 – Схема баланса тепла в блоке водоносного пласта над кровлей реакционного канала при сжигании угля

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 тепловой 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.

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.** 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

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

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

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

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

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

где  $T_{cw}$  – 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 [9]

$$C_n = C_{20} + 0.1n(T - 20) \quad (9)$$

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

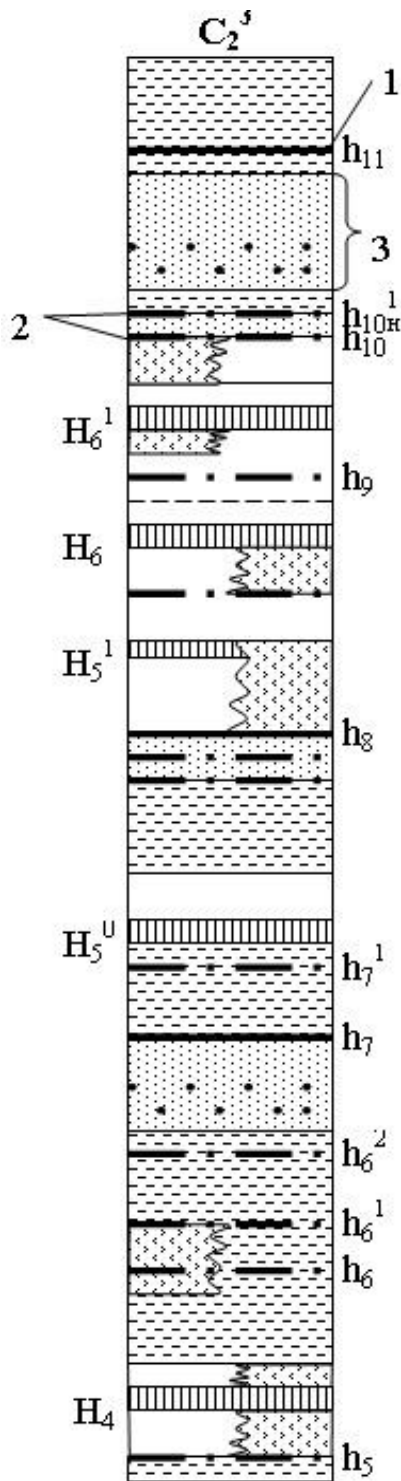
где  $C_{20}$ ,  $\lambda_{20}$  – соответственно теплоемкость и теплопроводность водоносных пород в нормальных условиях (при  $T = 20^\circ\text{C}$ );  $n$ ,  $\alpha$  – постоянная (зависящая от типа пород) и поправочный коэффициент соответственно.

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

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

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.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** 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 ( $h_9$ ,  $h_{10}^n$ ,  $h_{10}^l$ ) с углами падения от  $10$  до  $30^\circ$  [10].



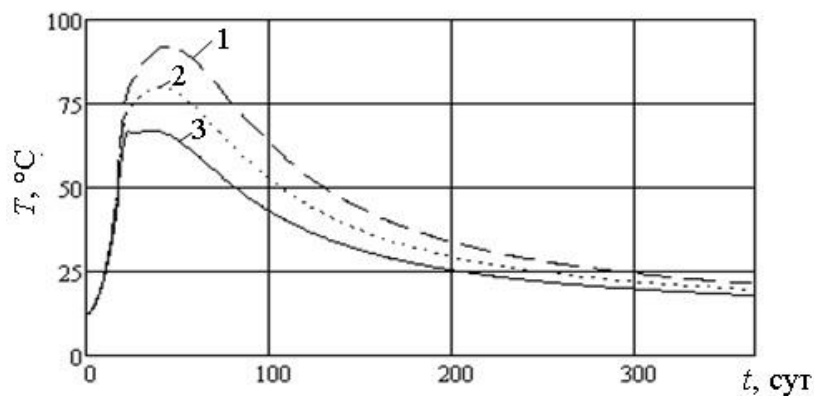
1, 2 – соответственно рабочие и нерабочие угольные пласты;  
3 – водоносный горизонт, нагреваемый при сжигании угля

Рисунок 2 – Литолого-стратиграфический разрез Смоляниновской свиты

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, обрабатываемым способом ПСУ [5] 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  $h_{10}Sh_{11}$ .

На рис. 3 приведены результаты расчета температуры блока обводненных песчаников, залегающих над сжигаемым угольным пластом при различных скоростях фильтрации подземных вод, соответствующих периодам отбора, простоя и закачки воды в условиях участка «Ольхово нижнее»:  $T_{cw} = 12^\circ\text{C}$ ;  $\Delta x = \Delta y = 25$  м;  $\Delta z = 1$  м;  $\tau = 1$  сут;  $\lambda_{20} = 1,07$  Вт/м $\cdot$ °C;  $\rho_n = 1900$  кг/м $^3$ ;  $n = 2,33$ ;  $\alpha = 10^{-3}$  м/Вт;  $C_{20} = 900$  Дж/кг $\cdot$ °C;  $V_n = 500$  м $^3$ ;  $V_w = 125$  м $^3$ ;  $C_w = 4182$  Дж/кг $\cdot$ °C;  $\rho_w = 1000$  кг/м $^3$

Величина теплового потока  $q$ , поступающего из реакционного канала в водоносный горизонт, рассчитывалась по методике [7] 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. 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 [8] численная модель с нестационарными источниками воды и тепла, позволяющая описывать переходные режимы.



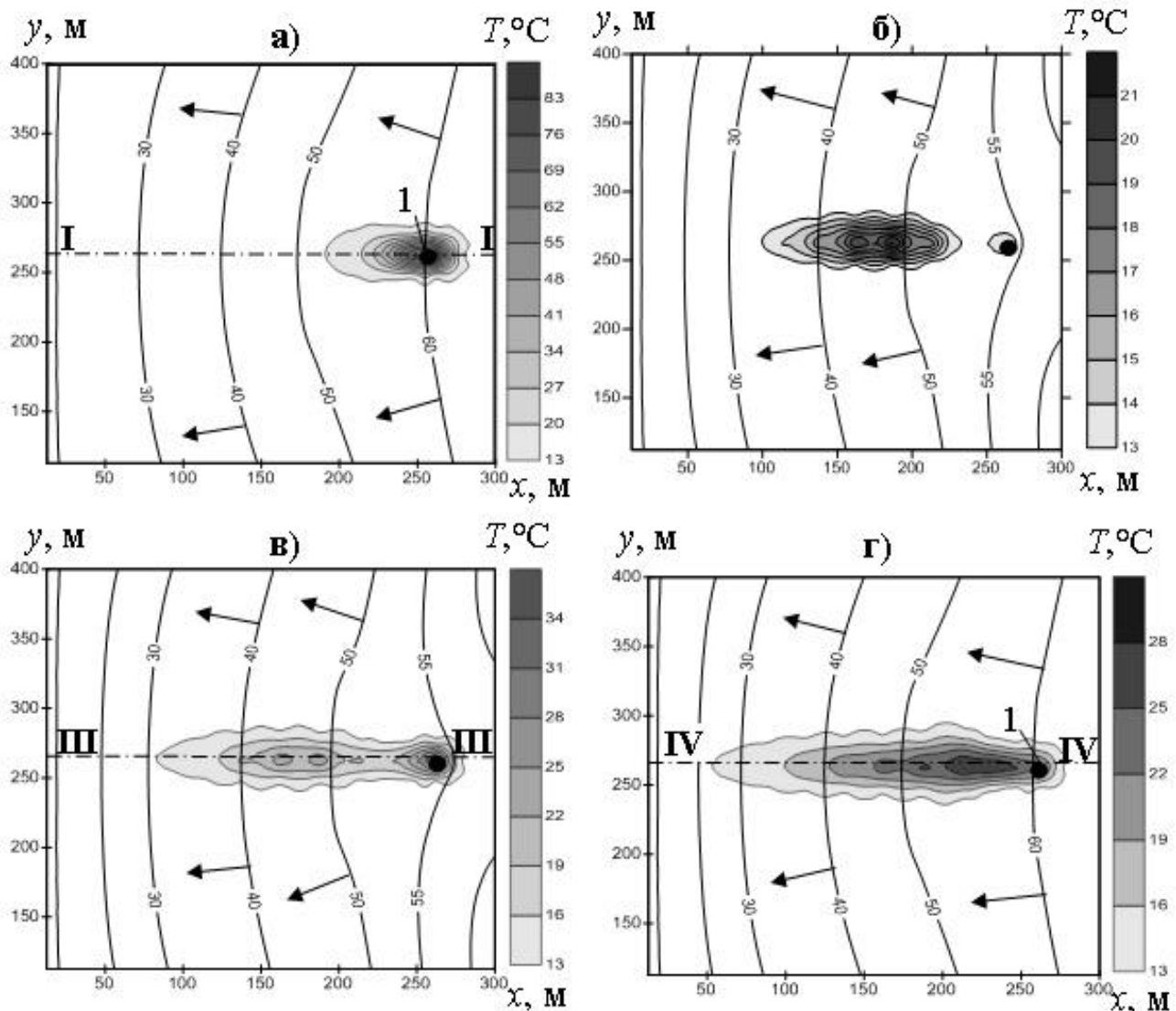
1 –  $V=0,92$  м/сут (природний режим фільтрації); 2 –  $V=1,13$  м/сут (закачка води в пласт);  
3 –  $V=1,45$  м/сут (отбор підземних вод)

Рисунок 3 – Изменение температуры пород водоносного горизонта непосредственно над кровлей сжигаемого угольного пласта с углом падения  $10^\circ$

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 рис. 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 а – они располагаются взаимосвязь между температурой водоносного горизонта, скоростью фильтрации подземных вод и углом наклона пласта. Конфигурация изотерм не совпадает с изогипсами водоносного горизонта вать 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 рис. 4, 5 приведены размеры и формы гидрогеотермических полей, возникающих в «бабаковских» водоносных песчаниках при сжигании угольного пласта  $h_{10}^1$  в различные периоды времени.



Стрелками показаны направления течения подземных вод

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

Рисунок 4 – Распределение уровня подземных вод (изогипсы) и их температуры (оттенки серого цвета) в водоносном горизонте, залегающем над угольным пластом при его отработке способом ПСУ

Анализируя полученные результаты можно отметить тесную 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. 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.

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).

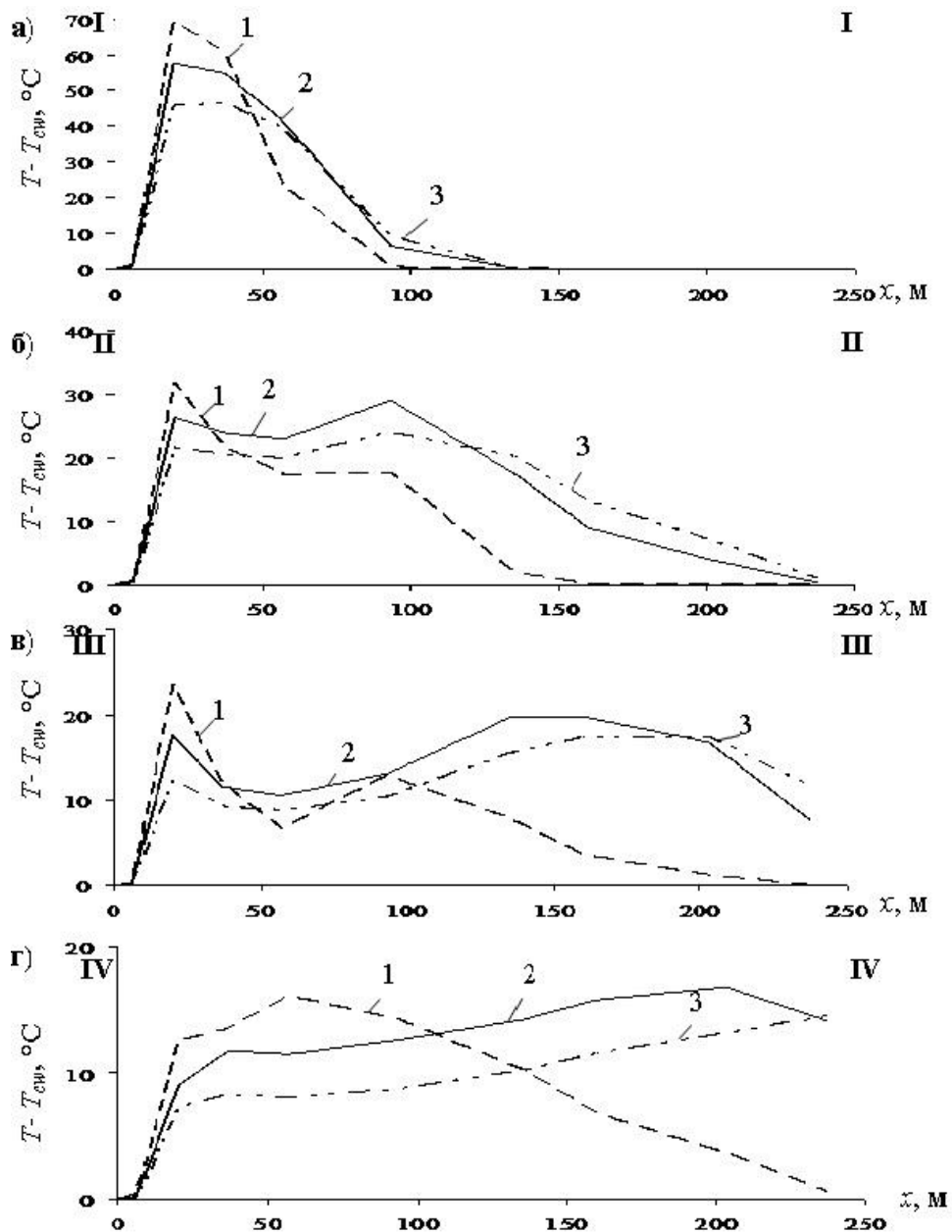


Рисунок 5 – Превышение температуры подземных вод в обводненных породах над кровлей угольного пласта при его сжигании по различным профилям (I – I, II – II, III – III и IV – IV) спустя  $t = 30$  сут (а),  $t = 100$  сут (б),  $t = 180$  сут (в) и  $t = 245$  сут (г), при угле падения водоносного горизонта: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



По мере увеличения угла наклона водоносной толщи он медленно перемещается по потоку подземных вод, при этом его максимальное значение уменьшается с 70 до 45°C. 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°C, а при  $x = 100$  м разницы температур по тому же профилю в пластах с углами падения 20 и 30° равны 5 и 10°C. 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 горногеологическим 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<sup>0</sup> до 70<sup>0</sup>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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марьяненко, И. На рынке энергетического угля ожидается увеличение спроса и цен / И. Марьяненко // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2011. – №11. – [Электронный ресурс] – Режим доступа к журн.: [http://www.esco.co.ua/journal/2011\\_11/art164.htm](http://www.esco.co.ua/journal/2011_11/art164.htm). – Загл. с экрана.
2. Круть, А.А. Водоугольное топливо – альтернатива природному газу и жидким нефтепродуктам / А.А. Круть // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – 2009. – Вып. 83. – С. 269-274.
3. Батурина, И.М. Горное дело и окружающая среда. Геодинамика недр / И.М. Батурина, И.М. Петухов, А.С. Батурина. – М.: МГТУ, 2009. –120 с.
4. Шевченко, Г.А. Разработка технологических решений по подготовке отходов горного производства к утилизации / Г.А. Шевченко, В.Г. Шевченко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – 2004. – Вып. 51. – С. 226-239.
5. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля

/ Под. ред. О.В. Колоколова. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 281 с.

6. Стратов, В.Г. Комплексное освоение угольных месторождений, содержащих пласты крутого падения с их дегазацией и газификацией участков не пригодных к шахтной отработке / В.Г. Стратов, И.А. Стежко, Е.В. Гончаров // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – 2012. – Вып. 101. – С.85-96.

7. 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.

8. 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.

9. Гончаров, С.А. Термодинамика / С.А. Гончаров – М: МГГУ, 2002. – 440 с.

10. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 1. Угольные бассейны и месторождения юга Европейской части СССР / В.В.Лагутина, М.Л. Левенштейн, В.С. Попов [и др.]; под ред. И.А. Кузнецова. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 1210 с.

#### REFERENCES

1. Maryanenko, I. (2011), “At the market of power coal the increase of demand and prices is expected”, Electronic magazine energyservice company “The Ecological systems”, available at: [http://www.esco.co.ua/journal/2011\\_11/art164.htm](http://www.esco.co.ua/journal/2011_11/art164.htm), (Accessed 17 January 2014).

2. Krut, A.A. (2009), “Watercoal fuel is an alternative to natural gas and hydrocarbon oils”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 83, pp. 269-274.

3. Baturina, I.M., Petuhov, I.M. and Baturin, A.S. (2009), *Gornoe delo i okruzhayushchaya sreda. Geodinamika nedr* [Mining business and environment. Geodynamics of bowels of the earth], MGGU, Moscow, Russia.

4. Shevchenko, G.A. and Shevchenko, V.G. (2004), “Development of technological decisions on preparation of wastes of mountain production to utilization”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 51, pp. 226-239.

5. Kolokolov, O.V. (ed.) (2000), *Teoriya i praktika termohimicheskoy tehnologii dobychi i pererabotki uglya* [Theory and practice of thermo-chemical technology of booty and processing of coal], Natsionalnaya gornaya akademiya Ukrainyi, Dnepropetrovsk, Ukraine.

6. Stratov, V.G., Stezhko, I.A. and Goncharov, E.V. (2012), “Complex mastering of coal deposits, containing the layers of the steep falling with their degassing and gasification of areas not suitable to the mine working off”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 101, pp. 85-96.

7. Sadovenko, I.A., Rudakov, D.V. and Inkin, A.V. (2012), “Numeral research of the thermal field round an underground gazogene”, *ZbIrnik naukovih prats Natsionalnoho hirnychoho universyteta*, no.39, pp. 11-20.

8. Rudakov, D.V., Sadovenko, I.A. and Inkin, A.V. (2012), “Design heattransfer in aquiferous horizon at an accumulation and extraction of thermal energy”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.1, pp. 40-45.

9. Goncharov, S.A. (2002), *Termodinamika* [Thermodynamics], MGGU, Moscow, Russia.

10. Lagutina, V.V., Levenshteyn, M.L. and Popov, V.S. (1963), *Geologiya mestorozhdeniy uglya i goryuchih slantsev SSSR. Vol. 1. Ugolnyie basseyniy i mestorozhdeniya yuga Evropeyskoy chasti SSSR* [Geology of deposits of coal and pyroshales of the USSR. Vol. 1. Coal pools and deposits of south of European part of the USSR], in Kuznetsov, I.A. (ed.), Gosgeoltehzdat, Moscow, SU.

#### Об авторах

**Садовенко Иван Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (Государственное ВУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина

**Инкин Александр Викторович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (Государственное ВУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, [inkin@ua.fm](mailto:inkin@ua.fm)

#### About the authors

**Sadovenko Ivan Aleksandrovich**, D. Sc. (Tech.), Professor, Professor of the Department of geohydrology and engineering geology, State Higher Education Institution «National Mining University» (State Higher Education Institution «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine

**Inkin Aleksandr Viktorovich**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor Departments of geohydrology and engineering geology, State Higher Education Institution «National Mining University»

(«NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, inkin@ua.fm

**Анотація.** Стаття спрямована на розробку математичної моделі перенесення тепла в підземних водах, які насичують покриваючі породи вугільного пласта при його підземному спалюванні. Крім того, в завдання досліджень входило встановлення динаміки формування гідротермічних полів у водоносному горизонті, що залягає над реакційним каналом.

Розроблена математична модель ґрунтується на встановленні теплового балансу у об'ємі водоносної товщі, розташованому безпосередньо над водоупором, якій нагрівається. Обчислювальна реалізація моделі була виконана за допомогою програми ModFlow 2009 (Schlumberger W.S.). Для гірничо-геологічних умов ділянки «Ольхове нижнє» Донецького басейну отримано параметри зміни розмірів і форми теплових аномалій, що формуються у водопроникних породах над покрівлею вугільного пласта залежно від кута його падіння і стадії спалювання.

Результати досліджень дозволяють оцінити конфігурації термальних зон, які відбивають течію підземних вод в породах покрівлі вугільного пласта, і можуть використовуватися для встановлення оптимальних періодів відбору нагрітих вод з водоносного горизонту. Отримані результати також можуть бути застосовані для визначення експлуатаційних запасів термальних вод і параметрів геотехнології їх відбору.

**Ключові слова:** підземне спалювання вугілля, водоносний горизонт, теплоперенесення, моделювання.

**Abstract.** The article presents a mathematical model of heat transporting in the groundwaters which saturate cap rocks of the coal seam when the latter burns. The study task was to explain dynamics of hydrothermal fields formation in the aquifer overlying the reaction channel.

The designed mathematical model is based on the established heat balance in the volume of the aquifer located proximately above the heated confining layer. The model was computed by the ModFlow 2009 software (Schlumberger W.S.). Changing sizes and shapes of the thermal anomalies formed in permeable rocks above the coal seam roof depending on the angle of incidence and combustion stage were evaluated for the mining and geological conditions of the «Olkhovo Nizhne» field in the Donetsk Basin.

The study results allow assessing configurations of thermal zones, which reflect water flow in the flooded rocks over the coal seam roof. The results can be used to determine optimal periods for the heated water withdrawal from the aquifer and to evaluate operational reserves of thermal waters and geotechnological parameters for withdrawing of such waters.

**Keywords:** underground coal firing, aquifer, heat transport, modeling.

*Стаття постуила в редакцію 18.12.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук К.К. Софийским*