© И.М. Закоршменный,
М.В. Каркашадзе, 2006

УДК 622.278

И.М. Закоршменный, М.В. Каркашадзе

ПАРАМЕТРЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ И СЖИГАНИЯ УГЛЯ

Семинар № 15

Повышение эффективности использования углей как энергетического сырья напрямую связано с разработкой физико-химических геотехнологий, в том числе подземного сжигания углей. В оптимальном варианте эти технологии должны обеспечивать экономическую и экологическую состоятельность.

Экономический анализ результатов работы станций «Подземгаз» показывает, что подземная газификация угля (ПГУ) может стать одним из наиболее экономичных способов энергетического использования угля. Технология подземного сжигания углей (ПСУ) также доказала свою работоспособность для отработки брошенных, некондиционных и забалансовых запасов в пределах горных отводов.

Эффективность технологии ПГУ, основанной на нагнетании воздуха в канал горения, резко падает при нарушении герметичности подземного газогенератора, которое происходит в результате потери устойчивости межканальных целиков. При нарушении герметичности газогенератора предусматривается переход на газификацию следующего угольного блока. По базовой технологии ПГУ оставшийся в недрах уголь не используется и догорает в неуправляемом режиме, так как не может быть газифицирован в режиме нагнетания воздуха поскольку при разру-шении целиков возможна миграция продуктов горения на дневную поверхность.

Для устранения указанных недостатков разработана технологическая схема, представленная на рис. 1, позволяющая реализовать комбинированную технологию подземного сжигания угольных блоков в следующем порядке [1]. Угольный блок (***а***) подготавливается к сжиганию. В процессе подготовки бурят скважины и осуществляют их сбойку, а затем осуществляют газификацию в режиме ПГУ (***б***). Продуктивный газ очищают в скрубберах и затем направляют к потребителю. Газифицированный ранее угольный блок, имеющий магистральные трещины с выходом на дневную поверхность, подготавливают к дожиганию по технологии ПСУ – с отсосом газа из канала горения (***с***). С этой целью устанавливают наземное оборудование (эжекционная установка, теплообменник, очистные аппараты), которое подсоединено к продуктивным скважинам. При этом газ проходит через сухую очистку, теплообменник и далее охлажденный газ сбрасывается в атмосферу.

Отличительной особенностью предлагаемого способа является использование в технологии ПСУ эжекционной установки, создающей депрессию за счет истечения газа камеры сгорания реактивной горелки. В качестве реактивной горелки предлагается использовать авиационный двигатель типа ГТД-350. Такое технологическое решение обеспечивает депрессию, достаточную для извлечения из подземного газогенератора продуктов горения расходом 6,57 кг/с. Преимуществом такого технического решения является также то, что продукты подземного очага горения дожигают в диффузоре эжектора, повышая тем самым

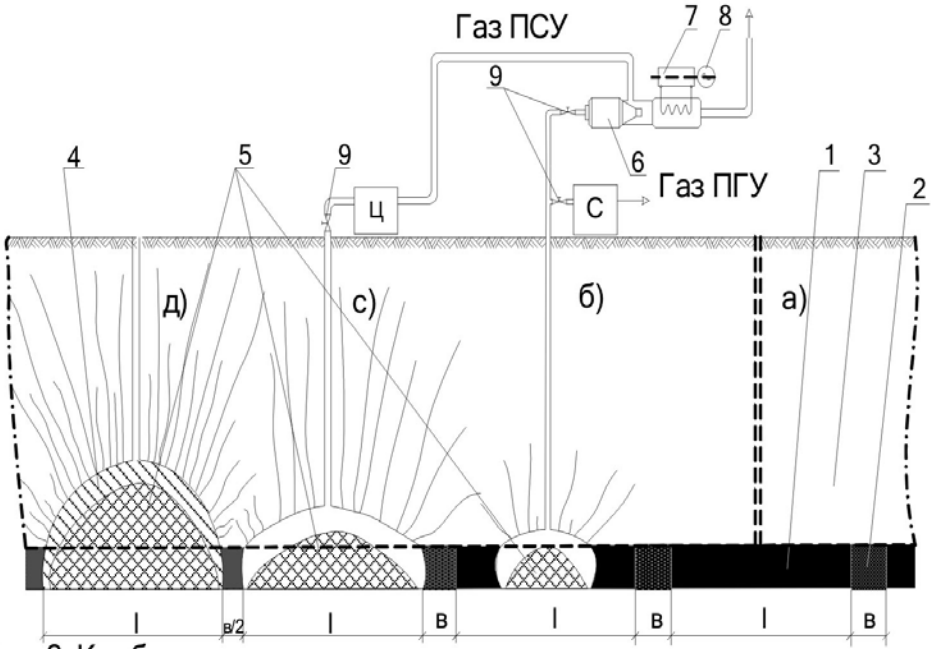

Рис. 1. Комбинированная технология подземного сжигания угольных пластов: *1* – сжигаемый уголь; *2* – угольный целик; *3* – породы кровли; *4* – закладка; *5* – обрушенные породы кровли; *6* – газотурбинная эжекционная установка; *7* – газотурбинный двигатель; *8* – генератор; *9* – регулируемые дросселя

температуру газа. с 300-350 ºС до 1000-1500 ºС. [2]. Сформированный высокотемпературный теплоноситель используют по прямому назначению: для генерации пара для паровых или газовых турбин и нагрева воды. Установлено, что получение электроэнергии при ПСУ может быть обеспечено при температуре шахтного газа 623К с теплотой сгорания более 950 кДж/м^3, и практически при любом составе газа ПСУ при осуществлении мер по повышению температуры продуктивного шахтного газа до 957К [3].

В предложенной технологической схеме используется энергетический резерв технологии ПГУ в виде горючего газа, который сжигают в камере сгорания газотурбинной эжекционной установки (ГТЭУ). Таким образом, разработанная технологическая схема отличается автономностью и для своей работы на стадии ПСУ не требует внешних источников энергии. На стадии ПСУ из подземного газогенератора может быть дополнительно извлечено 30 % тепловой энергии. При этом весьма важным фактором является исключение миграции газа на поверхность. Что касается устойчивости канала горения после завершения ПСУ, то эта задача решается за счет заполнения выгазованного пространства текучей закладкой, предпочтительно водно-песчанно-глинистой (***д***).. Такую закладку подают через скважину в канал горения. Далее закладка за счет текучести заполняет выгазованное пространство, спекается в канале горения и образует устойчивые целики.

Утилизация тепловой энергии угля, оставшегося в целиках и контурах газогенераторов, а также энергии горючих продуктов, образующихся в результате газификации угля (кокса, полукокса), является одним из основных резервов повышения экономических показателей станции ПГУ. Анализ результатов работы

Южно-Абинской станции «Подземгаз» за период с 1955 по 1986 гг. показывает, что оставленные в недрах угольные запасы в количестве 3282 тыс. т почти в 1,5 раза превышают газифицированные (2170 тыс. т) [4]. В связи, с этим проблема доработки оставленных запасов угля является актуальной и требует своего решения. Для определения области эффективного использования предложенной технологической схемы необходимо определить ее параметры.

Расстояние между рядами скважин составляет:

$$l_c = b + l \qquad (1)$$

где b - ширина предельного устойчивого угольного целика, м; l - максимальная ширина канала горения м.

При определении предельной ширины канала горения учитывается множество факторов, в той числе свойства пород кровли, режим подачи окислителя (расход воздуха и содержание кислорода), свойства угольного пласта (мощность, глубина залегания и др.) и ширина целика.

Предельная разрушающая нагрузка на целик определена на основе известного решения [5]:

$$P_{пр} = 2km(1 + 0,5F), \qquad (2)$$

где k - коэффициент сцепления угля, Па F -функция, получаемая в результате численного интегрирования и зависящая от ширины целика в его высоты m и угла внутреннего трения ρ [6].

Представим функцию F в виде параболы с коэффициентами аппроксимации a_0, a_1, a_2:

$$F = a_0 + a_1 \frac{b}{m} + a_2 \left(\frac{b}{m}\right)^2 . \qquad (3)$$

По результатам расчёта коэффициентов аппроксимации, определенных по методу наименьших квадратов имеем:

$$\text{при } \rho = 10^0,$$

$$F = -0,97 - 0,139\frac{b}{m} + 1,55\left(\frac{b}{m}\right)^2$$

$$\text{при } \rho = 20^0,$$

$$F = -0,137 - 3,06\frac{b}{m} + 4,19\left(\frac{b}{m}\right)^2 \qquad (4)$$

$$\text{при } \rho = 30^0,$$

$$F = -8,76 - 22,7\frac{b}{m} + 15,7\left(\frac{b}{m}\right)^2$$

Условие предельного равновесия целика при условии, что горное давление от выгазованного пространства перераспределяется на целик, имеет вид:

$$2km\left(l + 0,5F\right) = q\left(b + l\right) \qquad (5)$$

Воспользовавшись аппроксимирующей зависимостью (3) для функции F, решение уравнения (5) относительно b имеет вид:

$$b = \frac{1 - a_1\frac{k}{q}}{2\frac{a_2 k}{mq}} + \sqrt{\left(\frac{mq}{2a_2 k} - \frac{ma_1}{2a_2}\right)^2 - m^2\left(\frac{2 + a_0}{a_2}\right) + \frac{mq}{a_2 k} l} \qquad (6)$$

Пример расчета. Угольный пласт мощностью m = 2 м находится при начальном горном давлении q = 10 МПа. Механические свойства угольного целика, $\rho = 20^0$, k = 5 МПа. Коэффициенты параболической аппроксимации функции F:

$$a_0 = -0,137, \quad a_1 = -3,06, \quad a_2 = 4,19 .$$

Для этих условий ширина устойчивого целика в зависимости от ширины выработанного пространства представлена на рис. 2. Видно, что с увеличением ширины канала горения возрастает необходимая для устойчивости ширина целика.

Для определения максимальной ширины канала горения воспользуемся предпо-

ложением, что этот процесс резко ухудшается или прекращается в том случае, если объем разрушения V_p превысит объем V_c выгоревшего пространства, т.е. при

$$V_p \geq V_c \,. \qquad (7)$$

Для оценки объема возможного вывала воспользуемся методом упругого наложения, в соответствии с которым напряжения в породном массиве сопоставляют с его прочностными характеристиками. Для расчета объема возможного вывала воспользуемся гипотезой профессора М.М. Протодьяконова, по которой утверждается параболическая форма вывала, определяемая по формуле:

$$V_p = \frac{4}{3} f h_в^2 \text{, м}^3\text{/м}, \qquad (8)$$

где f – коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова; $h_в$ – высота возможного вывала в центре пролета кровли, м.

Механизм разрушения кровли определяется взаимодействием термических и механических напряжений. Термические σ_x^T, а также механические напряжения σ_x^M, являются сжимающими. Эти напряжения действуют в направлении, параллельном свободной поверхности кровли. По мере расширения канала горения напряжение σ_x^M уменьшается, а σ_x^T - возрастает. С другой стороны, термические σ_y^T и механические σ_y^M напряжения, ориентированные перпендикулярно свободной поверхности, принимают противоположные по знаку значения. Напряжения σ_y^T - растягивающие, имеют максимум на некоторой глубине, затем уменьшаются до нуля. Напротив, сжимающие напряжения σ_y^M - монотонно увеличиваются от нуля на свободной поверхности до величины горного давления q на бесконечности.

Используя метод суперпозиции напряжений, выполнена оценка величины нарушенной зоны в кровле. Сущность метода заключается в сопоставлении напряжений в массиве с законом распределения в нем прочностных свойств. При этом области возможного разрушения определяются из условия предельного равновесия, описываемого огибающей кругов Мора. После определения суперпозиции главных термических и механических напряжений условие предельного равновесия в соответствии с критерием Кулона-Навье формулируется в виде:

$$\sigma_z^T - \left(1 + \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}\right)\sigma_y^T + \left(\sigma_x^M - \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}\sigma_y^M\right) = \sigma_{сж} \qquad (9)$$

где σ_p и $\sigma_{сж}$ - пределы прочности породы на растяжение и сжатие, Па; σ_y^T - термические напряжения [7]

$$\sigma_y^T = -\frac{2E\alpha}{1-\upsilon}\cdot\frac{aT_ф y}{\pi}\times \qquad (10)$$

$$\times\int_0^t \frac{\frac{V}{2a}\left[(Vt)^2 + y^2\right] + 2Vt}{\left[(Vt)^2 + y^2\right]^2}\exp\left[-\frac{(Vt)^2 + y^2}{4at}\right]dt$$

$$\sigma_z^T = \frac{E\alpha}{1-\upsilon}\cdot\left[T(0,y,t) - T(0,y,0)\right], \qquad (11)$$

где υ и E – модуль Юнга и коэффициент Пуассона породы; α – коэффициент линейного теплового расширения, I/K; a – температуропроводность породы, м^2/сут.; $T_ф$ – температура в очаге горения, ^{0}C; y – координата, м; $T(0,y,0)$ - начальная температура кровли, ^{0}C; $T(0,y,t)$ - распределение температуры, ^{0}C;

$$T(0,y,t) = \\ = T_ф\frac{y}{\pi}\int_{-vt}^{+vt}\exp\left[-\frac{\varphi^2 + y^2}{4at}\right]\cdot\frac{d\varphi}{\varphi^2 + y^2} \qquad (12)$$

где V – скорость расширения канала горения, м/сут; t – время, сут.

В результате анализа уравнения (9) установлено, что механические напряжения неоднозначно влияют на устойчивость кровли. Непосредственно на поверхности кровли они способствуют процессу разрушения, а на удалении от поверхности кровли сжимающие механические напряжения σ_y^M компенсируют растягивающие термические напряжения, σ_y^T и таким образом препятствуют процессу разрушения.

При $f \cdot h_в > V \cdot t$, объем вывала также имеет параболическое очертание, вписывающиеся в ширину канала горения. В этом случае объем возможного вывала определяется по формуле:

$$V_p = \frac{4}{3} h_в V t \qquad (13)$$

Высота вывала $h_в$ определяется из решения уравнения (9).

Момент окончания процесса подземного сжигания угольного пласта определяет условие, что этот процесс прекращается в момент времени t^*, когда объем вывалов кровли заполнит объем выгазованного пространства, т. е.

$$V_p = \frac{\pi m^2}{4} + 2mVt^* \qquad (14)$$

Правая часть уравнения (14) представляет собой объем выгазованного пространства при сжигании угольного пласта мощностью m со скоростью расширения канала V. Средняя по длине канала горения скорость его расширения может быть определена на основе расчета состава газа и интенсивности процесса газификации [8], а процесс сжигания – корректироваться по данным анализа состава газа и интенсивности подачи воздуха.

Имея ширину предельно устойчивого межканального целика и поперечные размеры газогенератора, можно оценить полноту извлечения угля, полагая, что при разрушении такого целика под действием горного давления происходит нарушение герметичности, и прекращается извлечение продуктивного газа в режиме нагнетания. Функция, которая характеризует полноту извлечения угля, имеет вид:

$$\beta = \left(1 - \frac{b}{l_c}\right) 100\% \qquad (15)$$

Например, на Южно-Абинской станции "Подземгаз" при газификации угольного блока на пласте ″У-Внут-ренний, как показали выполненные расчеты, объем выгазованного пространства превышает максимальные объемы возможного обрушения, т.е. заполнения канала горения породами кровли не происходит. Поперечное расстояние между скважинами составляет l_c = 20 м. Используя уравнение (5), с заменой $l = l_c - b$, вычислим ширину предельно устойчивого целика. При m= = 7 м, $\rho^0 = 20^0$, $a_0 = -0{,}13$, $a_1 = -3{,}06$, $a_2 = 4{,}1$, k = 5 МПа, q = 2,0 МПа, l = 20 м имеем b = 6,44 м. Таким образом, при ширине канала, превышающего l > 20 - 6,44 = 13,56 м, целик теряет устойчивость, вследствие чего нарушается герметичность подземного очага горения. В рассматриваемом примере полнота извлечения угля в газогенераторе не превышает 67,8 %.

Оставшийся в недрах уголь, после газификации постепенно догорает за счет естественной тяги или прекращает гореть при заполнении его подземными водами. С экологической точки зрения такая ситуация совершенно недопустима. Как отмечалось выше, при использовании комбинированной технологии указанный недостаток исключается, т.к. оставшийся уголь целенаправленно дожигают. Имеется возможность дожечь 32,2 % угля от запасов газогенератора, что составляет при расстоянии между скважинами по восстанию 100 м около 6,0 тыс. т угля.

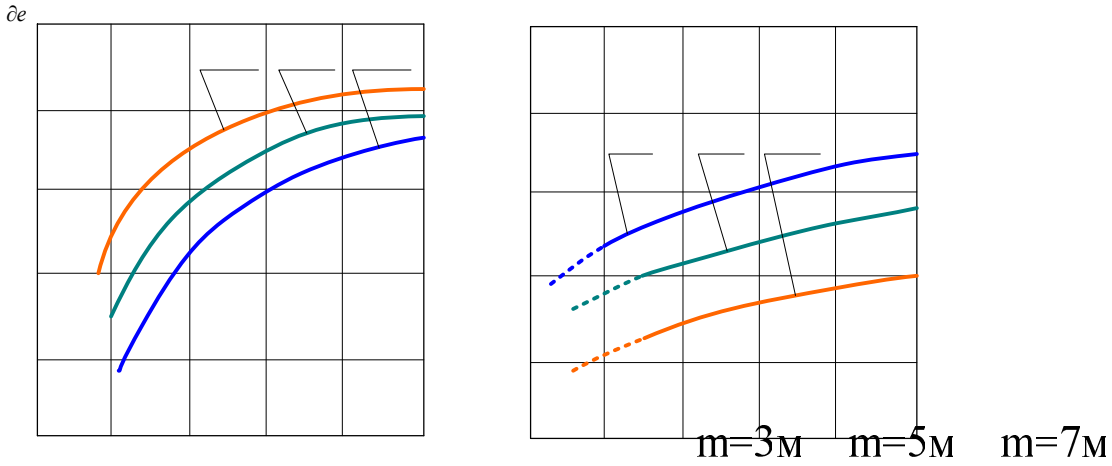

Рис. 2.

Анализ зависимостей полноты извлечения угля и ширины целика, представленный на рис. 2, показывает, что с увеличением расстояния между скважинами возрастает полнота извлечения угля.

Расход воздуха проходящего через канал горения зависит от мощности N эжекционной установки, ее КПД η_0, плотности газа ρ_0 перед входом в эжектор и полного аэродинамического сопротивления ΔP, включая скважины и канал горения

$$G_в = \eta_0 \frac{N}{\Delta P} \rho_0 . \qquad (16)$$

Управляющим фактором является мощность эжектора, регулируя которую можно изменять тепловую мощность продуктов горения.

Анализ результатов расчетов позволил установить, что аэродинамическое сопротивление применяемых продуктивных скважин диаметром 250 мм весьма велико и составляет около 80-85 % от сопротивления сети без учета аэродинамического сопротивления воздухоподающих скважин. Сопротивление воздухоподающих скважин может быть компенсировано с помощью компрессора, однако это требует дополнительной энергии и этот режим должен определяться с учетом ожидаемого эффекта.

Таким образом, предлагаемая технология ПГУ-ПСУ с применением эжекционной установки создает ряд новых преимуществ, позволяющих осуществить более полное и рациональное использование энергии подземного очага горения при недопущении миграции продуктов горения на дневную поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Закоршменный И.М., Селиванов Г.И.* Комбинированный способ отработки подземных газогенераторов// Интенсивная и безопасная технология разработки угольных и сланцевых месторождений/ Всес. научн. конф.: Тез. докл. - М., 1989. - С. 7.

2. *Закоршменный И.М., Ярунин С.А., Каркашадзе М.В., Савельев В.М.* Технологическая схема подземного сжигания угля на базе эжекционной установки. - М.: МГГУ, ГИАБ, 1998, №3. - С.23-26.

Рис. 3. Зависимость полноты извлечения расстояния между скважинами а, в q = 2МПа,

3. *Закоршменный И.М.* Определение условий использования технологии термохимической переработки оставленных запасов угля. - М.: МГГУ, ГИАБ,2003, № 3. - С. 102.

4. *Селиванов Г.И., Закоршменный И.М., Янченко Г.А.* Анализ запасов в отработанных газогенераторах Южно-Абинской станции «Подземгаз» применительно к их отработке методом подземного сжигания // Защита окружающей среды при разработке угольных месторождений: Сборник статей.- Караганда: Карагандинское обл. правление Союза научн. и инж. обществ СССР, 1991. - С. 30-32.

5. *Рупенейт К.В., Либерман Ю.М.* Введение в механику горных пород. - М:Горгостехиздат,1960. - С.36-40

6. *Баклашов И.В., Картозия Б.А.* Механические процессы в породных массивах: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1986. – 274 с.

7. *Каркашадзе М.В.* Термонапряженное состояние пород кровли при сжигании угля в скважине. В сб.: Проблемы физичебских процессов в горном деле. - М.: МГИ, 1988. - С.81-84.

8. *Крейнин Е.В.* Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье. - М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. - 302 с.

Коротко об авторах

Закоршменный И.М. – декан факультета заочного обучения, доцент, кандидат технических наук,

Каркашадзе М.В.– доцент, кандидат технических наук,

кафедра «Подземная разработка пластовых месторождений», Московский государственный горный университет.

Р У К О П И С И ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

1. *Кононенко Е.А., Радченко С.А.* Аспекты устойчивости отвального сооружения при размещении гидроотвала на насыпном основании (460/06-06 — 15.03.06) 6 с.
2. *Мартынов В.П.* Кавитационно-волновая технология скважинной обработки нефтяного пласта (461/06-06 — 23.03.06) 14 с.
3. *Руденко В.В.*, *Ахмедов А.М.* Квалиметрическая оценка полноты и качества извлечения запасов медно-молибденовых руд при их открытой разработке (462/06-06 — 24.03.06) 9 с.
4. *Руденко В.В.*, *Ахмедов А.М.* Стоимостная оценка полноты и качества извлечения 1 т балансовых запасов медно-молибденовых руд при их открытой разработке месторо-ждений «Эрдэнэтийн-Овоо» (463/06-06 — 24.03.06) 17 с.