

Е.В. Семененко, И.Л. Дякун

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УТИЛИЗАЦИИ ШАХТНОГО МЕТАНА

Предложена методика расчета схемы утилизации шахтного метана, основанная на балансовых уравнениях расходов метановоздушной смеси и чистого метана, при работе газопоршневой установки с регулированием подачи атмосферного воздуха или природного газа с целью обеспечения параметров метановоздушной смеси, оговоренных правилами безопасности.

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ УТИЛІЗАЦІЇ ШАХТНОГО МЕТАНУ

Запропоновано методику розрахунку схеми утилізації шахтного метану, яка базується на балансових рівняннях витрат метаноповітряної суміші і чистого метану, при роботі газопоршнєвої установки з регулюванням подачі атмосферного повітря або природного газу з метою забезпечення параметрів метаноповітряної суміші, обумовлених правилами безпеки.

ENERGY SAVING TECHNOLOGY OF COALMINE METHANE UTILIZATION

The design procedure of scheme of coal mine methane utilization is offered, which is based on the balance equations of methane-air mixture and pure methane consumption, for gas-piston plant with regulation of free air or rock gas delivery in order to ensure the methane-air mixture parameters stipulated by safety regulations.

В настоящее время все выдаваемое на поверхность метановоздушные смеси (МВС) сводятся в единую систему со средней концентрацией около 17%, с последующим обогащением метаном от поверхностных дегазационных скважин или магистрального газопровода до требуемой концентрации. МВС с концентрацией меньше 2,5% большинство угледобывающих предприятий Центрального Донбасса не утилизируют, выбрасывая в атмосферу, что приводит к потере потенциального теплоносителя, парниковому эффекту и потере потенциальных квот, получаемых шахтой за снижение экологического и экономического эффекта.

Решением данной проблемы является создание на базе угледобывающих пред-

приятий со значительными промышленными запасами угля и шахтного метана шахтных энергокомплексов, использующих когенерационные технологии. Кроме того, подобные энергокомплексы обеспечивают сокращение потребления для этих целей импортного природного газа, уменьшение вредных выбросов метана в атмосферу и получение шахтами дополнительного финансирования за продажу квот на выбросы по Киотскому протоколу. Серьезную проблему представляют сложности, связанные с недостаточной концентрацией МВС. Обогащение шахтного метана на основе физических и термодинамических эффектов является, безусловно, весьма актуальным, однако, существующие способы обогащения метана, такие

как абсорбционный, мембранный, газогидратный и др. [1, 2] не подходят для этих целей, так как их применение требует сжатия МВС по крайней мере до 1 МПа, что недопустимо по условиям взрывоопасности МВС в указанном диапазоне концентраций метана, от 2,5 до 25% по требованиям правил безопасности.

Идея технологии позволяющей утилизировать МВС различной концентрации в энергетических модулях на базе газопоршневой когенерации была предложена лауреатом Государственной премии Украины в отрасли науки и техники, заведующим отделом проблем шахтных энергетических комплексов ИГТМ НАН Украины, канд. техн. наук И.Ф. Чемерисом [3-7, 9-10]. Дальнейшее развитие данной технологии требует обоснования рациональных параметров и оценки величин концентраций и расходов МВС в энергетических комплексах.

Целью статьи является – обоснование технологии рационального использования угольного метана в энергетических модулях на базе газопоршневой когенерации.

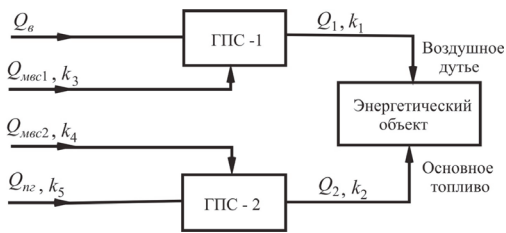


Рис. 1. Технологическая схема установки для утилизации шахтного метана в энергетических объектах

Утилизация шахтного метана в энергетических объектах может быть осуществлена путем использования в качестве воздушного дутья части шахтной вентиляционной струи, обогащенной МВС до допустимой концентрации метана $k_1 \leq 0,025$ (рис. 1). При газопоршневой когенерации оставшая часть МВС, обогащенная, при необходимости, природным газом до ми-

нимальной концентрации метана $k_2 \geq 0,3$, подается в качестве основного топлива. При паротурбинной когенерации по каналу основного топлива может подаваться как низкосортный уголь, так и шахтный метан. При отсутствии вентиляционной струи по каналу воздушного дутья подается атмосферный воздух, обогащенный шахтным метаном до допустимой концентрации.

Атмосферный воздух $Q_в$ поступает на газоприготовительную станцию ГПС-1, на второй вход которой от вакуум-насосной станции подается часть МВС $Q_{мвс1}$ с концентрацией метана k_3 . На выходе ГПС-1 формируется МВС с расходом Q_1 и предельно допустимой концентрацией метана $k_1 \leq 0,025$, которая используется в качестве воздушного дутья энергетического объекта. Часть метановоздушной струи от вакуум-насосной станции $Q_{мвс2}$ с концентрацией метана k_4 поступает на газоприготовительную станцию ГПС-2, на второй вход которой подается природный газ с расходом $Q_{пг}$ и концентрацией k_5 для обогащения подаваемой в качестве основного топлива МВС с расходом Q_2 до минимальной концентрации $k_2 \geq 0,3$.

При этом мощность на выходе энергетического объекта будет складываться из мощности, реализуемой по каналу воздушного дутья, и мощности, реализуемой по каналу основного топлива [3-11]:

$$P = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) Q_{нз}^p \eta_э ; \quad (1)$$

$$Q_{нз}^p = 0,01 [Q_{H_2S} H_2S + Q_{CO} CO + Q_{H_2} H_2 + \sum (Q_{C_m H_n} C_m H_n)] , \quad (2)$$

где Q_1 и k_1 – объем и концентрация метановоздушной смеси по каналу воздушного дутья;

Q_2 и k_2 – объем и концентрация метановоздушной смеси по каналу основного

топлива;

η_{ε} – КПД энергетического объекта;

$Q_{H_2}^p$ – низшая теплота сгорания газообразного топлива;

Q_{H_2S} , Q_{CO} и т. д. – теплота сгорания отдельных составляющих, входящих в состав газообразного топлива.

Теоретический объем воздуха, необходимого для сжигания метана в энергетическом объекте, определяется как

$$V^0 = V_2^0(Q_1 k_1 + Q_2 k_2); \quad (3)$$

$$V_2^0 = 0,0476 \left[\sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S - O_2 \right]. \quad (4)$$

где V_2^0 – удельный объемный расход воздуха для сжигания газообразного топлива.

Таким образом, с учетом (3) и (1), объем воздуха, необходимый для сжигания метана в энергетическом объекте, оценивается как

$$V^0 = \frac{PV_2^0}{Q_{H_2}^p \eta_{\varepsilon}}. \quad (5)$$

Объемы МВС, подаваемые в энергетический объект по каналам воздушного дутья Q_1 и основного топлива Q_2 , находятся из решения системы уравнений

$$(1 - k_1)Q_1 + (1 - k_2)Q_2 = \alpha V^0; \quad (6)$$

$$k_1 Q_1 + k_2 Q_2 = \frac{V^0}{V_2^0}, \quad (7)$$

где α – коэффициент избытка воздуха.

Величина α для газопоршневых установок представляет отношение фактически поданного воздуха для сжигания топлива к количеству воздуха, необходимого для стехиометрической смеси. Решающее значение для выбора α имеют как оптимальное значение удельного расхода топлива, так и растущая с увеличением α детонационная стойкость и меньшая тепловая на-

грузка на двигатель по сравнению с эксплуатацией при $\alpha = 1$. Введенные в последнее время более жесткие требования к ограничению вредных выбросов обуславливают работу газопоршневых установок в диапазоне, составляющем для газопоршневых установок $\alpha = 1,6 - 1,9$ [3-10].

При утилизации шахтного метана в котельной фактически поданное количество воздуха для сжигания топлива равняется количеству воздуха, необходимого для образования стехиометрической смеси, то есть при сжигании топлива обеспечивается значение $\alpha = 1$. Для котельных понятие коэффициент избытка воздуха α относится к соотношению объема газов, уходящих в дымовую трубу, к объему воздуха, поданного в топку котла. Этот избыток обусловлен присосами наружного воздуха как в топку, так и по каналу дымовых газов и определяется конструктивными особенностями упомянутых устройств.

Решение системы уравнений (6) и (7), при условии, что $k_1 \ll k_2$, можно записать в следующем виде:

$$Q_1 = \frac{k_2 - 1}{k_0} \frac{V^0}{k_2 - k_1 V_2^0};$$

$$Q_2 = \frac{1 - k_1}{k_0} \frac{V^0}{k_2 - k_1 V_2^0};$$

$$k_0 = \frac{1}{1 + \alpha V_2^0}.$$

Для определения потоков МВС через газоприготовительную станцию ГПС-1 составим систему балансовых уравнений по расходам МВС и метана

$$k_3 Q_{MBC1} = k_1 Q_1;$$

$$Q_{\varepsilon} + Q_{MBC1} = Q_1,$$

решение которой, позволяет оценить необходимый расход атмосферного воздуха и МВС от вакуум-насосной станции:

$$Q_6 = Q_1 \frac{k_3 - k_1}{k_3};$$

$$Q_{мвс1} = Q_1 \frac{k_1}{k_3}.$$

Для оценки потоков МВС через газо-приготовительную станцию ГПС-2 составим систему балансовых уравнений

$$k_4 Q_{мвс2} + k_5 Q_{пг} = k_2 Q_2;$$

$$Q_{мвс2} + Q_{пг} = Q_2$$

решение которой, позволяет оценить необходимый расход природного газа и МВС

$$Q_{мвс} = \frac{\left(1 - \frac{k_1}{k_0}\right)(k_5 - k_2)k_3 + \left(\frac{k_2}{k_0} - 1\right)(k_5 - k_4)k_1}{(k_2 - k_1)k_3(k_5 - k_4)} \frac{V_0^0}{V_2^0}.$$

Характерным для работы шахтных энергетических объектов, утилизирующих шахтный метан, являются колебания концентрации МВС k_2 , подаваемой по каналу основного топлива. Определим возможности стабилизации тепловой и электрической мощности энергетических объектов за счет подаваемого по каналу воздушного дутья при изменении концентрации МВС k_2 , подаваемой по каналу основного топлива путем обогащения метаном воздуха.

от вакуум-насосной станции:

$$Q_{мвс2} = \frac{k_5 - k_2}{k_5 - k_4} Q_2;$$

$$Q_{пг} = \frac{k_2 - k_4}{k_5 - k_4} Q_2.$$

Общий расход МВС от вакуум-насосной станции $Q_{мвс}$ определится как сумма $Q_{мвс1}$ и $Q_{мвс2}$, и рассчитывается по формуле:

Расчет выполним для парового котла с $\alpha = 1,0$ и для газопоршневого двигателя с $\alpha = 1,7$. Исходные данные для расчета: $P = 6,5$ Гкал/ч; $V_0 = 8013$ м³/ч; $V_2^0 = 9,64$ м³/м³; $Q_{пг}^p = 8689$ ккал/м³. Концентрация МВС по каналу воздушного дутья меняется в пределах от $k_1 = 0,0$ до допустимого значения $k_1 = 0,025$. Данные расчета сведены в табл. 1.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ПО КАНАЛУ ВОЗДУШНОГО ДУТЬЯ НА МИНИМАЛЬНУЮ КОНЦЕНТРАЦИЮ ПО КАНАЛУ ОСНОВНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Таблица 1

	$\alpha_1 = 1,0 (Q_1 = 6\ 766 \text{ м}^3/\text{ч})$						$\alpha_2 = 1,7 (Q_1 = 12562 \text{ м}^3/\text{ч})$					
k_1	0,0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025
k_2	0,4	0,384	0,367	0,351	0,335	0,319	0,4	0,38	0,35	0,32	0,28	0,25

Из данных табл. 1 следует вывод о существенном влиянии концентрации метана k_1 на минимально допустимую концентрацию k_2 по каналу основного топлива

при постоянстве выходной мощности. Для парового котла с $\alpha = 1,0$ при изменении k_1 от $k_1 = 0,0$ до $k_1 = 0,025$ минимальная допустимая величина k_2 изменяется от

$k_2 = 0,4$ до $k_2 = 0,319$ или на 20,5%. Для газопоршневого двигателя с $\alpha = 2,0$ при изменении k_1 от $k_1 = 0,0$ до $k_1 = 0,025$ минимальная допустимая величина k_2 изменяется от $k_2 = 0,4$ до $k_2 = 0,25$ или на 38%, то есть почти вдвое.

Рассмотрим влияние концентрации метана k_1 по каналу воздушного дутья на расходы МВС Q_1 и Q_2 , а также расход и стоимость природного газа Q_{nc} на обогащение при различных значениях заданной концентрации метана k_2 по каналу основного топлива и коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1,0$ (паровой котел) и $\alpha = 1,7$ (газопоршневой двигатель). Отметим, что наличие природного газа на площадке энергетического объекта всегда целесообразно для стабилизации выдаваемых потребителю от энергетического объекта тепловой и электрической энергий при колебаниях де-

бита и концентрации МВС, используемой в качестве основного топлива. Задаемся мощностью энергетического объекта $P = 6,5$ Гкал/ч, что соответствует теплопроизводительности парового котла ДЕ – 10/14 и, с 10% запасом, суммарной мощности газопоршневой установки JMS 620 фирмы “Jenbacher” ($P_g = 3,035$ МВт, $P_m = 2,63$ Гкал/ч). В соответствии с формулой (5) определяем $V_0 = 8113$ м³/ч. Принимаем концентрацию метановоздушной смеси от вакуумнасосной станции $k_5 = 0,2$. Концентрация метана по каналу воздушного дутья изменяется от $k_1 = 0$ до допустимого значения $k_1 = 0,025$ через 0,005. Для концентрации метана в метановоздушной струе по каналу основного топлива принимаем значения $k_2 = 0,25; 0,3; 0,35$. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ПО КАНАЛУ ВОЗДУШНОГО ДУТЬЯ НА РАСХОДЫ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Таблица 1

k_1	0,0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025
$\alpha = 1,0; k_2 = 0,25$						
Q_1 , тыс. м ³ /ч	5,60	5,72	5,84	5,96	6,09	6,22
Q_2 , тыс. м ³ /ч	3,37	3,26	3,14	3,02	2,89	2,75
Q_{nc} , млн м ³ /год	1,68	1,63	1,57	1,51	1,44	1,38
$\alpha = 1,7; k_2 = 0,25$						
Q_1 , тыс. м ³ /ч	13,53	13,81	14,10	14,39	14,71	15,04
Q_2 , тыс. м ³ /ч	3,32	3,05	2,76	2,46	2,15	1,82
Q_{nc} , млн м ³ /год	1,68	1,52	1,38	1,23	1,07	0,91

Из анализа табл. 2 следует вывод о том, что при постоянной мощности энергетического объекта увеличение концентрации МВС k_1 по каналу воздушного дутья приводит к увеличению расхода МВС Q_1 по этому же каналу и уменьшению расхода МВС Q_2 по каналу основного топлива. Кроме того, уменьшается и потребление

природного газа Q_{nc} для обогащения расхода Q_2 до требуемой концентрации. Так, для случая энергетического объекта в виде парового котла с $\alpha = 1,0$ (табл. 2) при $k_2 = 0,25$ и изменении концентрации k_1 от $k_1 = 0,0$ до $k_1 = 0,025$, расход МВС Q_1 увеличивается на 11%, а расход МВС Q_2 уменьшается на 18%. При этом расход и,

соответственно, стоимость природного газа уменьшается также на 18%. С увеличением коэффициента избытка воздуха α , влияние повышения концентрации метана по каналу воздушного дутья существенно увеличивается. Для случая энергетического объекта в виде газопоршневой установки с $\alpha = 1,7$ (табл. 2) при $k_2 = 0,25$ и изменении концентрации k_1 от $k_1 = 0,0$ до $k_1 = 0,025$, расход МВС Q_1 увеличивается на 8%, а расход МВС Q_2 уменьшается на 45%. При этом расход и, соответственно, стоимость природного газа уменьшается также на 45%. Аналогичное влияние оказывает изменение концентрации k_1 и при других закрепленных значениях концентрации k_2 .

Выполненные исследования показывают высокую эффективность подачи МВС по

каналу воздушного дутья при $k_2 = const$, обусловленную уменьшением количества МВС по каналу основного топлива и природного газа при его использовании для обогащения. При $k_2 = var$ повышение концентрации МВС по каналу воздушного дутья позволяет использовать по каналу основного топлива МВС с меньшей концентрацией метана, при постоянстве тепловой и электрической энергии, генерируемой энергетическим объектом.

Предложенная методика расчета схем утилизации шахтного метана позволяет осуществить оптимизацию показателей работы газопоршневых установок при переменных параметрах утилизируемого метана, а также может быть использована при разработке систем управления энергетическими объектами.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ получения метана из метановоздушной смеси [Текст]: пат. 2104990 Рос. Федерация: МПК6 С 07 С 9/04 / Зозуля А.Д.; № 92015010/04; заявл. 29.12.92; опубл. 20.02.98, Бюл. № 16, ч. (II).

2. Королева, В.Н. Извлечение и утилизация шахтного метана [Текст] / В.Н. Королева. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 286 с.

3. Булат, А.Ф. Направления энерготехнологической переработки метана угольных месторождений [Текст] / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2005. – Вып. 32. – С. 67-74.

4. Булат, А.Ф. Научно-технические основы создания шахтных когенерационных энергетических комплексов [Текст] / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис. – К.: Наукова думка, 2006. – 176 с.

5. Булат, А.Ф. К проблеме энерготехнологической переработки метана угольных месторождений [Текст] / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис // Уголь Украины. – 2002. – № 5. – С. 6-9.

6. Булат, А.Ф. Энергосберегающая технология утили-

зации шахтного метана [Текст] / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 2(12). – С.38-41.

7. Щекин, В.И. Установка для утилизации шахтного метана [Текст] / В.И. Щекин // Уголь. – 1985. – № 10. – С. 17-19.

8. Булат, А.Ф. Технично-экономические аспекты утилизации шахтного метана в газодизельгенераторных установках [Текст] / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2000. – Вып. 17. – С. 19-23.

9. Булат, А.Ф. Технично-економічні аспекти переробки низькосортного вугілля та шахтного метану у теплоенергетичних комплексах на базі вуглевидобувних підприємств [Текст] / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2000. – № 4. – С. 88-94.

10. Чемерис, И.Ф. Исследование влияния концентрации метановоздушной смеси на показатели работы когенерационных энергетических модулей [Текст] / И.Ф. Чемерис // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2005. – Вып. 56. – С. 77-86.

ОБ АВТОРАХ

*Семененко Евгений Владимирович – д.т.н., с.н.с.,
заведующий отделом проблем шахтных энергетиче-
ских комплексов Института геотехнической механики
им. Н.С. Полякова НАН Украины.*

*Дякун Инна Леонидовна – м.н.с. отдела проблем
шахтных энергетических комплексов Института гео-
технической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.*