

## ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.278

### СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

**И. А. Садовенко, А. В. Инкин**

*Национальный горный университет, E-mail: inkin@ua.fm,  
просп. Дмитрия Яворницкого, 19, 49600, г. Днепр, Украина*

Разработана и протестирована математическая модель фильтрации и теплопереноса в породах кровли подземного газогенератора при газификации угольного пласта. Для горно-геологических условий участка Ольхово Нижнее (промышленный район Донбасса) в программной среде Mathcad установлены конвективная и кондуктивная составляющие теплового потока, проникающего из реакционного канала в вышележащий водоносный горизонт. Даны оценки изменения теплового потока из реакционного канала и температуры подземных вод в зависимости от мощности водоупорного слоя и дебита водозаборной скважины. Установлено, что после завершения газификации угольного пласта в водоносных песчаниках аккумулируется более 60 % тепла, поступающего во вмещающие породы из газогенератора. Показано, что отбор и использование вод, нагретых в ходе подземной газификации угля, позволит повысить КПД этого процесса в зависимости от размеров разделяющего пласта на 18–25 %.

*Подземная газификация угля, тепловой поток, водоносный горизонт, нагретые воды*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180318

Характерной особенностью топливно-энергетического комплекса Украины является ограниченность распространения углеводородных месторождений и неполнота извлечения разведанных угольных ресурсов. Подтвержденные запасы угля в стране оцениваются в 53.6 млрд т [1], из которых более двух третей сосредоточены в некондиционных и маломощных пластах, не пригодных для разработки традиционными способами. В земных недрах остается около 70 % углей различных марок, в связи с чем становится актуальным вопрос о возможности их разработки с помощью подземной газификации. Однако, несмотря на вековой научно-промышленный опыт развития [2–4] и ряд существенных преимуществ (экологическая чистота производимой энергии, незначительная степень воздействия на природный ландшафт и отсутствие опасного труда горнорабочих под землей), эта технология не получила широкого распространения ввиду низкого химического коэффициента полезного действия. Данный показатель определяется как отношение химического тепла продуктов газификации к химическому теплу газифицированного угля [5], не превышает на практике 65 % и требует разработки способа его увеличения.

Цель настоящей работы — установление динамики формирования теплового поля вокруг подземного газогенератора и возможность его использования для повышения эффективности процесса подземной газификации угля (ПГУ). Достижение этой цели требует решения следу-

ющих задач: сформулировать математическую модель теплопереноса в породах кровли сжигаемого угольного пласта; провести вычислительную реализацию модели; оценить влияние мощности водоупорного слоя на количество тепловой энергии, накапливающейся в водоносном горизонте, и отбора нагретых вод на КПД процесса ПГУ.

### ФОРМУЛИРОВКА МОДЕЛИ

Рассмотрим процесс подземной газификации угля на примере системы, состоящей из трех пластов (рис. 1), имеющих непосредственный тепловой контакт друг с другом. При сжигании нижнего угольного пласта часть тепла расходуется для перехода в горючие компоненты вырабатываемого газа (химическое тепло), другая часть идет на нагрев продуктов газификации и поступает во вмещающие породы (физическое тепло). Так как нагретые продукты горения значительно легче дутьевых компонентов, подающихся в реакционный канал, то при сжигании они будут занимать верхнюю часть выгазованного пространства, создавая там наиболее высокую температуру. Таким образом, породная кровля угольного пласта подвергается наибольшему термическому воздействию. Этот слой прогревается над реакционным каналом при сжигании угля и остывает после прекращения дутья. Вышележащий водоносный горизонт нагревается под воздействием теплового потока поступающего из разделяющего слоя.

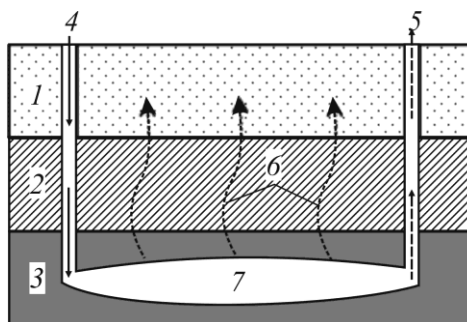


Рис. 1. Схема процесса нагрева подземных вод при подземной газификации угля: 1–3 — соответственно водоносный, разделяющий и угольный пласт; 4–6 — направление движения дутья, вырабатываемого газа и теплового потока; 7 — реакционный канал

В геотехнологическом аспекте важно определить долю тепловой энергии, поступающей через породы кровли реакционного канала в водоносный пласт, которую можно отбирать путем откачки нагретой воды. При этом интенсивность прогрева подземных вод и мощность теплового потока напрямую зависят от объема сжигаемого угля и от дутья, поданного в подземный газогенератор. Необходимое количество воздуха ( $m^3$ ) для сжигания 1 кг угля определяется по эмпирическому соотношению [6]:

$$q_v = \frac{\alpha(0.001Q_y + 25.1W_y)}{418}, \quad (1)$$

где  $\alpha = 1.08 - 1.11$  — опытный коэффициент;  $Q_y$  — низшая теплота сгорания, МДж/кг;  $W_y$  — влажность угля, %; 418 — эмпирический коэффициент.

Производительность подземного газогенератора характеризуется количеством отработанного угля за определенный промежуток времени и может быть записана в следующем виде [6]:

$$P = \frac{D_v}{q_v}, \quad (2)$$

здесь  $P$  — производительность газогенератора, кг/сут;  $D_v$  — расход воздуха,  $m^3$ /сут;  $q_v$  — количество воздуха для сжигания 1 кг угля,  $m^3$ /кг.

Выход газа с 1 кг угля составит:

$$q_g = \frac{1}{q_y}, \quad q_y = 12 \sum \frac{C_{yg}}{22.4} C'_{yg}, \quad (3)$$

где  $q_y$  — расход угля на получение 1 м<sup>3</sup> газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\sum C_{yg} = aCO_2 + bCO + cCH_4$  — сумма углеродсодержащих компонентов в газе в объемных процентах;  $a, b, c$  — соответственно процент содержания в газе CO<sub>2</sub>, CO и CH<sub>4</sub>;  $C'_{yg}$  — содержание углерода в топливе, %.

Принудительное нагнетание в газогенератор дутья дополнительно создает вертикальный градиент давления, являющийся основной причиной конвекции в покрывающих породах. При этом суммарный тепловой поток, идущий от реакционного канала на нагрев разделяющего пласта, будет равен

$$q(t) = q_{cv}(t) + q_{cd}(t), \quad (4)$$

где  $q_{cv}(t)$  и  $q_{cd}(t)$  — его конвективная и кондуктивная составляющие, Вт. Считаем, что теплофизические свойства горных пород не зависят от водообмена в вышележащем водоносном пласте.

Площади конвективного и кондуктивного теплообмена  $S_{cv}$  и  $S_{cd}$  изменяются с течением времени по мере развития реакционного канала и сжигания угля. Согласно данным вскрытия подземных газогенераторов на Шахтинской и Лисичанской станциях “Подземгаз”, теплофизические и геометрические параметры канала не постоянны, а связь между пустотами в нем носит местный и ограниченный характер [7, 8]. Это связано с тем, что первоначально созданный канал с сечением  $S_0$  в процессе газификации постоянно расширяется  $S_1$ , приближаясь к кровле и подошве угольного пласта ( $S_2$ , рис. 2). В результате в выгазованное пространство попадают не только угольные, но породные стенки. Далее сечение канала продолжает увеличиваться и, достигнув предельных значений  $S_3$ , уменьшается вследствие обрушения породной кровли. Затем картина изменения сечения канала повторяется вновь.

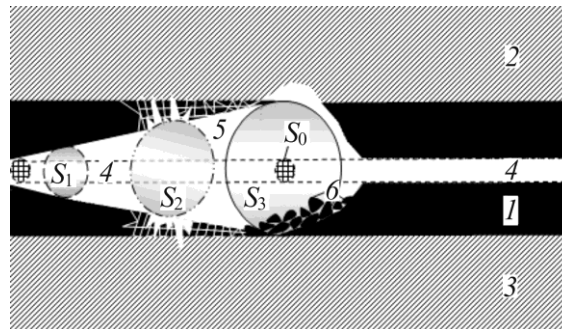


Рис. 2. Схема формирования выгазованного пространства: 1–3 — угольный пласт, его кровля и подошва соответственно; 4 — первоначальный (сбоечный) канал; 5 — выгазованное пространство; 6 — обрушенные породы;  $S_0, S_1, S_2, S_3$  — начальное и последующие сечения канала

Учитывая, что, как правило, подземной газификации подвергаются угольные пласты мощностью менее 1 м, реакционный канал относительно быстро достигнет его кровли и подошвы. Дальнейшее развитие выгазованного пространства будет происходить по всей мощности пласта в ширину. Его площадь может быть осреднена по времени с учетом удельной эффективности работы канала газификации:  $\bar{\mathcal{E}} = F/l$ , где  $F$  — площадь угольного пласта (м<sup>2</sup>), сожженного при отработке единицы его длины  $l$  (м) вдоль линии огневого забоя [5].

Теплообмен между поступающим из реакционного канала газом и залегающим выше разделяющего пласта водоносным горизонтом [9], определяется по формуле

$$q_{cv} = Q_g c_g \rho_g (T_g - T_w), \quad Q_g = \frac{\kappa}{\mu_g} \frac{P_g^2 - P_{atm}^2}{2P_{atm} L_g} S_{cv}, \quad (5)$$

где  $Q_g$  — объемный поток газа по трещинам и порам в породной кровле, м<sup>3</sup>/с;  $c_g$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);  $\rho_g$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_g$  — динамическая вязкость, Па·с;  $T_g$  — температура газа в реакционном канале, °С;  $T_w$  — температура воды в водоносном горизонте, °С;  $\kappa$  — проницаемость пород, м<sup>2</sup>;  $S_{cv}$  — площадь конвективного теплообмена, м<sup>2</sup>;  $P_g$  — давление газа в реакционном канале, Па;  $P_{atm}$  — атмосферное давление, Па;  $L_g$  — длина пути фильтрации газа до уровня, где поддерживается атмосферное давление, м.

Принято, что давление газа одинаково в объеме полости. При высокой скорости фильтрации газа, достигающей нескольких миллиметров в секунду, конвективный тепловой поток в течение суток поступает в водоносный горизонт. При этом нагревается небольшой объем вокруг трещин, а основная масса пород кровли реакционного канала прогревается вследствие кондуктивного переноса тепла.

Пусть  $\chi = q_{cv}/q$  — доля конвективного потока в общем потоке тепла через разделяющий пласт. Оставшаяся часть тепла  $(1-\chi)q$  поступает в вышележащие породы кондуктивным путем. Оценки показывают, что  $\chi$  не превышает нескольких процентов даже при значительном увеличении проницаемости пород кровли.

Кондуктивный поток тепла поступает в покрывающие породы на разных участках по мере продвижения огневого забоя. В соответствии с принятой дискретизацией времени на всех участках подошвы пласта над подземным газогенератором в численных расчетах задается тепловой поток, соответствующий среднесуточному значению  $q_{cd}$ , причем для всех моментов времени  $q_{cd} = (1-\chi)q$ .

Кондуктивный тепловой поток пространственно распределяется по подошве разделяющего пласта. Для каждого  $j$ -го участка, где происходило поступление тепла с момента  $t_i$ ,  $q_{cd}$ , можно задать ограничения:

$$q_{cdj} = \begin{cases} q_j, & t_i < t < t_{i+1}, \\ 0, & t < t_i, \quad t > t_{i+1}. \end{cases} \quad (6)$$

где  $q_j$  — кондуктивный поток тепла снизу (Вт/м<sup>2</sup>) с каждого  $j$ -го участка подошвы разделяющего пласта за время  $t$  (сут).

Для ориентировочных расчетов температура в слое пород над каждым участком суточного поступления тепла может вычисляться по формулам:

$$T_j(z, t) = T_0 + q_j (T(z, t) - T(z, t - t_s)), \quad (7)$$

$$T(z, t) = \frac{2}{\lambda_p} \sqrt{a_p t} \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{a_p t}}, \quad (8)$$

где  $t_s = t - 1$ ;  $T_0$  — начальная температура пород, °С;  $z$  — вертикальная координата, отсчитываемая от подошвы разделяющего пласта вверх, м;  $t$  — время, с;  $\lambda_p$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $a_p$  — коэффициент температуропроводности пород, м<sup>2</sup>/с;  $\operatorname{ierfc}(x) = e^{-x^2} / \sqrt{\pi} - x \operatorname{erfc}(x)$  — специальная функция;  $\operatorname{erfc}$  — дополнительная функция ошибки.

Формула (8) представляет собой аналитическое решение уравнения теплопроводности в однородной полуограниченной области, на границе которой задан постоянный единичный тепловой поток. При этом тепловая инерция пород учитывается коэффициентом теплопроводности.

Тепловой поток в кровле разделяющего пласта можно рассчитать следующим образом:

$$q_{cd,w}(t) = S_{cd} \lambda_p \left. \frac{\partial T(t)}{\partial z} \right|_{z=m_p}, \quad (9)$$

где  $S_{cd}$  — площадь кондуктивного теплообмена,  $m^2$ ;  $m_p$  — мощность породной кровли над реакционным каналом,  $m$ ;  $z$  — вертикальная координата,  $m$ .

Суммирование выражений (9) по всем участкам пространственной дискретизации определяет общий кондуктивный поток, поступающий в пласт.

Расчет теплового потока с использованием решения (8) несколько занижает реальное поступление тепла в проницаемый пласт. Фактически отбор тепла фильтрационным потоком снижает температуру на подошве пласта и увеличит отток тепла из разделяющего пласта. Однако этот эффект будет незначительным ввиду небольшой разницы температур нагретой воды и ее естественной температуры в пласте.

Отбор тепла, поступающего в водоносный горизонт, возможен через откачивающую скважину, расположенную вблизи реакционного канала. Предположим, что весь поток мгновенно затрачивается на нагрев поступающей в скважину воды, и она сразу же удаляется из пласта. Тогда температура воды в скважине может быть вычислена так:

$$T_{sk}(t) = T_w + \frac{q_{cd}(t) + q_{cv}(t)}{c_w \rho_w Q_{sk}(t)}, \quad (10)$$

где  $T_w$  — естественная температура подземных вод,  $^{\circ}C$ ;  $q_{cd}(t)$ ,  $q_{cv}(t)$  — кондуктивный и конвективный тепловые потоки,  $Вт$ ;  $c_w$  — теплоемкость воды,  $Дж/(кг \cdot ^{\circ}C)$ ;  $\rho_w$  — плотность воды,  $кг/м^3$ ;  $Q_{sk}$  — дебит скважины,  $м^3/с$ .

Более точная оценка  $T_{sk}$  может быть дана на основе численного моделирования теплопереноса в проницаемом пласте с учетом вертикального расположения скважины и динамики поступления тепла.

Необходимо отметить, что предложенная математическая модель теплопереноса в породах кровли сжигаемого угольного пласта обладает следующими допущениями: не учитывается радиационный теплообмен от газов к вмещающим породам; температура газов по длине канала газификации принимается равной ее максимальному значению на участке экзотермических и эндотермических реакций; не учитывается теплоперенос конвекцией от газов к породной кровле подземного газогенератора.

#### ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Сопоставительные расчеты по формулам (1)–(10) выполнены в программной среде Mathcad для горно-геологических условий угольного участка Ольхово Нижнее, расположенного в пределах Чистяково-Снежнянского промышленного района Донбасса, с общими запасами более 3 млрд т угля, из которых около 400 млн т сосредоточено в пластах некондиционной мощности, пригодных для газификации. Выделенный район находится в восточной части Донецкой области и имеет размеры  $55 \times 15$  км. Рельеф местности в значи-

тельной степени расчленен густой сетью балок с водораздельными поднятиями между ними. Его максимальные отметки отмечаются в восточной части (+ 325 м), минимальные — в западной (долина р. Ольховая + 125 м). Наибольшая водоносность пород, обусловленная их трещиноватостью, приурочена к зонам тектонических нарушений и выветривания. Воды карбонатноугольных отложений увеличивают свою минерализацию с востока 1.5–2.0 на запад 3.0–3.6 г/дм<sup>3</sup> в связи с увеличением мощности в этом направлении покровных отложений. Значение коэффициента фильтрации пород составляет 3.4–9.6 м/сут. На глубинах 100–300 м почти по всей площади района прослеживается 200-метровая зона хлоридно-натриевых щелочных вод, непригодных для водоснабжения. На территории района размещены города Снежное, Торез, Шахтерск, Зугрэс, являющиеся крупными потребителями тепловой энергии.

Согласно геологическим изысканиям [9], для проведения промышленного эксперимента по ПГУ, ввиду меньшей тектонической нарушенности, наиболее подходит расположенная в восточной части участка Ольхово Нижнее свита  $C_2^3$  “смоляниновская” мощностью 740–900 м (рис. 3). В ее разрезе преобладают алевролиты (48 %), аргиллиты (18 %) и мощные (50–60 м) толщи песчаников (“головиновские”, залегающие ниже угольного пласта  $h_1$ , “подремовские” —  $h_2^1Sh_3$ , “усовские” —  $h_4Sh_5$  и “бабаковские” —  $h_{10}Sh_{11}$ ). Известняки в свите ( $H_5^0, H_5^1$  и  $H_6^1$ ) маломощные, заключены в толщах плотных аргиллитов и не всегда прослеживаются в геологическом разрезе. К их главным горизонтам относятся  $H_3$  (микрозернистый детритусовый) и  $H_4$  (мелкозернистый водорослевый). Свита  $C_2^3$  содержит 20 угольных пластов, 11 из которых рабочие. При этом между рабочими пластами  $h_8$  и  $h_{11}$  развито несколько некондиционных угольных пластов и пропластков ( $h_9, h_{10}^H$  и  $h_{10}^1$ ). Так, в соответствии с литологическим строением на 30 м выше и на 60 м ниже рабочего пласта  $h_{11}$  залегают некондиционные пласты  $h_{11}^1$  и  $h_{10}^1$ . В пределах стратиграфического разреза приведенные расстояния заполнены водообильными “бабаковскими” песчаниками, неиспользуемыми для водоснабжения из-за повышенной минерализации.

Таким образом, на территории исследуемого участка оптимальным будет газификация угольного пласта  $h_{10}^1$  с использованием в качестве теплоносителей подземных вод песчаников  $h_{10}Sh_{11}$ . При этом теплофизические свойства горных пород и геотехнологические параметры ПГУ будут равны:  $\alpha = 1.1$ ;  $Q_y = 15$  МДж/кг;  $W_y = 35$  %;  $\rho_g = 1.1$  кг/м<sup>3</sup>;  $T_g = 1000$ °С (температура на участке экзотермических и эндотермических реакций в канале газификации);  $t = 20$  сут;  $k = 10^{-15}$  м<sup>2</sup>;  $\sum C_{yg} = 39$  %;  $C_{yg} = 65$  %;  $c_g = 1000$  Дж/(кг·°С);  $\mu_g = 1.79 \cdot 10^{-5}$  Па·с;  $P_{atm} = 0.102$  МПа;  $\lambda_p = 2.5$  Вт/(м·°С);  $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $P_g = 4$  МПа;  $T_w = 15$ °С;  $c_w = 4100$  Дж/(кг·°С);  $L_g = 400$  м;  $D_v = 1800$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{sk} = 100–300$  м<sup>3</sup>/сут. Площадь теплообмена задавалась как объем выгазованного пространства при мощности угольного пласта 1 м. Тепловой поток, поступающий в породы кровли подземного газогенератора, определялся как разность между теплотой сгорания угля и теплом, заключенным в вырабатываемом при этом газе (3.33 МДж/м<sup>3</sup>). Расчеты проводились с временным шагом 1 сут.

На рис. 4 приведены результаты расчета кондуктивного и суммарного тепловых потоков, поступающих в вышележающий водоносный горизонт  $h_{10}Sh_{11}$  при подземном сжигании угольного пласта  $h_{10}^1$ . Кривые 1–3 получены при различных мощностях разделяющего пласта. Анализ показывает, что с увеличением его мощности количество тепла, проникающего в водоносный пласт, уменьшается, но доля конвективной составляющей в общем потоке тепла возрастает с 6.5 до 9.3 % при увеличении размеров породной кровли с 2 до 6 м соответственно.

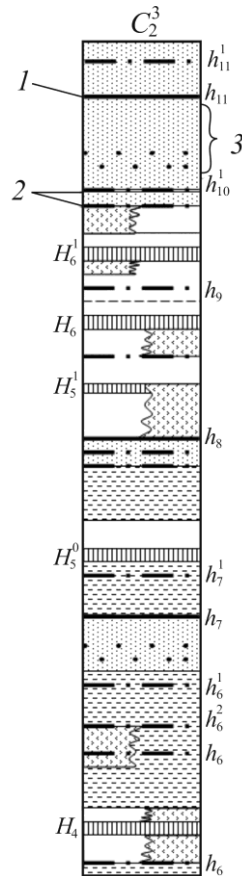


Рис. 3. Литолого-стратиграфический разрез свиты  $C_2^3$ : 1–2 — рабочие и нерабочие угольные пласты; 3 — водоносный горизонт “бабаковских” песчаников  $h_{10}Sh_{11}$

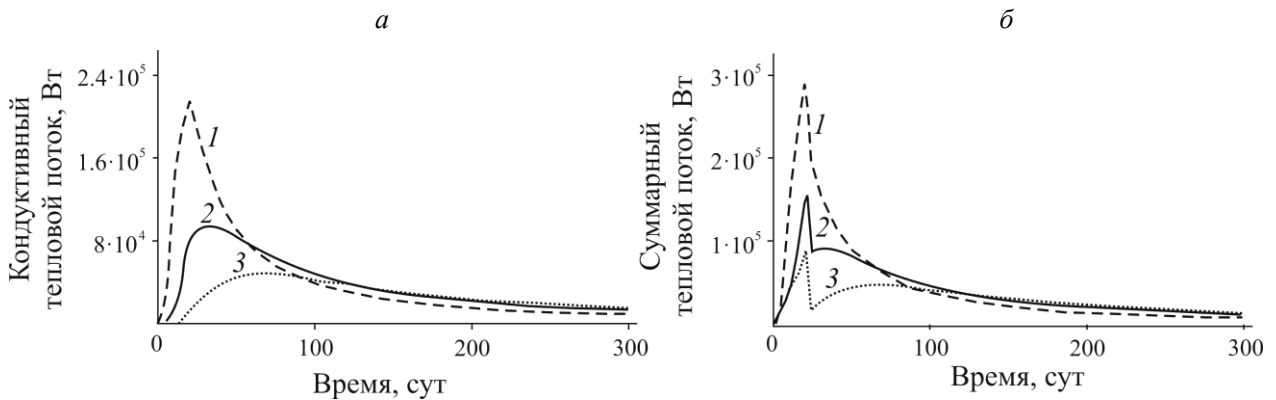


Рис. 4. Изменение кондуктивного (а) и суммарного (б) тепловых потоков, поступающих в водоносный горизонт при ПГУ: 1–3 — при мощности разделяющего пласта 2, 4 и 6 м соответственно

На рис. 5 представлен тепловой баланс процесса подземной газификации угля. Анализ диаграмм показывает, что большая часть (64 %) тепла сжигаемого топлива содержится в вырабатываемом газе. На долю физического тепла приходится 36 %. В водоносный горизонт, в зависимости от мощности разделяющего пласта, поступает от 18 до 25 % выделяющейся в процессе сжигания тепловой энергии. Остальное физическое тепло поглощается вмещающими породами.

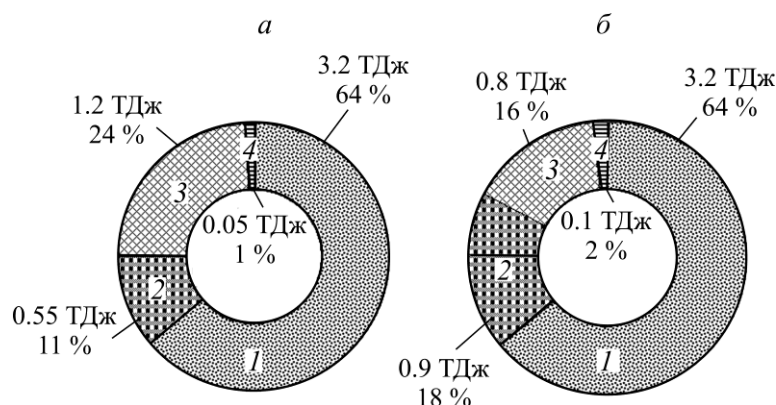


Рис. 5. Баланс тепловой энергии при газификации угольного пласта с мощностью разделяющего слоя 2 м (а) и 6 м (б): 1 — тепло, заключенное в вырабатываемом газе; 2 — тепло, идущее на прогрев вмещающих реакционный канал пород; 3, 4 — тепло, поступающее в водоносный горизонт кондуктивным и конвективным путем. Цифрами показано количество тепла (ТДж) и его доля (%) от тепловой энергии сжигаемого угля

Для оценки величины отбора тепла, проникающего через породы кровли, построен график изменения температуры подземных вод, откачиваемых скважиной из водоносного пласта, залегающего над подземным газогенератором (рис. 6). Температура нагретых вод уменьшается с увеличением мощности разделяющих пород и дебита водозаборной скважины (с 75 до 30°C), а также резко снижается после прекращения процесса ПГУ. Спустя 90 сут после окончания сжигания угольного массива температура воды в пласте достигает начальных значений (15°C). В связи с тем, что температура извлекаемых из скважины вод меньше кондиционных показателей (70°C для горячего водоснабжения и 90°C — для отопления), на дневной поверхности они могут быть использованы в качестве низкопотенциального источника энергии в тепловых насосах, системах отопления “теплый пол” и для первичного подогрева воды на нужды горячего водоснабжения в холодный период года. Таким образом, отбор нагретых подземных вод и их дальнейшее применение по указанным направлениям позволит использовать часть тепловой энергии, поступающей в породный массив, и тем самым повысить КПД процесса подземной газификации угля на 18–25% в зависимости от мощности водоупорного слоя.

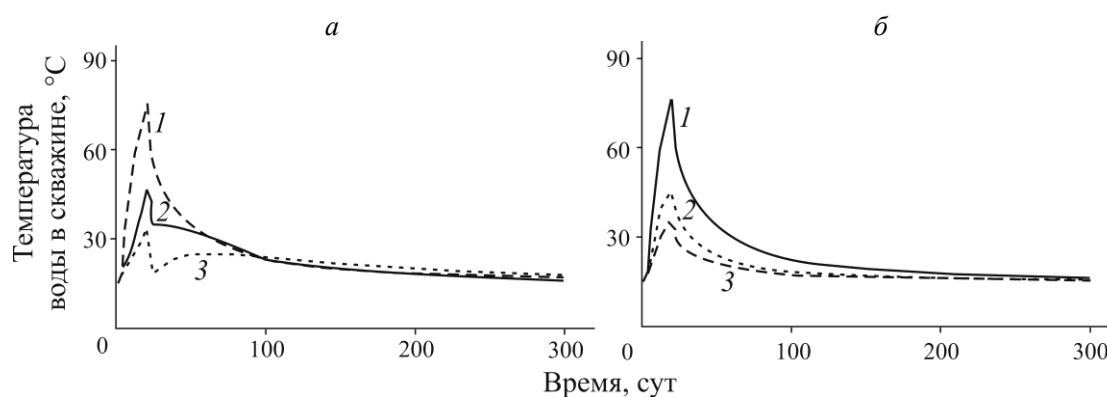


Рис. 6. Изменение температуры подземных вод, отбираемых скважиной из водоносного пласта, залегающего над подземным газогенератором: а —  $Q_{sk} = 100 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; б —  $m_p = 2 \text{ м}$ ; 1–3 — при дебите скважины 100, 200 и 300  $\text{м}^3/\text{сут}$  соответственно



## ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель фильтрации и теплопереноса в породной кровле газифицируемого угольного пласта позволяет определять конвективную и кондуктивную составляющие теплового потока, поступающего из реакционного канала в вышележащий водоносный горизонт. Реализованный принцип увеличения площади теплообмена за счет развития выгазованного пространства адекватно отражает изменения теплового потока и температуры подземных вод в зависимости от мощности водоупора. Используемые при тестировании модели горно-геологические и теплофизические параметры соответствуют условиям реального объекта (участок Ольхово Нижнее Чистяково-Снежнянского промышленного района Донбасса), пригодного для обработки способом подземной газификации.

По результатам выполненных расчетов установлено, что в процессе сжигания угольного пласта вышележащих песчаниках накапливается более 60 % тепла, поступающего во вмещающие породы из подземного газогенератора. В зависимости от размеров водоупорного слоя температура подземных вод там достигает 30–75°C, а их отбор и использование в качестве низкопотенциального источника энергии в тепловых насосах, системах отопления “теплый пол” и для первичного подогрева воды на нужды горячего водоснабжения в холодный период позволит повысить КПД процесса подземной газификации угля на 18–25 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко Ю. Н., Ермакова В. Н. Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины. — Донецк: Норд-пресс, 2004. — 631 с.
2. Крейнин Е. В. Нетрадиционные термические методы добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье. — М.: ИРЦГазпром, 2004. — 302 с.
3. Lindblom S. R. Rocky mountain lunderground coal gasification testhanna, wyoming groundwater evaluation, FinalReport, 1993. — 84 p.
4. Садовенко И. А., Инкин А. В. Обоснование физико-химических параметров формирования и управления углеводородными зонами при подземной газификации бурых углей // ГИАБ. — 2013. — № 8. — С. 275–284.
5. Гончаров С. А. Термодинамика. — М.: МГГУ, 2002. — 440 с.
6. Колоколов О. В. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля. — Днепропетровск: НГА Украины, 2000. — 281 с.
7. Скафа П. В. Подземная газификация углей. — М.: Госгортехиздат, 1960. — 323 с.
8. Звягинцев К. Н., Кулакова М. А., Волк А. Ф. Состояние и перспективы развития подземной газификации в СССР // Химия твердого топлива. — 1980. — № 6. — С. 57–60.
9. Садовенко И. А., Инкин А. В. Геолого-гидрогеологическое диагностирование условий участка Ольхово Нижнее для создания подземного теплогенератора // Науч. труды Национального горного университета. — 2015. — № 48. — С. 8–16.

*Поступила в редакцию 23/1 2018*