

С.П.ВЫСОЦКИЙ, Е.А.ВОРОБЬЕВ, Н.А.НИКОЛЕНКО (АДИ ДонНТУ),
К.К.СОФИЙСКИЙ (ИГТМ НАН УКРАИНЫ)

СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ МЕТАНА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Украина ежегодно потребляет 75-80 млрд. м³ природного газа, в т.ч. 25-30% при использовании собственных ресурсов. Одним из путей решения проблемы дефицита в энергетическом сырье является создание новых технологий интенсификации добычи метана и рационального использования метановоздушных смесей низкой концентрации, в т.ч. отработанного вентиляционного воздуха шахт.

Природная газоносность угольных пластов Донбасса на глубинах 300-400 м от границы метановой зоны изменяется от 14 до 25 м³/т горной массы, на глубине 800-900 м – от 20 до 27 м³/т горной массы, а на глубинах свыше 1000 м – уже от 17 до 35 м³/т горной массы.

Угольные залежи Украины содержат в себе около 3 триллионов кубометров шахтного газа – метана. Ежегодно большинством шахт Донецкого угольного бассейна вентиляцией и дегазацией выбрасывается свыше 2,0 миллиардов кубометров метана. Только небольшая часть этого газа с содержанием более 30% метана используется в котельных и для других потребностей. Остальная часть метана не используется по условиям взрывобезопасности и выбрасывается в атмосферу, загрязняя последнюю.

Под воздействием выбросов метана в комплексе с другими веществами происходит изменение состава, состояния и свойств атмосферы, в частности, разрушение озонового слоя и создание условий для возникновения парникового эффекта.

Сбрасываемый в атмосферу метан и выдаваемый дегазационными установками представляет значительный интерес с точки зрения получения тепловой и электрической энергии, снижения себестоимости угля и как следствие повышения конкурентоспособности угольных предприятий.

На основании проведенных исследований, в т.ч. специалистами АДИ ДонНТУ, разработано технологическое предложение по созданию новой технологии интенсификации добычи метана на базе гидродинамического способа, обеспечивающего количество и концентрацию дебита метана из скважин более, чем в 10 раз выше, чем при существующих технологиях. Кроме того, на базе использования способа мембраной сепарации обоснована возможность разработки технологии концентрации метановоздушной смеси (отработанного вентиляционного воздуха), пригодной для когенерации электроэнергии.

Интенсификация добычи метана способом гидродинамического воздействия предполагает нарушение механического и газового равновесия в системе «скважина - угольный пласт» путем осуществления циклического знакопеременного изменения давления в небольшом диапазоне его перепадов от 2 до 4 МПа, используя при этом как природные, так и техногенные факторы развязывания гидродинамических явлений. /1/.

Для разрушения околоскважинной части пласта необходимо создать в ней градиент давления, направленный в сторону скважины и достаточный для преодоления сил сцепления угля, т.е. необходимо резко сбросить давление. Но так как уголь – пористый материал, то по мере уменьшения давления на стенках скважины будет уменьшаться давление и в самом угле за счет фильтрации, происходящей со скоростью

$$v = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\delta \cdot P}{\delta \cdot r}, \quad (1)$$

где k – коэффициент проницаемости, м^2 ;

μ – вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

$\frac{\delta \cdot P}{\delta \cdot r}$ – градиент падения давления, $\text{Па}/\text{м}$.

После закачки жидкости в пласт на некоторую глубину b производится сброс давления с $P_{\text{п}}$ (давления подачи) до $P_{\text{с}}$ (давления сброса). Оценим характерное время обратной фильтрации жидкости из пласта, при $b \sim 0,02$ м, $P_{\text{п}} \sim 4-7$ МПа, $P_{\text{с}} \sim 1-2$ МПа, $\mu = 10^{-3}$ $\text{Па}\cdot\text{с}$, $k = 10^{-14}$ м^2 ,

$$t_{\phi} \approx \frac{b}{v} \approx 1 \div 10 \text{с}$$

Время сброса $t_{\text{с}}$ давления от $P_{\text{п}}$ до $P_{\text{с}}$ должно быть существенно меньше времени обратной фильтрации.

Рассмотрим условия разрушения слоя угля толщиной b под воздействием возникающего перепада давления.

Созданный градиент давления придает жидкости некоторую скорость v . Жидкость, двигаясь в поровом пространстве угля, увлекает за собой последний в сторону скважины за счет сил вязкого трения:

$$F_v = \frac{\mu \cdot m}{k} \cdot v \cdot V, \quad (2)$$

m – пористость угля, V – объем слоя угля, заполненного движущейся жидкостью, м^3 ;

$$V \approx \pi \cdot h \left[(r_c + b)^2 - r_c^2 \right], \quad (3)$$

где r_c – радиус скважины, м; h – мощность пласта, м;

Отрыву слоя силами F_v препятствует сила F_{σ} сцепления этого слоя с угольным пластом.

$$F_{\sigma} \approx 2 \cdot \pi \cdot (r_c + b) \cdot h \cdot \sigma_p \quad (4)$$

где σ_p – прочность угля на разрыв.

Таким образом, для отторжения слоя угля толщиной b необходимо выполнение условия:

$$F_v \succ F_\sigma \quad (5)$$

Силами трения слоя с боковыми породами пренебрегаем ввиду малости b . Подставляем (1), (2), (4) в (5), получаем условие отрыва:

$$\Delta P \succ \left(1 + \frac{1}{2 \cdot r_c / b + 1}\right) \cdot \frac{\sigma_p}{m} \quad (6)$$

При прочности угля на разрыв порядка 0,1 МПа и пористости $m = 0,05$ необходимо создать разность давлений $\Delta P \sim 2$ МПа.

Однако, этого еще не достаточно для обеспечения отрыва слоя угля. Необходимо выполнение энергетического условия, а именно, чтобы работа сил вязкого трения превышала работу, необходимую для создания новых поверхностей, образующихся при отрыве слоя угля.

$$A_v \succ A_s \quad (7)$$

Имеем:

$$A_v = F_v \cdot U \cdot t_c \quad (8)$$

$$A_s = 2g_s S \quad (9)$$

где g_s – эффективная поверхностная энергия (для углей $g_s \sim 10$ Па·м);
 $2S$ – вновь образуемая поверхность, м ($S = 2 \cdot \pi(r_c + b)h$).

Подставляя (8), (9) в 7, получаем

$$\Delta P^2 \cdot t_c \succ \frac{4\mu g_c}{km} \cdot \frac{b(r_c + b)}{2r_c + b} \quad (10)$$

Из (10) оценим время сброса

$$t_c > 0,01 \text{ с} \quad (11)$$

Минимальная величина давления P_c определяется из требования:

$$r \cdot L^{xp} = r \cdot L^{nl} \quad (12)$$

$$r \cdot L^{nl} = \left\{ \frac{P_L + \sigma_{сж}^0 / (A-1)}{P + \sigma_{сж}^0 / (A-1)} \right\}^{\frac{1}{A-1}} \quad (13)$$

$$r \cdot L^{xp} = \left\{ \frac{P_L}{P} \right\}^{\frac{1}{A-1}} \quad (14)$$

где $r \cdot L^{nl}$, $r \cdot L^{xp}$ – радиусы зоны неупругих деформаций (пластичный и хрупкий материалы)

$$P_c = P_L \frac{P_0(A-1) + \sigma_{сж}^0}{P_L(A-1) + \sigma_{сж}^0} \quad (15)$$

где P_0 – давление в скважине до гидродинамического воздействия.

Итак, получено что для инициирования разрушения прискважинной области необходимо сбросить давление в жидкости на $\Delta P \sim 2-5$ МПа за время сброс $t_c \sim 0,01-0,1$ с.

При невыполнении условия (7) разрушение прискважинной области произойдет после $N = [A_v / A_s]$ циклов, где $[]$ - обозначают целую часть заключенного в скобках выражения.

Подставляя (8), (9), имеем

$$N = \frac{4\mu g_s}{\Delta P^2 \cdot t_c km} \cdot \frac{b(r_c + b)}{2r_c + b} \quad (16)$$

Таким образом, мы инициировали разрушение прискважинной части угольного пласта. Из разрушенной части угля выделился газ, находящийся в сорбированном состоянии.

Быстрая десорбция газа обуславливает его высокое давление на выходе из скважины, что позволяет проводить отбор газа без применения вакуумной установки и высокую концентрацию добываемого из скважин метана до 95%.

Способ гидродинамического воздействия был широко опробован как противовыбросное мероприятие перед вскрытием выбросоопасных угольных пластов. /2/ Полученные статистические данные позволяют утверждать о высокой эффективности его использования для дегазации угольных пластов с целью добычи высококачественного угольного метана. Одним из основных аргументов в пользу использования гидродинамического воздействия для добычи газа является весьма значительное повышение средней скорости газовыделения, данные о котором представлены в таблице 1.

Таблица 1 Повышение скорости газовыделения при гидродинамическом воздействии на угольные пласты шахт ЦРД

Пласты	Природн. газоносн. м ³ /т	Время гидродинамического воздействия, час.	Количество добытого угля, т	Начальная скорость газовыделения, м ³ /час.	Количество выдел. газа, м ³	Средняя скорость газовыделения, м ³ /час.
m ₅ - Куцый	18,5	17,0	20	0,070	4000	235
m ₃ - Толстый	17,0	21,5	14	0,039	3000	140
k ₅ - Подпяток	15,0	20,5	16	0,042	2500	121
Г ₄ ^h - Девятка	25,0	9,6	14	0,090	5000	521
m ₃ - Толстый	17,0	19,0	24	0,076	3200	168
m ₃ - Толстый	17,0	11,0	14	0,076	2500	227
m ₃ - Толстый	19,0	13,0	16	0,074	4000	307
l ₁ - Мазур	20,0	18,0	39	0,130	5500	306
m ₃ - Толстый	21,0	8,0	15	0,112	3000	375
l ₄ - Девятка	25,0	12,0	20	0,100	5000	416
l ₇ ^b - Пугачевка	22,0	20,0	17	0,048	6000	300
k ₅ - Пята	12,0	26,0	15	0,034	2000	77

Сравнение средней скорости газовыделения с начальной, которая не превышает 0,27 м³/час, показывает, что её увеличение достигает 1000 раз.

Применение гидродинамического воздействия для дегазации угольных пластов возможно как через скважины, пробуренные из забоя с отбором газа дегазационной системой, так и из пробуренных с поверхности. Способ решает обе проблемы дегазации: значительное увеличение фильтрационного объема массива (пористость в зоне влияния скважины составляет от 16 до 24 %) а также повышения объемов десорбции газа вследствие нарушения механического и газового равновесия в системе «скважина – пласт» и образования обширной поверхности обнажения в результате разрушения угля внутри массива.

Сущность технологии отделения газа метана из отработанного воздуха шахт заключается в применении способа мембранной сепарации. Мембраны имеют высокую проницаемость по отношению к метану и сравнительно низкую проницаемость в отношении кислорода и азота. Движущей силой процесса является разница парциальных давлений между пермиатом и концентратом. Во время процесса отделения концентрат обогащается метаном со стороны пермиата. /3/

Утилизация метана, полученного из вентиляционного воздуха и дегазационных скважин с низкой концентрацией метана позволит уменьшить возможность загрязнения атмосферы, а также обеспечить значительный экономический эффект за счет когенерации электрической энергии на изотурбинном или дизельногенераторном оборудовании.

В 2001 году добыто 80 млн. тонн угля, при этом расход электроэнергии составил 8 млрд. квт.часов, т.е. в среднем 100 квт.часов на одну тонну добычи угля. А в Центральном районе Донбасса расход электроэнергии составляет 350 квт.час на одну тонну угля.

Реализация новых технологий, по результатам проведенных исследований позволит получить 4 млрд. м³ газа метана высокой концентрации. Использование этого количества газа позволит выработать методом когенерации 12 млрд. квт.часов электроэнергии.

Эта электроэнергия будет выработана на территории шахт; в результате сократятся расходы на ее транспортировку с ТЭЦ и создадутся условия для создания дополнительных рабочих мест, дефицит которых имеется в городах угольных регионов.

На основании опытных данных затраты на приобретение и эксплуатацию оборудования для производства электроэнергии составляют в среднем около 50% от стоимости выработанной электроэнергии. Реализация предлагаемых новых технологий позволит исключить затраты шахт на оплату за электроэнергию и получить экономический эффект около одного миллиарда гривен в год.

Библиографический список

1. **К.К.Софийский, Е.А.Воробйов и др.** Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля. - Москва: «Недра», 1994 г.
2. **Е.А.Воробйов, К.К.Софийский и др.** Перспективы добычи угольного метана с применением гидродинамического воздействия. – Материалы научно-практической конференции “Донбас – 2020: наука і техніка – виробництву”. – Донецк, ДонНТУ, 2002 г.
3. **D.Breihofe, A.Mielenz, O.Rentz.** Emission control of SO_2 , NO_x and VOC at stationary sources in the federal republic of Germany. – Karlsruhe, November, 1991