УДК 622.278:622.746; 622.7.002.82

Трошенькин Б.А. − д.т.н., Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина
Трошенькин В.Б. − к.т.н., Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина
Янко С.В. − д.т.н., Академик АГН, «Отделение угля, горючих сланцев и торфа» Академии Горных Наук Украины, Киев, Украина

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Рассмотрена проблема производства электроэнергии и тепла при сжигании угля под землей. Предложена математическая модель взаимодействия очага горения с горными породами и глубинными водами, позволяющая оценить влияние физических и геологических факторов на энергоемкость газов сжигания. Особое внимание, в частности, обращено на обеспечение условий удаления подземных вод из зоны действия подземного генератора тепла.

Ключевые слова: уголь, подземное сжигание, математическая модель, физические и геологические поля, осушение зоны горения, энергоемкость газов.

Введение

Поиск альтернативных энергоносителей является одной из важнейших задач современности. Основное внимание исследователей попрежнему приковано к возможности получения энергетических газов на основе угля.

Известно, что при подземной выемке угля извлекается лишь 40–50 % запасов месторождения. Остальная часть остается под землей в виде поддерживающих целиков.

Предложен способ управляемого сжигания целиков с вытяжкой на поверхность горячих продуктов горения с целью выработки электроэнергии и тепла. Практическая проверка способа выполнена в промышленных условиях в Подмосковном и Донецком бассейнах на шахтах с отработанными запасами. Повышение коэффициента извлечения полезного ископаемого из недр за счет сжигания не менее, чем на 10–15 % увеличивает эффективность горно-энергетического предприятия [1].

Для широкого применения разработанной технологии следует решить ряд задач: необходимо изучить формы выгорания угольного пласта, размеры зон, температуры и давления в ПГТ; исследовать поведение кровли и способы управления ею, определить методы регулирова-

© Трошенькин Б.А., Янко С.В., Трошенькин В.Б. 2013

ния под землей газовых потоков, найти способы борьбы с потерями угля и газа в недрах, а также методы бесшахтного осушения месторождений и т. д. В данной работе предпринята попытка теоретического рассмотрения затронутых проблем.

Теоретическая модель Подземного Генератора Тепла

Для обеспечения надежной эксплуатации подземного генератора тепла необходимо вблизи ПГТ пробурить ряд водопонижающих скважин.

Каждая скважина обеспечивает дренирование подземных вод из зоны, радиус которой может достигать 1000 м.

Интенсивность притока подземных вод в зону ПГТ зависит как от параметров процесса сжигания угля, так и от фильтрационных свойств углевмещающих пород.

Дебит водопонижающих скважин может быть рассчитан лишь после анализа взаимного влияния ПГТ и дренирующей системы.

Наиболее полно это влияние раскрывает термодинамическая модель системы, включающей две открытые друг для друга подсистемы: зону расположения ПГТ и зону дренирования воды.

Математическим выражением условий формирования подсистемы ПГТ является уравнение (1) [2, 3]

$$dQ \geq dU + pdV + \frac{dw^2}{2} + \sum \mu_i dn_i + dA\,, \qquad (1)$$

где $dQ = c \cdot dT$ – теплота, поступающая в подсистему; T – абсолютная температура продуктов сгорания; c – удельная теплоемкость; dU – внутренняя энергия подсистемы; p – внешнее давление; dV – изменение объема подсистемы; dw – изменение скорости движения газов; μ_i – химический потенциал i – го компонента; dn_i – изменение молей i – го компонента; dA – работа подсистемы при обмене массой и теплотой с внешней средой.

В этом уравнении dQ представляет собой теплоту, полученную подсистемой при сжигании угля.

Первый член (dU) в правой части уравнения – это изменение внутренней энергии подсистемы при сжигании угля.

Второй член (pdV) описывает работу подсистемы по преодолению внешнего давления.

Третий член – приращение кинетической энергии газов сжигания.

Четвертый член отражает физико-химические процессы, протекающие между подсистемами, включая фазовые переходы.

Последний пятый член уравнения представляет собой работу подсистемы при тепломассообмене со смежной подсистемой, из которой дренируется вода.

Аналогичное уравнение может быть составлено для дренируемой подсистемы, где текучей средой является вода.

Перечисленные в уравнении процессы формируют физические и геологические поля системы в целом. К физическим полям относятся: поле пластовых давлений, температур, концентраций веществ и механических напряжений. К геологическим полям – геофильтрационное, литолого-минералогическое, структурно-тектоническое и другие, например, поле в границах пластово-блоковой системы.

Физические и геологические поля взаимосвязаны. Изменение одного из них приводит к изменению других. Так, например, при использовании приточно-вытяжного метода подачи дутья и отвода продуктов сгорания в выжигаемом канале, пробуренном по угольному пласту, создается пониженное давление по отношению к давлению окружающего пространства, что способствует притоку подземных вод в ПГТ.

Как известно, приточно-вытяжной способ применяют при сжигании слоев угля сравнительно близко расположенных к поверхности Земли. В этом случае удается избежать проникновения газов сжигания через пористые породы к дневной поверхности. Для интенсификации процесса сжигания глубоко залегающих слоев угля воздух подают в ПГТ при повышенном давлении, что, в свою очередь, дает возможность оттеснить большую часть подземных вод из зоны горения.

Отсюда видно, что изменение величины второго члена правой части уравнения баланса энергии (1) существенно влияет на геофильтрационное поле.

Определенное воздействие на геофильтрационное поле оказывает увеличение скорости движения газов в ПГТ (третий член в правой части уравнения (1)). С ускорением потока интенсифицируется теплообмен с окружающими горными породами. Прогрев пород приводит к снижению вязкости воды, что улучшает ее фильтрацию через пористые структуры.

Одновременно повышение температуры горных пород сказывается на состоянии литолого-минералогического поля: ближайшие к очагу горения слои оксидов (минеральные компоненты кровли и неорганической части угля), взаимодействуют с углеродом, образуя сплавы и углекислый газ [4]. Другая часть минералов (карбонаты и сульфаты) разлагается с выделением газов. Разлагаются также сидерит и пирит.

Вследствие горения угля и разложения пород кровли подземные воды насыщаются углекислым газом с образованием гидрокарбонатных ионов. Минерализация воды растет также за счет сульфат ионов. В конечном счете, насыщение воды солями увеличивается в 2–3 раза [5]. Вымывание солей из горных пород способствует развитию пористости, что, в свою очередь, приводит к росту притока воды в ПГТ.

На границе подсистем происходит вскипание контактирующих с ПГТ подземных вод.

Перечисленные физико-химические процессы учитывает четвертый член в уравнении баланса энергии.

Последний пятый член уравнения (1) описывает сток тепла за счет теплопроводности в окружающие ПГТ горные породы. При этом возможна также утечка части газов сгорания в пористые слои.

Фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) коллекторов дренируемой подсистемы существенным образом зависят от напряженно-деформационного состояния горных пород. Переменные во времени поля напряжений, имеющие квазипериодический характер, наблюдаются для всех без исключения регионов страны и фиксируются на стационарных геофизических полигонах.

Не секрет, что твердое тело Земли испытывает лунно-солнечное воздействия. Поскольку Земля не является абсолютно жестким телом, то возникает деформация, приводящая к появлению горбов, достигающих в высоту десятков сантиметров. Приливные горбы, подобно волнам, несколько раз в сутки обегают планету [6]. Самый большой подъем твердой оболочки Земли происходит так же, как и при морских приливах, при суммарном воздействии гравитационных сил Луны и Солнца. Наибольшие подвижки земной коры возникают в периоды весеннего и осеннего равноденствия (21 марта и 23 сентября, соответственно).

Помимо приливной Земля испытывает еще и вращательную деформацию. Влияние вращения заключается в сжатии планеты с полюсов. Степень деформации можно количественно охарактеризовать по величине сплюснутости планеты. Известно, что Земля вращается неравномерно. Эта неравномерность включает вековое замедление вращения Земли (сутки увеличиваются на 1–2 мс в столетие), небольшие сезонные изменения скорости вращения (быстрее всего Земля вращается в августе и медленнее всего в марте) и, наконец, неправильные скачкообразные изменения скорости вращения (на порядок превосходящие вековые изменения). В соответствии с динамикой вращения Земли меняется и величина вращательной деформации.

Кроме того, на земную кору оказывают влияние подземные реакции, проходящие на глубине десятков и сотен километров [7].

Деформационное состояние окружающих ПГТ горных пород определяется не только природной тектонической активностью, но и антропогенным воздействием, связанным с выжиганием слоев угля. Возникающие в этом случае обвалы также изменяют структурно-тектоническое поле.

Переменное во времени поле напряжений приводит к нестационарности термодинамических процессов и, как следствие, к переменным во времени физическим и геологическим полям. С другой стороны, термодинамическое равновесие могут нарушать тепловые потоки различной

интенсивности (влияние Q, т.е. левого члена уравнения). Смещение равновесия сопровождается активизацией физико-химических процессов, что преобразует барическое, гидрохимическое и температурные поля в пластово-блоковой системе. Это, в свою очередь, приводит к изменению ранее существовавших геологических полей.

Очевидно, что по мере продвижения фронта пламени вдоль пробуренных каналов будут изменяться условия выгорания угля. Одновременно с этим произойдет колебание режимов поступления воды в ПГТ. Так, вслед за ростом объема выжженного пространства увеличится поверхность контакта между подсистемами, что повлечет за собой интенсификацию процесса фильтрации воды в ПГТ.

Данное обстоятельство приводит к необходимости рассчитывать количество поступающей в ПГТ воды как минимум для трех режимов. К ним относятся:

– начальный режим, когда горизонтальные скважины пробурены, но сжигание угля еще не начато;

– промежуточный режим, соответствующий по времени выжиганию примерно половины отрабатываемых пластов;

– конечный режим, связанный с завершающей стадией отработки месторождения.

Зафиксированный в результате расчетов максимальный приток воды в ПГТ следует брать за основу при выборе производительности глубинных насосов водопонижающих скважин.

Бурение каналов вдоль угольных пластов не изменяет температурное поле системы в целом. Поэтому приток воды в ПГТ для начального режима проводят по уравнениям гидромеханики.

Но предварительно на основе результатов геолого-разведочных работ необходимо установить физико-химические свойства угля и углевмещающих пород.

Для угля важно знать: удельную теплоту сгорания; зольность сухой массы; выход летучих веществ на горючую массу; содержание влаги в рабочей массе топлива; содержание серы в общей массе топлива. Кроме того, необходимо иметь сведения о содержании в угле кислорода, водорода и азота, а также химический состав золы топлива.

К основным физико-химическим свойствам углевмещающих пород относятся: удельный вес пород; объемный вес; влажность; коэффициент пористости и коэффициент влагонасыщенности; зерновой и химический состав; плотность сыпучих пород; консистенция глинистых пород; сжимаемость пород (закон уплотнения).

Желательно также знать количество пленочной, капиллярной и свободной воды в порах.

Фильтрация в породах (пористых телах) зависит от степени их уплотнения, а для полутвердых глин – и наличия начального градиента напора.

Движение разных видов воды в породах и грунтах происходит под влиянием различных факторов: пленочной воды – под действием разности осмотических давлений, капиллярной – под действием разности сил всасывания (адсорбционных) и, наконец, гравитационной (свободной) – под действием разности напоров воды [8].

Расчет водопонижающей системы в холодных начальных условиях сводится к определению производительности скважины и динамического уровня воды. Этот уровень является тем подпором воды, который необходим для обеспечения всасывающей способности глубинного центробежного насоса. Динамический уровень жидкости в скважине обычно определяется предварительной пробной откачкой жидкости из пласта ее залегания. При отсутствии этих данных динамический уровень жидкости в предполагаемой скважине можно определить предварительным расчетом [9]. Для составления такого расчета должно быть известно следующее:

– расположение пласта залегания жидкости (над плотным грунтом или между плотными грунтами);

– состав грунта в пласте;

– высота статического напора жидкости в пласте h_{cm}, м;

– коэффициент фильтрации грунта в пласте K_{ϕ}, определяемый в лаборатории по пробе грунта, м/с;

– радиус дренирования скважины R_c (для песков средней зернистости R_c = 250–500 м, для крупнозернистых песков R_c = 700–1000 м);

– предполагаемый дебит (расход) жидкости в скважине V_c, м^3/с.

Из гидравлики известно, что движение жидкости в пласте залегания может быть безнапорным или при некотором давлении.

Для безнапорного движения жидкости в пласте, расположенном над плотным грунтом (рис. 1), дебит скважины определяется из выражения

$$V_e = \pi K_{\phi} \frac{h_{cm}^2 - h_{\partial}^2}{ln \frac{2R_c}{D_c}},$$

где D_c – диаметр скважины, м; h_{∂} – динамический уровень, м, откуда

$$h_{\partial} = \sqrt{h_{cm}^2 - \frac{V_e}{\pi K_{\phi}} ln \frac{2R_c}{D_c}},$$

или

$$h_{\partial} = \sqrt{h_{cm}^2 - \frac{0{,}7329 V_e}{K_{\phi}} lg \frac{2R_c}{D_c}}.$$

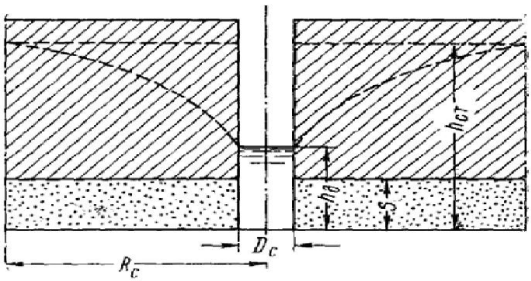

Рис. 1. Схема безнапорного движения жидкости в грунте

Для напорного движения жидкости в пласте, расположенном между плотными грунтами, дебит скважины определяется с учетом динамического давления потока жидкости в пласте.

Количество скважин зависит от размеров выжигаемой свиты угольных пластов.

Второй этап расчета производительности водопонижающих скважин проводят при достижении полупериода процесса выжигания угольной свиты.

Вначале выполняют расчет процесса горения. При сжигании угля выделяется теплота dQ и одновременно образуются газообразные продукты, поглощающие это тепло. Чем выше удельная теплота сгорания угля и меньше зольность, тем будет выше температура газов сгорания, что позволяет получить в котлах-утилизаторах пар высоких параметров.

Работоспособность продуктов сжигания определяется по формуле

$$l = Q - T'\left(S_{п.с.}^{кон} - S_{с.к.}^{нач}\right) \ , \qquad (2)$$

где $T' = T_{с.к.}^{нач}$ – начальная температура сжигаемых компонентов (равная температуре окружающей среды); $S_{п.с.}^{кон}$, $S_{с.к.}^{нач}$ – энтропия продуктов сжигания в конце и сжигаемых компонентов в начале процесса, соответственно.

Второй член в правой части уравнения (2) представляет собой связанную энергию, т.е. ту часть тепловой энергии, которую приходится, согласно второму закону термодинамики, отправлять в окружающую среду.

Разность теплот можно преобразовать в механическую энергию, а затем в электрическую.

Поэтому крайне важно сохранить работоспособность продуктов сжигания до входа в котел-утилизатор. С этой целью отслеживают влияние процессов, описываемых каждым членом уравнения энергии, на потерю тепла.

Если тепловой эффект реакции обозначить через Q', то количество тепла, выделяющееся с единицы реакционной поверхности в единицу времени для диффузионно-кинетического режима, будет

$$q = Q' \frac{k\beta}{k+\beta} C,$$

где k – константа скорости химической реакции на поверхности угля, зависящая от температуры по уравнению

$$k = k_o \, exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где k_o – предэкспонентный множитель; E – энергия активации; R – газовая постоянная; β – коэффициент массоотдачи; C – концентрация реагирующих веществ в объеме.

Стационарный тепловой режим установится тогда, когда этот приход тепла сделается равным количеству тепла, отводимому с единицы поверхности в единицу времени [10]. Последнее можно представить как

$$q' = \alpha\left(T_{п.с.}^{кон} - T_{с.к.}^{нач}\right),$$

где α – коэффициент теплоотдачи от реакционной поверхности к движущемуся газовому потоку; $T_{п.с.}^{кон}$ – конечная температура продуктов сгорания.

Причем коэффициент α оценивают по обычным формулам для конвективного теплообмена.

Располагая интенсивностью теплоотдачи, определяют прогрев окружающих горных пород и увеличение притока воды в ПГТ за счет снижения ее вязкости. Кроме того, учитывают рост поверхности контакта ПГТ с дренирующей системой.

Найденное количество воды должно быть удалено через водопонижающие скважины. В противном случае часть тепловой энергии будет затрачена на испарение воды, что снизит работоспособность продуктов сгорания.

Аналогичным образом выполняют расчет для конечной стадии выжигания угольных пластов.

Наибольшие трудности при теоретическом рассмотрении проблемы встречает оценка изменений в структурно-тектоническом поле.

В связи с этим необходимо накапливать статистические данные по поступлению воды в отрабатываемые пласты как при сжигании, так и при их газификации. На начальном этапе проектирования следует закладывать мощность глубинных насосов с определенным запасом в зависимости от обводненности того или иного месторождения.

Выводы

Предложен способ управляемого сжигания оставшихся под землей угольных целиков с вытяжкой на поверхность горячих продуктов горения с целью выработки электроэнергии и тепла.

Показано, что уравнение энергии газового потока, включающее изменение массы вещества и тепла, вызванное химическими реакциями и фазовыми превращениями, достаточно полно отражает закономернорсти взаимодействия очага подземного сжиганиня угля с окружающими горными породами и глубинными водами.

Это взаимодействие отражает по сути дела влияние друг на друга физических и геологических полей. К физическим полям относятся: поле пластовых давлений, температур, концентраций веществ и механических напряжений. К геологическим полям – геофильтрационное, литолого-минералогическое, структурно-тектоническое и другие, например.

Установленная зависимость физических и геологических полей открывает возможность достаточно корректно рассчитывать энергоемкость продуктов сгорания, а также количество воды, которое необходимо удалить из зоны горения.

Дана методика расчета режима осушения очага горения скважинным методом.

Литература

1. Ржевский В.В. Проблемы горной промышленности и комплекса горных наук. – М.: Малое предприятие «Ладья»., 1991. – 244 с.

   Rzhevsky V.V. The Problems of the Mining Industry and Mining Sciences Complex. – Moscow: Small enterprise «Ladya», 1991. – 244 pp.

2. Гиббс Дж.В. Термодинамические работы. –М.; – Л.: Госиздат. технико-теоретической литературы, 1950. – 492 с.Gibbs J.W.

   Thermodynamic Works. – Moscow; – Leningrad: Gosizdat. tehniko-teoreticheskoy literatury, 1950. – 492 pp.

3. Ястружембский А.С. Техническая термодинамика. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 496 с.

   Yastrzhembsky A.S. Technical Thermodynamics. – Moscow; – Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. – 496 pp.

4. Трошенькин Б.А. Закономерности подземного сжигания угля/ Трошенькин Б.А., Янко С.В., Трошенькин В.Б.//Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сб. науч. статей. – К.: Изд-во НПВК «Триакон», – № 3(11), 2012. – С. 45–49.

   Troshenkin B.A. The Regularities of Undeground Coal Combustion/ Troshenkin B.A., Yanko S.V., Troshenkin V.B.//Modern Science:

Researches, Ideas, Results, Technologies. Collection of research papers. – Kyiv: Publishing House of Scientific Production Innovation Company «Triacon», 2012. – № 3(11). – P. 45–49.

5. Дворникова Е.В., Крейнин Е.В. О взаимодействии подземных вод с очагом при подземной газификации углей//РАН СО Физ. -технич. пробл. разработки полезных ископаемых. Горная екология, 1993. – № 5. – С. 73–78.

   Dvornikova E.V., Kreynin E.V. On the Interaction of Groundwater with the Underground Coal Gasification Area//Russian Academy of Sciences Siberian Branch. Phis. -Techn. Probl. of the Development of Mineral Resources. Mountain Ecology, 1993. – № 5. – P. 73–78.

6. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы / Пер. с англ. под ред. И. И. Шевченко. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 588 с. -ISBN 978-5-9221-1121-8.

   C.D. Murray, S.F. Dermott. Solar System Dynamics. – Moscow: Phismathlit, 2009. – 588 pp.

7. Трошенькин Б. А. Возобновляемая энергия. Ч. 2 Термодинамика литосферы. Геотермические электростанции. – Х.: Изд-во «Форт», 2004. – 156 с.

   Troshenkin B.A. Renewable Energy. In 2 parts. –Part II – Thermodynamics of the Lithosphere. Geothermal Power Plants. – National Academy of Sciences of Ukraine. A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems. – Kharkov: Fort Publishers, 2004. – 148 pp.

8. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: Новые факты и проблемы//Соровский образовательный журнал. 1996, – № 9. – С. 79–85.

   Korolev V.A. Bound Water in the Rocks: New Facts and Problems// Soros Educational Magazine. 1996, – № 9. – P. 79–85.

9. Пороло Л.В. Воздушно-газовые подъемники жидкости (эргазлифты). – М.: Машиностроение, 1969. – 160 с.

   Porolo L.V. Air-Gas-Fluid Lifts (Air-Gaslifts). – Moscow: Mashinostroenie, 1969. – 160 pp.

10. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – 492 с.

    Frank-Kamenetsky D.A. Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics. – Moscow: Nauka, 1967. – 492 pp.

Рукопись поступила 19.04.2013 г.