

та визначити основні напрямки технологічної дії на гідравлічну складову напружено-деформованого стану породної покрівлі, що є визначальною.

Результати. Дослідження закономірностей формування гідрогеомеханічного стану гідравлічно перевантажених масивів порід складають основу для розробки схем управління породними покрівлями та обґрунтування їх параметрів, що є актуальним для забезпечення безаварійної відробки вугільних пластів в складних гірничо-геологічних умовах шахт Західного Донбасу.

Список літератури

1. 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.
2. Садовенко И.А. Исследование геофильтрационного состояния подрабатываемого горного массива на геомеханических моделях / И.А. Садовенко, В.И. Тимошук // Известия вузов. Геология и разведка. – 1991. - № 2. – С. 92-97.
3. Садовенко И.А. Экспериментальные исследования защитных свойств горных пород в Западном Донбассе / И.А. Садовенко, В.И. Тимошук, А.А. Матвиенко // Известия вузов. Горный журнал. – 1990. - № 2. – С. 3-6.
4. Безазьян А.В. Пластовые отдельности и типизация поверхностей ослабления в породах нижнего карбона Западного Донбасса / А.В. Безазьян, И.А. Садовенко, И.М. Никитина // Уголь. - 1986. - N 7. - С. 55-56.
5. Земисев В.Н. Научное обоснование методов прогноза деформаций горных пород и земной поверхности при подземной разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях: Автореф. дис. ... докт. техн. наук.: 05.15.01. - Л., 1989. - 38 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ковалевською І.А.
Надійшла до редакції 21.09.2012*

УДК. 622.278

И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, А.В. Инкин

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ВОКРУГ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Разработана математическая модель фильтрации и теплопереноса в породной кровле подземного газогенератора при выгазовывании угольного пласта. По результатам моделирования установлена конвективная и кондуктивная составляющая теплового потока, проникающего из реакционного канала в вышелегающий водоносный горизонт. Даны оценки изменения величины потока и температуры подземных вод в зависимости от мощности водонепроницаемого слоя.

Розроблена математична модель фільтрації і теплопереносу в породній покрівлі підземного газогенератора при вигазовуванні вугільного пласта. За результатами моделювання встановлена конвективна і кондуктивна складова теплового потоку, що проникає з реакційного каналу у вище розташований водоносний горизонт. Дані оцінки зміни величини потоку і температури підземних вод залежно від потужності водотривкого шару.

A mathematical model of filtration and heat transfer in a pedigree of the roof of the underground gasifier at gasifying coal seam. As a result of simulation is set and the convective component of the conductive heat flux penetrating from the reaction channel which lies above an aquifer. Estimates are given of change of flow and temperature of groundwater, depending on the power of impermeable layer.

Введение. Подтвержденные запасы угля в Украине оцениваются в 53,6 млрд. тонн [1], из которых более двух третей сосредоточены в некондиционных и маломощных пластах не пригодных для разработки традиционными способами. В недрах остается около 70% углей различных марок, в связи с чем, становится актуальным вопрос о возможности их добычи с помощью подземной газификации.

Подземная газификация угля (ПГУ) представляет собой термохимический процесс преобразования топлива в условиях естественного залегания из твердого состояния в газообразное путем нагнетания дутья в одни скважины и отвода газа из других. Преимуществом ПГУ по сравнению с их добычей на шахтах является ликвидация опасного труда горняков, сокращение роста объема породных отвалов, улучшение состояния воздушного бассейна и, как следствие этого, повышение устойчивости природной среды.

Источником энергии необходимой для превращения угольного пласта в газ является выгазовываемый уголь. Тепло для газификации выделяется в результате интенсивного массообмена, что обеспечивает протекание химических реакций и дальнейшее термическое разложение угля. При этом часть тепла расходуется на нагрев продуктов газификации и теряется в горном массиве (физическое тепло), а другая часть заключена в горючих компонентах вырабатываемого газа (химическое тепло). Общее количество тепла сжигаемого топлива определяет КПД процесса газификации как отношение химического тепла к общему.

Научно-производственный опыт работы станций «Подземгаз» показывает, что химический КПД ПГУ на практике не превышает 70% [2] и требует разработки мер по его повышению. В связи с этим целью данной работы является установление динамики формирования теплового поля вокруг подземного газогенератора и возможности отбора тепла поступающего во вмещающие породы. Для этого необходимо решение следующих задач: 1) сформулировать математическую модель теплопереноса в породах кровли выгазовываемого угольного пласта; 2) провести вычислительную реализацию модели; 3) оценить влияние мощности водоупорного слоя на количество тепловой энергии, накапливающейся в водоносном горизонте и откачки нагретых вод на химический КПД процесса газификации.

Описание модели. Рассмотрим данный процесс на примере Левенцовской структуры, пригодной для разработки способом подземной газификации. Система состоит из трёх пластов (рис. 1), имеющих непосредственный тепловой контакт друг с другом. В процессе выгазовывания нижнего угольного пласта часть тепла расходуется для перехода в горючие компоненты, другая часть поступает во вмещающие породы. Так как нагретые продукты горения значи-

тельно легче дутьевых компонентов, подающихся в реакционный канал, то при газификации они будут занимать верхнюю часть выгазованного пространства, создавая там наиболее высокую температуру. Таким образом, почва водоупора над угольным пластом подвергается наибольшему термическому воздействию. Этот пласт прогревается над каналом газификации в период сжигания угля и остывает после прекращения дутья. Водоносный пласт сверху нагревается под воздействием теплового потока, проходящего через кровлю нижежащего водоупора.

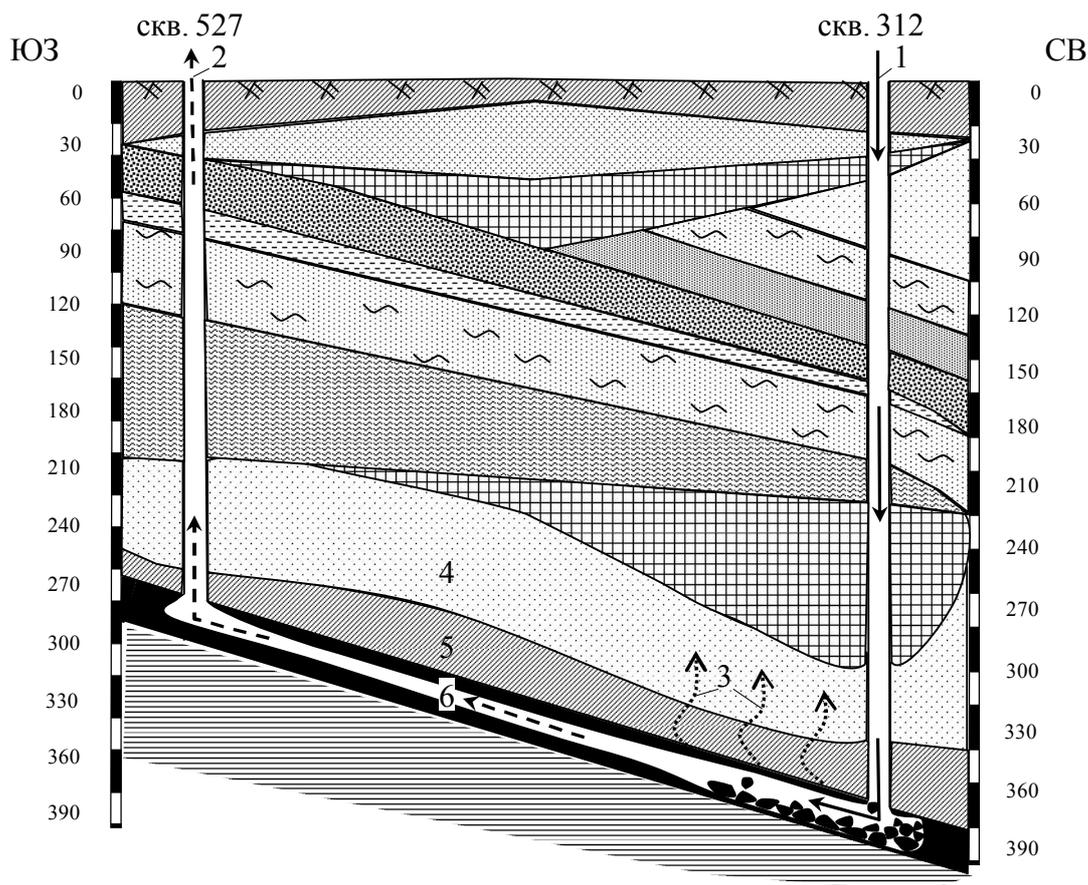


Рис. 1. Проектная схема процесса подземной газификации угля в горно-геологических условиях Левенцовской структуры: 1, 2, 3 – соответственно направление движения дутья, вырабатываемого газа и теплового потока; 4, 5, 6 – водоносный, водоупорный и угольный пласт соответственно

В оценке геотехнологии важно определить долю тепловой энергии, поступающей через водоупор в водоносный пласт, которую возможно отобрать путём откачки нагретой воды. При этом интенсивность подогрева подземных вод и мощность теплового потока напрямую зависят от объема выгазованного угля, и следовательно, от дутья, поданного в реакционный канал. Необходимое количество воздуха (м^3) для газификации 1 кг угля определяется по эмпирическому соотношению [3]

$$q = \alpha \frac{0.001Q_T + 25.1W}{418}, \quad (1)$$

где α – опытный коэффициент; Q_t , W – теплота сгорания и влажность угля.

Производительность подземного газогенератора характеризуется объемом отработанного угля за определенный промежуток времени, и может быть записана в следующем виде

$$\Pi = \frac{D}{q \cdot \rho_y}, \quad (2)$$

где D – расход дутья; ρ_y – плотность угля.

Выход газа с 1 кг угля составит

$$q_z = \frac{1}{q_y}, \quad q_y = \frac{12 \sum C_z}{22.4 \cdot C_{yz}}, \quad \sum C_z = \%CO_2 + \%CO + \%CH_4 \quad (3)$$

где q_y – расход угля на получение 1 м³ газа; $\sum C_z$ – сумма углесодержащих компонентов в газе; C_{yz} – содержание углерода в топливе.

Принудительное нагнетание в газогенератор дутья дополнительно создаст вертикальный градиент давления, являющийся основной причиной конвекции в покрывающих породах [4]. При этом суммарный тепловой поток идущий от канала газификации на нагрев водоупора будет равен

$$q_0(t) = q_{cv}(t) + q_{cd}(t) \quad (4)$$

где $q_{cv}(t)$ и $q_{cd}(t)$ – его конвективная и кондуктивная составляющие. Считаем, что теплофизические свойства пород водоупора не зависят от водообмена в вышележащем 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 «Подземгаза», теплофизические и геометрические параметры канала не постоянны, а связь между пустотами в нем носит местный и ограниченный характер [5]. 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 этого в выгазованное пространство попадают не только угольные, но породные стенки. Далее сечение канала продолжает увеличиваться и, достигнув предельных величин (S_3), уменьшается вследствие обрушения породной кровли. Затем картина изменения сечения канала повторяется вновь.

Учитывая, что в рассматриваемых горно-геологических условиях газификации подвергается некондиционный угольный пласт 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 усреднена по времени с учетом удельной эффективности работы канала газификации [6]

$$\mathcal{E}_y = \frac{F}{l},$$

где F – площадь угольного пласта, выгазованная при отработке единицы его длины (l) вдоль линии забоя.

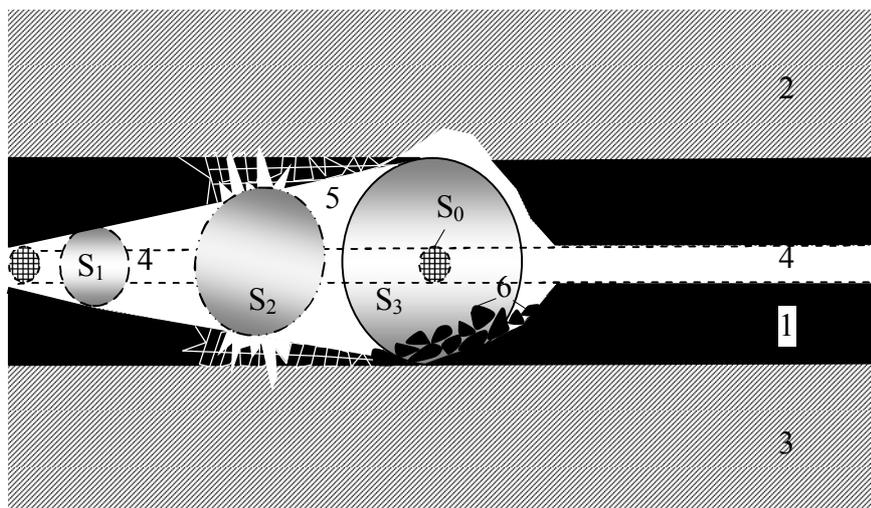


Рис. 2. Схема образования реакционного канала: 1, 2, 3 – угольный пласт, его кровля и подошва соответственно; 4 – первоначальный (сбоечный) канал; 5 – выгазованное пространство; 6 – обрушенные породы; S_0 , S_1 , S_2 – начальное и последующие сечения канала соответственно

Конвективный тепловой поток, поступающий через водоупор в водоносный горизонт, определяется по формуле

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

где Q_g – объемный поток газа по трещинам в водоупоре; ρ_g , c_g , μ_g – соответственно плотность, теплоемкость и вязкость газа; T_g – температура (газа) в канале газификации; T_w – температура воды в верхнем проницаемом слое над водоупором; κ – проницаемость пород; P_g – давление газа в выгазованном пространстве; P_{atm} – атмосферное давление; L_g – длина пути фильтрации газа до уровня, где поддерживается атмосферное давление.

Принимается, что давление газа одинаково в объеме полости. При высокой скорости фильтрации газа, достигающей нескольких мм/с, конвективный тепловой поток в течение суток поступает в водоносный горизонт. При этом нагревается небольшой объем вокруг трещин, а основная масса пород водоупора прогревается вследствие кондуктивного переноса тепла.

Пусть $\chi = q_{cv}/q_o$ – доля конвективного потока в общем потоке тепла через водоупор. Оставшаяся часть тепла $(1 - \chi) q_o$ поступает в вышележащие породы кондуктивным путем. Оценки показывают, что χ не превышает несколько процентов даже при значительном увеличении проницаемости водоупора.

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

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

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

Температура в слое водоупора над каждым участком суточного поступления тепла рассчитывается по формуле

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

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

где z – вертикальная координата, отсчитываемая от подошвы водоупора вверх;

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_r \rho_r}$$

t – время; λ – коэффициент теплопроводности пород водоупора; c_r , ρ_r – теплоемкость и плотность пород водоупора.

Формула (8) представляет собой аналитическое решение уравнения теплопроводности в однородной полуограниченной области, на границе которой задан постоянный единичный тепловой поток [6].

Тепловой поток на кровле водоупора можно определить по формуле

$$q_{cd,w}(t) = S_{cd} \lambda \cdot \left. \frac{\partial T(t)}{\partial z} \right|_{z=m_0} \quad (9)$$

где m_0 – мощность водоупора над каналом газификации. 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 снизит температуру на подошве пласта и увеличит отток тепла из водоупора. Однако этот эффект будет незначительным ввиду небольшой разницы, температур нагретой воды и ее фоновой (естественной) температуры в пласте.

Отбор тепла, поступающего в водоносный горизонт, возможен через откачивающую скважину, расположенную в проницаемом пласте вблизи канала газификации. Предположим, что весь поток условно мгновенно затрачивается на нагрев воды поступающей в скважину, и она сразу же удаляется из пласта. Тогда температура воды в скважине может быть рассчитана по формуле

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

где c_w , ρ_w – теплоемкость и плотность воды, Q_{sk} – дебит скважины.

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

Тестирование модели. Сопоставительные расчеты по формулам (1)–(10) были выполнены в программной среде Mathcad для гидрогеологических условий Левенцовской структуры [7] на территории Западного Донбасса. Залегающие на данном участке водоносные пласты могут быть использованы для аккумуляции теплоносителей, а угольные – для отработки способом подземной газификации. Теплофизические свойства и геотехнологические параметры ПГУ принимались следующими: $\alpha = 1,1$; $Q_T = 15$ МДж/кг; $W = 35\%$; $\rho_y = 1000$ кг/м³; $\sum C_z = 39\%$; $C_{yz} = 65\%$; $\rho_g = 1,1$ кг/м³; $c_g = 1000$ Дж/кг·°С; $\mu_g = 1,79 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с; $T_g = 900$ °С; $\kappa = 10^{-14}$ м²; $P_{atm} = 0,102$ МПа; $\lambda = 2,5$ Вт/м·°С; $c_r = 1000$ Дж/кг·°С; $\rho_r = 1700$ кг/м³; $T_w = 15$ °С; $c_w = 4100$ Дж/кг·°С; $\rho_w = 1000$ кг/м³; $L_g = 200$ м; $P_g = 3$ МПа; $t = 20$ сут; $D = 1800$ м³/час; $Q_{sk} = 100$ м³/сут. Площадь теплообмена задавалась как объем выгазованного пространства при мощности угольного пласта один метр. Тепловой поток, поступающий в породы кровли подземного газогенератора, определялся как разность между теплотой сгорания угля и теплом заключенным в вырабатываемом при этом газе ($Q_T = 3,33$ МДж/м³). Расчеты проводились с шагом по времени в одни сутки.

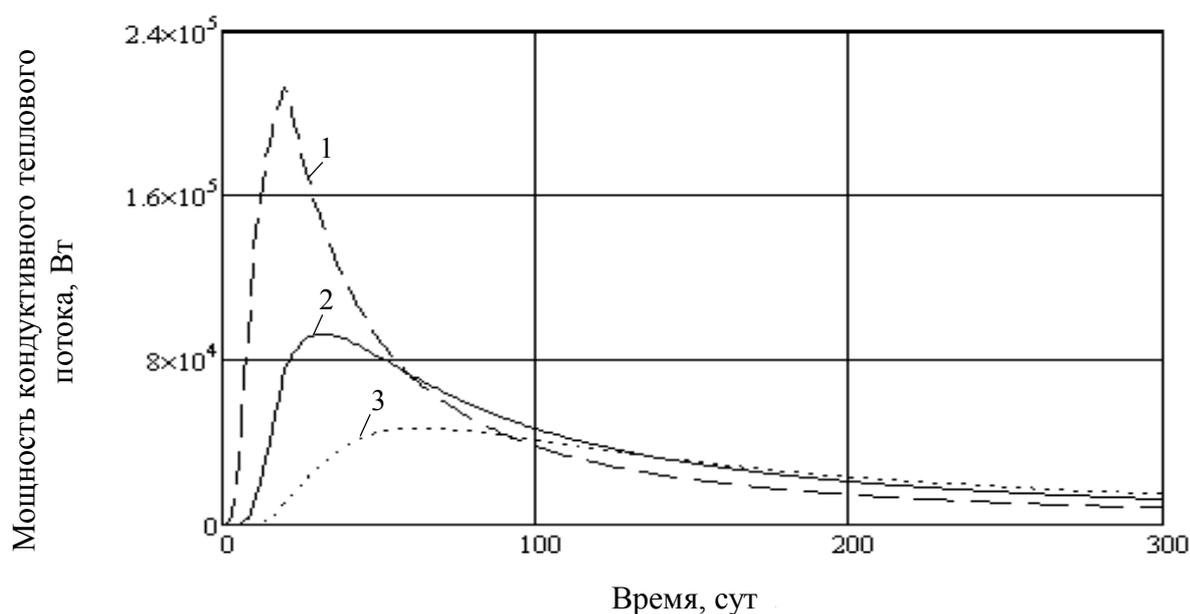


Рис. 3. Изменение мощности кондуктивного теплового потока, поступающего в водоносный горизонт при газификации угольного пласта в зависимости от размеров водоупора: 1, 2, 3 – при мощности водоупорных пород 3, 5 и 7 м соответственно

На рис. 3–4 приведены результаты расчета кондуктивного и суммарного теплового потока поступающего в выше залегающий водоносный горизонт при

газификации угольного пласта. Кривые 1–3 получены при различных мощностях водоупора. Анализ показывает, что с увеличением размеров разделяющего слоя количество тепла проникающего в водоносный пласт уменьшается, что очевидно, но доля конвективной составляющей в общем потоке тепла возрастает с 6,5 до 9,3% при увеличении мощности водоупора с 3 до 7 м соответственно.

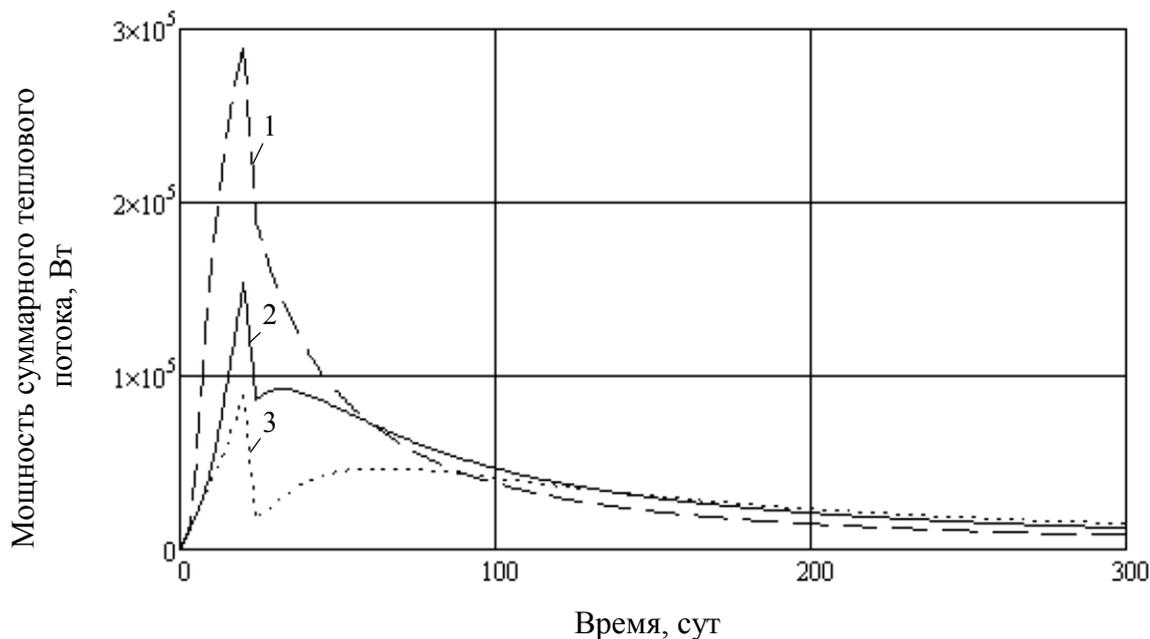


Рис. 4. Изменение суммарного теплового потока, поступающего в водоносный горизонт при выгазовывании угольного пласта в зависимости от мощности водоупора: 1) 3 м, 2) 5 м, 3) 7 м

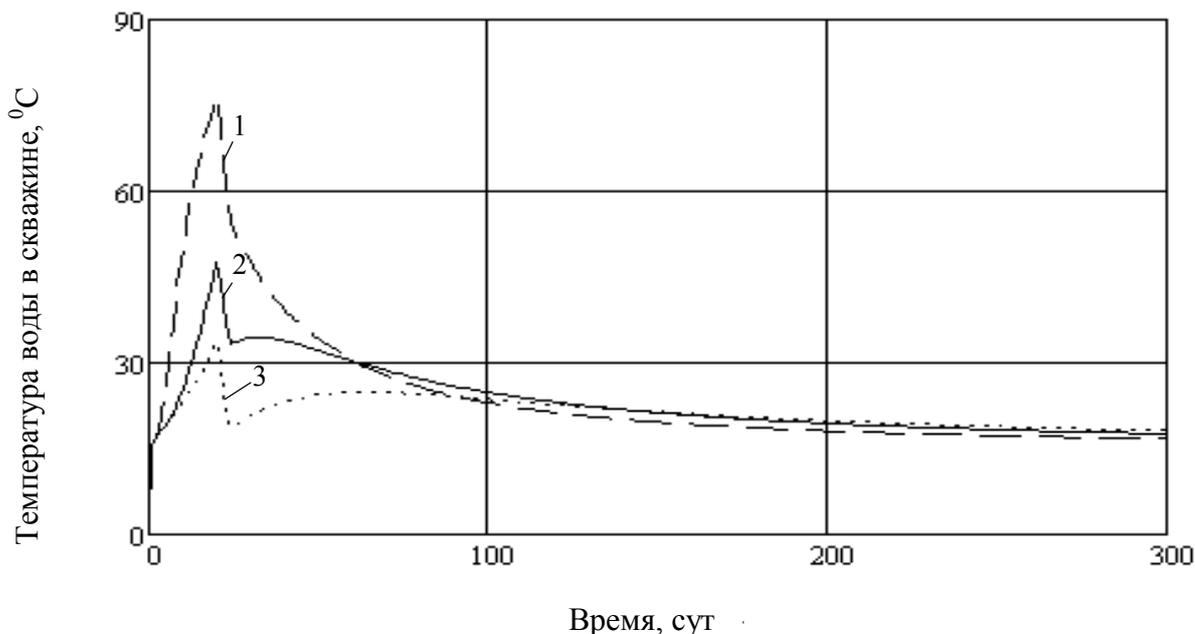
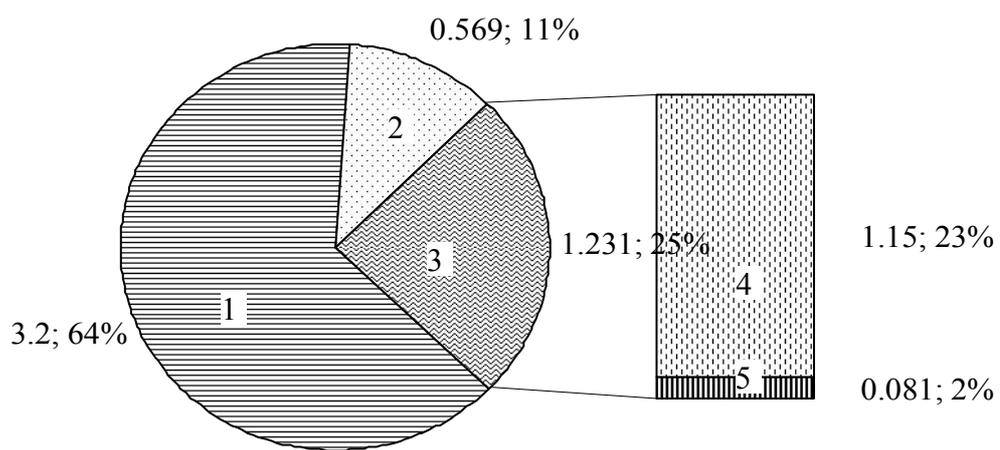
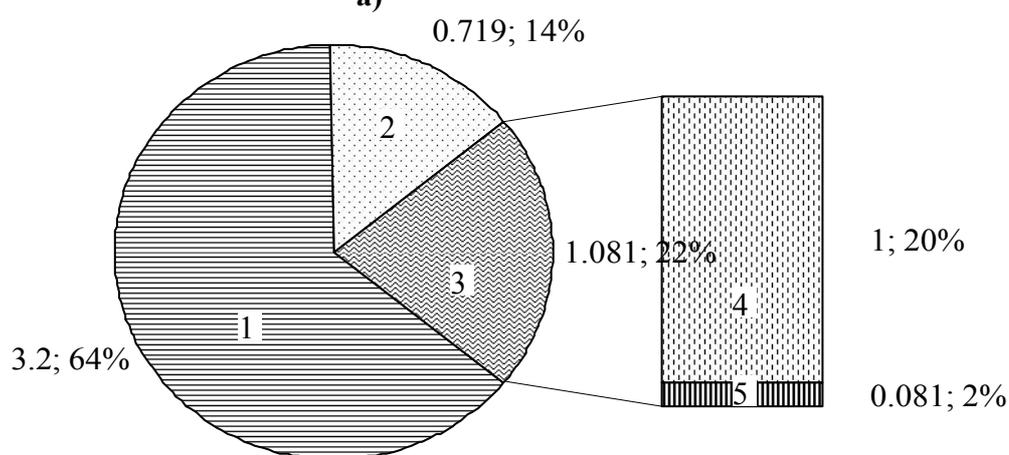


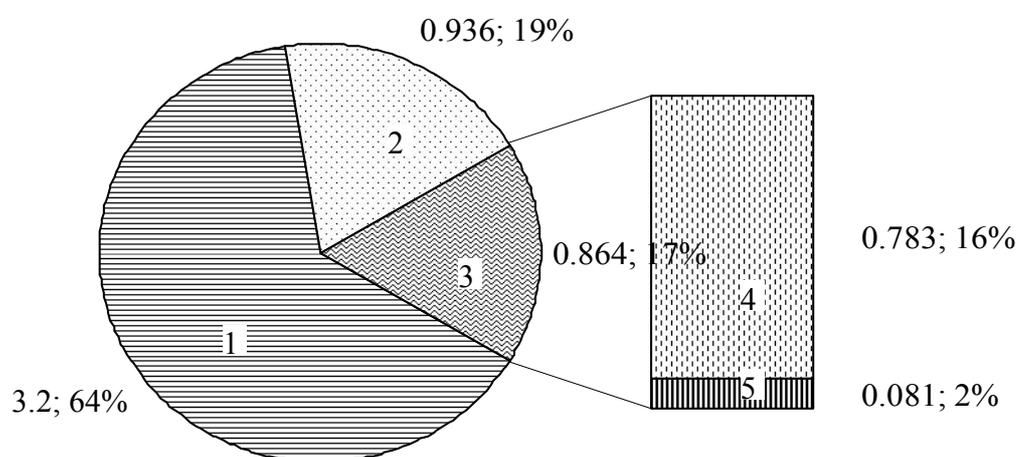
Рис. 5. Изменение температуры подземных вод, отбираемых скважиной из водоносного пласта, залегающего над подземным газогенератором: 1, 2, 3 – при мощности водоупорных пород 3, 5 и 7 м соответственно



а)



б)



в)

Рис. 6. Баланс тепловой энергии при газификации некондиционного угольного пласта Левенцовской структуры: а, б, в – при мощности водоупорных пород 3, 5 и 7 м соответственно; 1 – химическое тепло, заключенное в газе ПГУ; 2 – физическое тепло, поглощенное породным массивом; 3 – тепло, поступающее в водоносный горизонт кондуктивным (4) и конвективным (5) путем. Цифрами показано количество тепла в ТДж и его доля от тепловой энергии газифицируемого угля в процентах

Для оценки величины отбора тепла, проникающего через породы кровли водоупора, на рис. 5 построен график изменения температуры подземных вод, откачиваемых скважиной из водоносного пласта, залегающего над подземным газогенератором. Температура нагретых вод уменьшается с увеличением мощности водоупорных пород и резко снижается после прекращения процесса газификации. Спустя 90 суток после окончания выгазовывания угольного массива температура воды в пласте достигает начальных значений.

На рис. 6 представлен тепловой баланс ПГУ. Анализ диаграмм показывает, что большая часть (64%) тепла газифицируемого топлива содержится в вырабатываемом газе. На долю физического тепла приходится оставшиеся 36%. В водоносный горизонт, в зависимости от мощности водоупора, поступает от 18 до 25% выделяющейся в процессе газификации тепловой энергии. Остальное физическое тепло поглощается вмещающими породами. Отбор нагретых вод из водоносного пласта позволяет повысить КПД процесса газификации в среднем до 85%.

Выводы. Разработана модель теплопереноса в породах кровли подземного газогенератора при выгазовывании угольного пласта. Используемые при тестировании модели горно-геологические и теплофизические параметры соответствуют условиям реального объекта, пригодного для отработки угля способом подземной газификации. Выполненные расчеты позволили оценить роль конвективной и кондуктивной составляющей теплового потока в нагреве подземных вод вышележающего водоносного горизонта. По результатам моделирования установлены количественные показатели уменьшения величины потока тепла и температуры подземных вод с увеличением мощности водоупорного слоя. Тепловой баланс ПГУ показывает, что в водоносном пласте накапливается от 18 до 25% тепла, выделяющегося при сжигании угля. Это позволяет повысить КПД подземной газификации до 82 и 89% соответственно.

Список литературы

1. Тополов В.С. Угольная отрасль Украины: энергоресурсы, ретроспектива, состояние, проблемы и стратегия развития / В.С.Тополов, Б.А.Грядущий, С.Я.Петренко. – Д.: ООО «Алан», 2005. – 408 с.
2. Крейнин Е.В. Нетрадиционные термические методы добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье / Е.В. Крейнин. – М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2004. – 302 с.
3. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля: Монография / [под. ред. О.В. Колоколова]. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 281 с.
4. Аренс В.Ж. Контроль и управление процессом подземной газификации угля / В.Ж. Аренс, И.М. Бирман // Геотехнология топливно-энергетических ресурсов: Сб. науч. тр. – К.: Наук. Думка, – 1986. – С. 220-230.
5. Ариненков Д.М. Подземная газификация угля / Д.М. Ариненков, Л.М. Маркман. – Сталино: Сталино-Донбасс, 1960. – 96 с.
6. Гончаров С.А. Термодинамика: Учебник / Гончаров С.А. – М: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 440 с.
7. Отчет о поисках и оценке коллекторов для захоронения минерализованных шахтных вод Западного Донбасса (Левенцовская и Северо-Орельская площади) / О.А. Горобец, С.З. Держак, Б.Б. Чемерис. – Павлоград: Павлоградская ГРЭ, ПГО "Донбассгеология", МУП УССР, 1985. – 219 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ковалевською І.А.
Надійшла до редакції 30.10.2012*