

УДК 622.278

Н.М. Табаченко, канд. техн. наук, доц.,  
Р.Е. Дычковский, канд. техн. наук, доц.,  
В.С. Фальштынский, канд. техн. наук, доц.

Государственное высшее учебное заведение  
“Национальный горный университет”,  
г. Днепропетровск, Украина, e-mail: dichre@yahoo.com

## ОБ ИЗВЛЕЧЕНИИ МЕТАНА И ИСКУССТВЕННОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ИЗ УГОЛЬНЫХ И СЛАНЦЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

N.M. Tabachenko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.,  
R.Ye. Dychkovskiy, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.,  
V.S. Falshtynskiy, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: dichre@yahoo.com

## ABOUT EXTRACTION OF METHANE AND SLATE GAS FROM COAL AND SLATE DEPOSITS

Решаемая задача увеличения производительности скважин при добыче газообразного топлива из угольных и сланцевых месторождений является весьма актуальной для получения большего объема метана из одного добычного участка.

**Цель.** Обоснование параметров технологии извлечения смеси горючих газов на основании изменения температурных режимов газификации.

**Методика.** Работа выполнена согласно следующей методике: анализ существующего опыта разработки попутной добычи газа, определение направлений исследований, обоснование режимов работы, определение материально-теплового баланса процесса газификации, разработка технологических схем подземного газогенератора.

**Результаты.** Установлены характеристики зон угольного пласта, выделяемых в процессе его гидравлического разрыва, способствующие увеличению притока метана к скважине. Обоснована эффективность заблаговременной дегазации подземного газогенератора.

**Научная новизна.** Установлен характер протекания термических процессов газификации в условиях повышенной интерференции пластов твердых горючих ископаемых, получены новые зависимости изменения давления гидроразрыва от горно-геологических параметров массива.

**Практическая значимость.** Усовершенствованы принципиальные схемы получения газообразного топлива из угольных и сланцевых месторождений, разработаны режимы работы подземных газогенераторов.

**Ключевые слова:** метан, угольный и сланцевый пласт, генераторный газ, газификация, дегазация

С каждым Природные горючие газы, широко используемые в промышленности и быту, состоят, как правило, на 90–98% из метана. Это бесцветный газ, горит почти бесцветным пламенем, не имеет запаха.

В недрах земли основная масса метана рассеяна в осадочных и изверженных горных породах, в илах озер, рек, морей и океанов.

Длительное время уголь и сланец были основным энергетическим сырьем. Однако в углях и сланцевых толщах сконцентрировано огромное количество углеродных газов, преимущественно метана, который также представляет интерес как энергетическое и химическое сырье.

Угольные и сланцевые газы состоят из метана, углекислого газа, тяжелых углеводородов, азота, сероводорода и водорода. Эти газы образуются в процессе превращения растительного материала в торф, уголь, сланец в период их метаморфизма. Наличие метана в рудничном газе в определенных концентрациях представляет большую опасность, так как с воздухом он образует взрывоопасную смесь.

Пласты угля представляют собой неоднородное трещиновато-пористое тело. Размеры пустот колеблются от нескольких ангстрем до миллиметров. В этих пустотах содержится основное количество метана, он также находится в пластах и в сорбированном состоянии.

Трещины, макро- и микропоры в угольном пласте соединяются между собой, а также с опорами и трещинами в окружающих породах лишь в пределах сравнительно ограниченных и разных по размерам участков, образуя различные по объемам изолированные друг от друга пространства для свободного газа, хаотически разбросанные по всем направлениям угольного пласта.

Количество заключенного в этих пространствах газа зависит от степени метаморфизма угля, определяющего общее количество образовавшегося газа в период формирования пласта, и газопроницаемости окружающей данную емкость среды, которая при прочих одинаковых условиях, тем меньше, чем больше глубина от поверхности земли.

В зависимости от сопротивляемости окружающей среды, объема этих пространств и количества поступающего в них газа в каждом из них создавалось определенное газовое давление, образуя разные соотношения между количествами газа в сорбированном и свободном состояниях.

Свидетельством этого является, в частности, то, что в скважинах, пробуренных на различных глубинах на небольших друг от друга расстояниях, никогда не

наблюдалось одинакового давления газа. Опыты показывают, что скважины имеют весьма ограниченную сферу действия, а выделение газа из них характеризуется так же, как и из обнаженных поверхностей пласта и разрушенного угля – затухающими кривыми (рис. 1). И за время их действия из каждой скважины выделяется различное ограниченное количество метана. О неравномерности распределения метана в месторождениях угля говорит их фактическая газоносность. На шахтах Донбасса метаносность угольного пласта, по мере углубления горных работ, вначале возрастает до 35–45 м<sup>3</sup>/т, а затем, с дальнейшим углублением, снижается до 5–10 м<sup>3</sup>/т и менее [1].

Горючие сланцы – это самостоятельная ветвь класса каустобиолитов (горючих ископаемых), керогенсодержащая порода, которая по природе образования отлична от всех известных твердых горючих ископаемых.

Органическая часть горючих сланцев имеет специфическое название – кероген-сапропелевого или гумусо-сапропелевого состава, равномерно распределенного в минеральной массе силикатного, алюмосиликатного или карбонатного состава. От ископаемого угля эти сланцы отличаются более высокой зольностью, а также большей битуминозностью. При термической переработке образуют смолу, газ и зольный остаток.

Горючие сланцы, как твердое комплексное органикоминеральное полезное ископаемое, используются для сжигания в топках котлов и в качестве химического сырья. Минеральная масса горючих сланцев по своему химическому составу пригодна для производства различных строительных материалов.

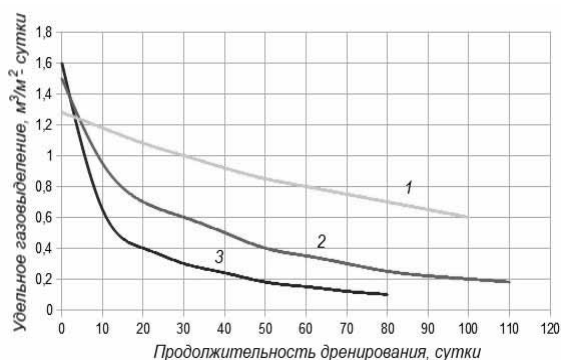


Рис. 1. Выделение метана из дегазационных скважин, пробуренных по пласту на шахте „Им. Засядько“

Запасы горючих сланцев в Украине достаточно велики. Разведаны сланцевые месторождения в Днепровско-Донецкой впадине, на границе Харьковской и Донецкой областей. На обширной площади украинских Карпат распространены мелинитовые сланцы, содержащие примерно 15–20 млрд т. смолистых и газовых составляющих. В Центральной части Украины разведаны горючие сланцы Болтышского месторождения с запасами сланца 4–5 млрд т. Площадь месторождения имеет форму круга диаметром 20–30 км, залегает на глубине 230–280 м.

При разведке месторождения вскрыто шесть пластов кондиционных по качеству горючих сланцев, разделенных прослоями породы мощностью 3–15 м. Содержащееся в них органическое вещество (кероген) при сгорании выделяет теплоту и легко поддается термическому разложению с выделением повышенного количества жидких продуктов (смол) и высококалорийного газа. Теплота сгорания горючих сланцев колеблется в пределах 10–16 МДж/кг.

Горючие сланцы представляют собой практически непроницаемую породу, поэтому любые внутрислоевые методы их разработки требуют, прежде всего, создания в пласте искусственной трещиноватости. Система трещин должна быть достаточно интенсивной, чтобы охват объекта воздействия был существенным.

Сегодня большинству специалистов ясно, что использование в угольной и сланцевой энергетике традиционных методов подготовки и сжигания топлива в топках котлов не позволяет добиться существенного прогресса. Необходимы поиски новых нетрадиционных геотехнологических методов добычи угольного метана и сланцевого газа.

Разработка и внедрение таких методов обеспечит решение главных проблем энергетике Украины и составит основу новых технологий, способных перевести энергетическое использование угля и сланца на качественно более высокий уровень.

Одним из важнейших элементов технологии добычи метана из угольных и сланцевых пластов является предварительное рыхление продуктивного породного массива, что предоставляет возможность интенсификации горных работ, внедрение циклических и циклично-поточных технологий повышения эффективности и улучшения технико-экономических показателей извлечения метана.

В Национальном горном университете разработана геотехнологическая схема газификации угольных и сланцевых пластов путем внедрения новых технических решений, позволяющая непосредственно из пласта добывать естественный метан и искусственный генераторный газ. Технологический процесс извлечения газообразного топлива состоит из двух стадий. Первая стадия – заблаговременная подготовка поля газификации направленными скважинами и добыча метана, его последующая переработка в конечный (полезный) продукт. Вторая стадия разработки массива – это собственно газификация угольного или сланцевого пласта через эти же направленные скважины.

Извлечение метана реализуется в следующих вариантах технологических схем:

- использование метода гидроразрыва неразгруженных угольных и сланцевых пластов с последующим регулированием дебита метана путем реверсирования скважинами и различными мероприятиями по интенсификации газоотдачи пластов. Определяющей характеристикой гидродинамического взаимодействия скважины и массива является фильтрационная проницаемость последнего, которая, в силу ряда причин, связанных с геологической историей месторождения, подготовкой месторождения к экс-

плуатации и его последующей геотехнологической разработкой, может оказаться значительно ниже требуемой высокой продуктивности системы;

– использование физических методов интенсификации добычи метана: торпедирование, гидроподруб, импульсная, электромагнитная, электростатическая обработка разрабатываемого массива.

Такая двухстадийная технология обеспечивает оптимальный режим извлечения метана и газа от подземной газификации пластов при разнесении во времени процессов добычи метана (сланцевого газа) из трещинного пустотного массива, образованного гидроразрывом пласта, и дальнейшего полного выгазования подготовленного участка с получением искусственного генераторного газа (рис. 2).

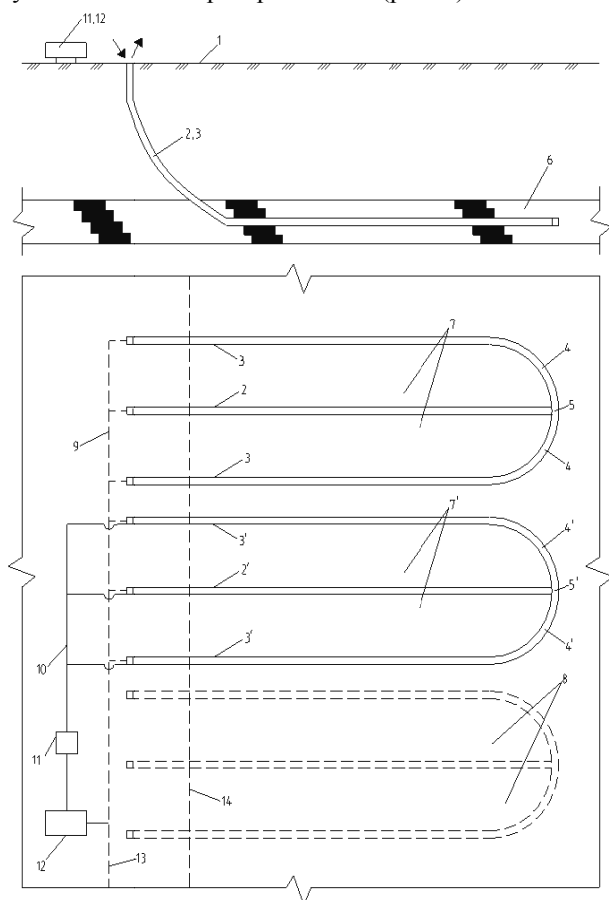


Рис. 2. Принципиальная схема добычи газообразного топлива из угольных и сланцевых месторождений: 1 – поверхность земли; 2, 2' – центральные вертикально-горизонтальные скважины; 3, 3' – боковые вертикально-горизонтальные скважины; 4, 4' – реакционный канал газификации; 5, 5' – зона розжига пласта; 6 – угольный или сланцевый пласт; 7 – предыдущий подземный газогенератор; 7' – последующий подземный газогенератор; 8 – проектируемый подземный газогенератор; 9 – трубопровод подачи генераторного газа; 10 – трубопровод для отвода метана; 11 – вакуум-насос; 12 – газосборник (газгольдер); 13 – трубопровод подачи газа потребителю; 14 – граница газификации угольного или сланцевого пласта

Начинают разработку сланцевого или угольного пласта с предыдущего подземного газогенератора 7, т.е. со второй стадии [2]. В зоне розжига пласта 5 известными методами разжигают пласт. По центральной направленной скважине 2 нагнетают дутье (воздух, кислород, пар), угольный (сланцевый) пласт разгорается в зоне 5, а образующийся искусственный генераторный газ в канале газификации 4 выдают по газоотводящим боковым направленным скважинам 3. Угольный или сланцевый пласт 6 выгазовывают обратным ходом от канала 4 до пунктирной линии 14 – границы газификации пласта предыдущего подземного газогенератора 7.

В процессе газификации газогенератора 7 начинают подготовку последующего подземного газогенератора 7'. Для этого бурят направленные скважины 2', 3' и криволинейный канал газификации 4'. Далее осуществляют гидравлический разрыв угольного (сланцевого) пласта водой с песком для повышения параметров природной газоотдачи в прискважинной зоне подземного газогенератора 7' за счет увеличения трещиноватости и проницаемости пласта.

Гидравлический разрыв пород (ГРП), как один из наиболее эффективных методов образования фильтрационных каналов в угольных и сланцевых пластах, позволяет создавать протяженные трещины, обладающие высокой гидравлической проводимостью, а, следовательно, способствующие резкому увеличению притока метана к скважине.

Сущность ГРП заключается в том, что в скважину под высоким давлением, превышающим гидростатическое в 1,5–3 раза закачивают жидкость, в результате чего в пласте раскрываются существующие трещины или образуются новые. Давление гидроразрыва пласта определяется по формуле

$$P_p = (0,014 \div 0,026) H \cdot \gamma_{cp} \cdot g,$$

где  $H$  – глубина залегания угольного или сланцевого пласта, м;  $\gamma_{cp}$  – средняя плотность шаров вышележащей толщи пород,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Давление разрыва практически зависит от глубины и пластового давления и колеблется в пределах 2–15 МПа при  $H$  до 300 м, причем четко прослеживается увеличение значения величины давления для горизонтального разрыва по сравнению с вертикальным для тех же глубин.

В период закачки воды в пласте образуются три зоны (I, II, III), зависящие от объема закачиваемой жидкости (Q) и давления, создаваемого насосами (P) (рис. 3):

I зона – давление нагнетания жидкости поднимается медленно. Вода движется по природным порам и трещинам без нарушения структуры пласта;

II зона – начало нарушения структуры пласта, расширение трещин, пор и более быстрый прием воды;

III зона – увеличенного приема воды. Вода движется в пласте по новым трещинам, щелям, гидросопротивление которых стало значительно меньше.

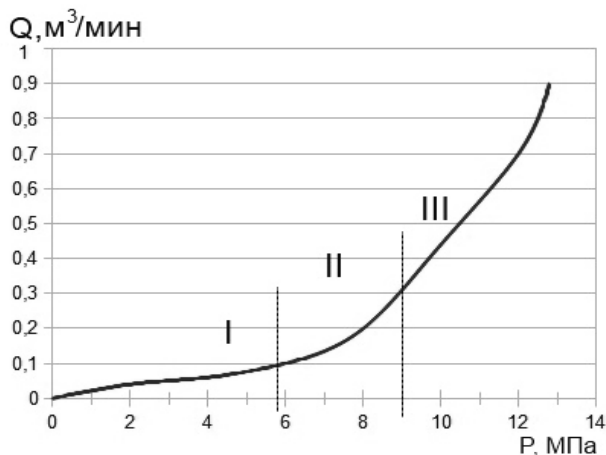


Рис. 3. Процесс образования зон (I, II, III) и раскрытия трещин в массиве пласта в период гидравлического разрыва

Для расклинивания трещин к рабочей жидкости добавляют крупнозернистый песок. Скорость закачки составляют 0,013 – 0,20 м³/с. Для одной операции гидроразрыва используют 80–100 м³ воды и 13–16 м³ песка или другого расклинивающего агента. Процесс гидроразрыва разделяют на три самостоятельные операции: образование трещин, подача песка в скважины и продувка его в трещины для поддержания их в раскрытом состоянии в период извлечения метана.

ГПР осуществляют в горизонтальной (пластовой) части направленных скважин, изолированной от остальной ее части герметизирующими устройствами. Пластовые части направленных скважин не укрепляются обсадными трубами. Устойчивость стенок таких скважин поддерживается за счет образования глинистой корки от промывочной жидкости в процессе бурения, а также внутриноровой глинизации.

После создания системы трещин в пласте газ метан, находящийся в массиве и боковых породах, по сети природных и искусственных трещин поступает через стенки горизонтальной части направленных скважин и по ним отсасывается вакуум-насосом 11, расположенном на поверхности, в газгольдер (газосборник) 12 (рис. 2). В результате гидрорасчленения сланцевого (угольного) пласта и выхода метана обеспечивается дальнейший рост реакционной поверхности в пустотах трещин, которая создает условия для интенсификации второй стадии – процесса скважинной газификации угольного или сланцевого пласта, обеспечивающей повышенный выход искусственного генератора газа.

Образованию повышенной реакционной поверхности пласта способствует и дегазация (отсос метана вакуум-насосом). Метан мигрирует из пласта, оставляя трещины, поры и пустоты, в которых затем осуществляется интенсивный процесс газификации. Отсосанный метан из подземного газогенератора 7 по

скважинам 2', 3' и газопроводу 10 аккумулируется в газосборнике 12. После полного выделения метана (сланцевого газа) участок 7 готов для последующей газификации – второй стадии получения искусственного генераторного газа [3].

Двухстадийный режим производства газообразного топлива позволяет ликвидировать потери метана в пласте, который при дальнейшей газификации участка 7 будет сгорать. Полученный генераторный газ направляется также в газгольдер, где смешивается с природным метаном. Из газгольдера смесь горючих газов повышенной калорийности (теплотворной способности) направляется потребителям.

В период газификации подземного газогенератора 7 производится подготовка и обработка пласта гидроразрывом нового проектируемого подземного генератора 8.

Такая двухстадийная техническая схема циклической разработки угольного (сланцевого) пласта продолжается до полной отработки намеченного участка месторождения.

#### Выводы.

1. Разработана новая геотехнологическая схема извлечения газообразного топлива из месторождений твердых горючих ископаемых, позволяющая включить в сферу интенсивной инженерной деятельности данные месторождения, увеличить коэффициент извлечения запасов, резко снизить безвозвратные потери топлива.

2. Эффективная эксплуатация месторождений твердых горючих ископаемых методами скважинной геотехнологии возможна лишь при достаточно высокой проницаемости вмещающих пород в окружающем массиве направленных скважин.

3. Одним из эффективных методов создания проницаемых каналов в массиве горных пород является гидроразрыв пласта водой, подаваемой под высоким давлением. Метод позволяет осуществить направленное воздействие на породный массив с образованием заданного количества вертикальных и радиальных трещин ненулевого раскрытия, которые используются как гидродинамические каналы. ГРП также создает условия для управления фильтрационными свойствами околоскважинного массива пород, обеспечивающего интенсивный выход метана (сланцевого газа) из обработанного пласта.

4. Заблаговременная подземная дегазация последующего подземного газогенератора повышает теплоту сгорания генераторного газа в каждом предыдущем подземном газогенераторе за счет смешивания его с уже добытым метаном. Возможно избежать потерь метана, находящегося в пласте (при газификации он сгорит), и одновременно интенсифицировать процесс газификации пласта в этом газогенераторе при возрастании реакционной поверхности массива после его обработки гидроразрывом и последующей дегазацией пласта.

5. Скважинная геотехнологическая добыча газообразного топлива из угольных и сланцевых месторождений создает предпосылки объединения всех работ

(от разведки до эксплуатации) в один непрерывный производственный цикл, что не только определяет перспективы ее использования в горной индустрии, но позволяет рассматривать как новое направление в горной науке. Сочетая простоту технологии, минимальные капитальные затраты строительного периода, сроки освоения, возможность полной автоматизации работ и высокую степень извлекаемости запасов из недр с возможностью организации эксплуатационных работ как естественное продолжение геотехнической разведки месторождений, скважинная геотехнология позволяет резко снизить затраты не только на разведку, но и на освоение месторождения.

#### Список литературы / References

1. Николлин В.И. Прогнозирование и устранение выбросоопасности при разработке угольных месторождений / Николлин В.И., Васильчук М.П. – Липецк: Роскомпечать, 1997. – 494 с.

Nikolin, V.I. and Vasilchuk, M.P. (1997), *Prognozirovaniye i ustraneniye vybrosopasnosti pri razrabotke ugolnykh mestorozhdeniy* [Prognostication and Removal of Outburst Hazard at Coal Reserves Extraction], Roskompechat, Lipetsk, Russia.

2. Табаченко Н.М. Способ подземной газификации твердого топлива / Табаченко Н.М., Дичковский Р.Е., Фальштынский В.С. / Патент Украины №20117 от 15.09.2000. Е 21 В 43/295, бюл. №4 от 15.02.2000.

Tabachenko, N.M., Dychkovskiy, R.Ye. and Falshytynskiy, V.S. "Underground coal gasification of hard fuel", Patent of Ukraine №20117 on September 15, 2000. E 21 В 43/295, bulletin no.4 dated February 15, 2000.

3. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля / [О.В. Колоколов, Н.М. Табаченко, А.М. Ейшинский и др.] – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 281с.

Kolokolov, O.V., Tabachenko, N.M. and Yeyshinskiy, A.M. (2000), *Teoria i praktika termokhimicheskoy tekhnologii dobychi uglya* [Theory and Practice of Thermochemical Technology of Coal Mining and Processing], National Mining Academy, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Вирішуване завдання збільшення продуктивності свердловин при видобуванні газоподібного палива з вугільних і сланцевих родовищ є вельми актуальним для отримання більшого об'єму метану з однієї видобувної ділянки.

**Мета.** Обґрунтування параметрів технології отримання суміші горючих газів на підставі зміни температурних режимів газифікації.

**Методика.** Роботу виконано згідно з наступною методикою: аналіз наявного досвіду попутного отримання газу, встановлення напрямів досліджень, обґрунтування режимів роботи, визначення матеріаль-

но-теплового балансу процесу газифікації, розробка технологічних схем підземного газогенератора.

**Результати.** Встановлено характеристики зон вугільного пласта, які виділяються в процесі його гідравлічного розриву, що сприяє збільшенню притоку метану до свердловини. Обґрунтовано ефективність завчасної дегазации підземного газогенератора.

**Наукова новизна.** Встановлено характер протікання термічних процесів газифікації в умовах підвищеної інтерферентності пластів твердих горючих копалин, отримано нові залежності зміни тиску гідророзриву від гірничо-геологічних параметрів масиву.

**Практична значущість.** Удосконалено принципові схеми отримання газоподібного палива з вугільних і сланцевих родовищ, розроблено режими роботи підземних газогенераторів.

**Ключові слова:** метан, вугільний і сланцевий газ, генераторний газ, газифікація, дегазация

The solution of the problem of the mining boreholes productivity increase is very urgent for gaseous fuel extraction from coal and slate deposits as it may help to produce greater volume of methane from a production unit.

**Purpose.** To estimate the parameters of the combustible gases extraction technology based on change of temperature modes of gasification process.

**Methodology.** Analysis of existing experience of associated gas production, determination of the research guidelines, substantiation of the technological process parameters, determination of the material thermal balance of gasification, designing of the schemes and flowsheets of underground gas generator have been carried out.

**Findings.** Characteristics of different zones of a coal seam appearing during frac job has been determined and reasonability of preliminary degassing of underground gas generator has been substantiated.

**Originality.** The character of the gasification thermal processes behavior in the conditions of high interference of hard fuel layers and new values of pressure change in hydraulic fracturing dependence on the mining-and-geological parameters of rock massif.

**Practical value.** The principle network of gaseous fuel production from coal and slate deposits has been improved and the operation modes of underground gas generator have been developed.

**Keywords:** methane, coal and slate gas, producer gas, gasification, degasation

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Бузилом. Дата надходження рукопису 11.10.11