

**ЙЕН ГРЕЙ**, канд. техн. наук, генеральный директор, [ian@sigra.com.au](mailto:ian@sigra.com.au)  
**Ю.С.ШЕЛУХИНА**, геолог, [yulia@sigra.com.au](mailto:yulia@sigra.com.au)  
*Sigra Ltd, Австралия*

**IAN GRAY**, PhD in eng. sci., managing director, [ian@sigra.com.au](mailto:ian@sigra.com.au)  
**Yu.S.SHELUKHINA**, geologist, [yulia@sigra.com.au](mailto:yulia@sigra.com.au)  
*Sigra Pty Ltd, Australia*

## РАЗВЕДКА И ДОБЫЧА ГАЗОНОСНЫХ УГЛЕЙ

Статья посвящена проблемам добычи газоносных углей, которые связаны с большим количеством разновидностей угля, содержания газа, проницаемостью и диффузионными характеристиками. Выбор метода отработки основывается прежде всего на понимании геологии и корректных измерениях основных параметров. Затем необходима адекватная интерпретация и гибкий подход в отношении геотехнических условий и условий пласта. Описываются некоторые методики, используемые в разведке для установления этих параметров.

**Ключевые слова:** уголь, разведка, газоносность, метан, проницаемость, диффузионные характеристики, дегазация, изотерма сорбции, напряжение, деформация, геомеханические характеристики.

## EXPLORING AND MINING GASSY COALS

This paper examines the issues of mining gassy coals. These cover a huge range of coal types, gas contents, permeabilities and diffusional behaviour. The key to understanding what approach to take to mining, is an understanding of the geology and the correct measurement of the important parameters. This must be followed by suitable interpretation and a flexible mining approach to dealing with the geology, geotechnical and reservoir conditions. The paper describes some of the techniques used in exploration to define these parameters.

**Key words:** coal, exploration, gassy, methane, permeability, diffusion behaviour, degasation, sorption isotherm, stress, strain, geotechnical characteristics.

Газоносные угли – это угли, которые содержат метан, образованный в процессе углекислотной, а иногда диоксида углерода и другие газы. Если диоксид углерода присутствует, то он обычно попадает в уголь в результате интрузивных процессов. Многие угли обводнены и в них пластовое давление жидкости (воды) выше, чем сорбционное давление, при котором газ начинает выделяться из угля. Сорбционная изотерма описывает соотношение между содержанием газа и давлением при данной (пластовой) температуре. Сорбционные изотермы существенно различаются в зависимости от типа угля, состава газа и, возможно, порядка, в котором газ поступал в уголь.

Движение флюидов через уголь происходит двумя способами: диффузия газа по градиенту концентрации между твердой фазой и поровым пространством и трещинами, и движение воды или газа по градиенту потенциала (давление и гравитация). Проницаемость угля зависит от кливажа. Кливаж – это более или менее регулярная сеть трещин, которая существует во многих углях и особенно доминирует в блестящих разновидностях угля.

Не все угли имеют хорошо развитую систему кливажа, что сильно влияет на их проницаемость. Трещины кливажа могут быть как открытыми, так и выполненными минералами (глины или карбонаты). Если

трещины кливажа присутствуют и не заполнены, то уголь обычно проницаемый. Проницаемость угля также сильно зависит от эффективного напряжения, которое существует в угле. Изменения уровня эффективного напряжения происходят благодаря дренажу, который понижает давление жидкости и тем самым повышает эффективное напряжение. Эффективное напряжение может быть понижено усадкой угля при десорбции.

Проницаемость угольного пласта может варьировать в значительных пределах: от 4 мД до 3 Д. Этот диапазон покрывает разброс значений в шесть порядков. Угли обычно характеризуются анизотропией проницаемости. Измеренное отношение максимальной и минимальной проницаемости по разным направлениям изменяется от 3 до более чем 100 раз.

**Разведка угольного месторождения и определение геомеханических характеристик.** Перед проектированием любой горной выработки необходимо произвести тщательное изучение территории: условий залегания угля, геотехнических параметров, его качества и объема. Следует всегда помнить, что разведка не является завершённой, пока не завершена добыча угля. Технология разведки все время совершенствуется, и некоторые работы потребуются провести заново, что требует дополнительного финансирования.

Компания, которой руководит автор статьи, проводит такую разведку на регулярной основе. Некоторые работы проводятся с привлечением сейсморазведки, но большинство бурением комплексом со съёмным керноприёмником Voart Longyear HQ-3 с применением тройных колонковых труб.

**Измерение напряжений в породе.** Существует несколько методов измерения напряжения в породе, наиболее надёжны метод непосредственного измерения напряжения в скважине, метод гидроразрывов и интерпретация деформаций стенок скважины по данным акустического сканирования. Компания предпочитает применять инструмент для внутрипластового измерения напряжения (ИВН), который может использоваться до глубины 1,5 км (рис. 1).

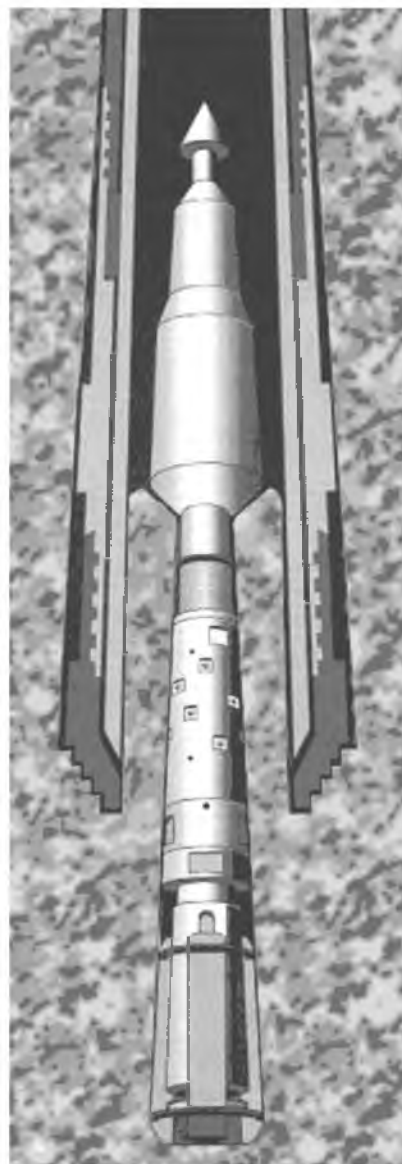


Рис. 1. Схема использования инструмента для внутрипластового измерения напряжения

**Интерпретация напряжения с использованием тектонической деформации.** Согласно наблюдениям, напряжение в породе меняется по разрезу осадочных пород и существенно зависит от таких геологических структур, как разрывы и складки. Обнаружено, что разрывы всегда снимают напряжение в породе и что более прочные породы имеют тенденцию нести большее напряжение, чем менее прочные, поэтому в разрезе пород можно найти большие вариации величины горизонтального напряжения. Полезно интерпретировать этот процесс

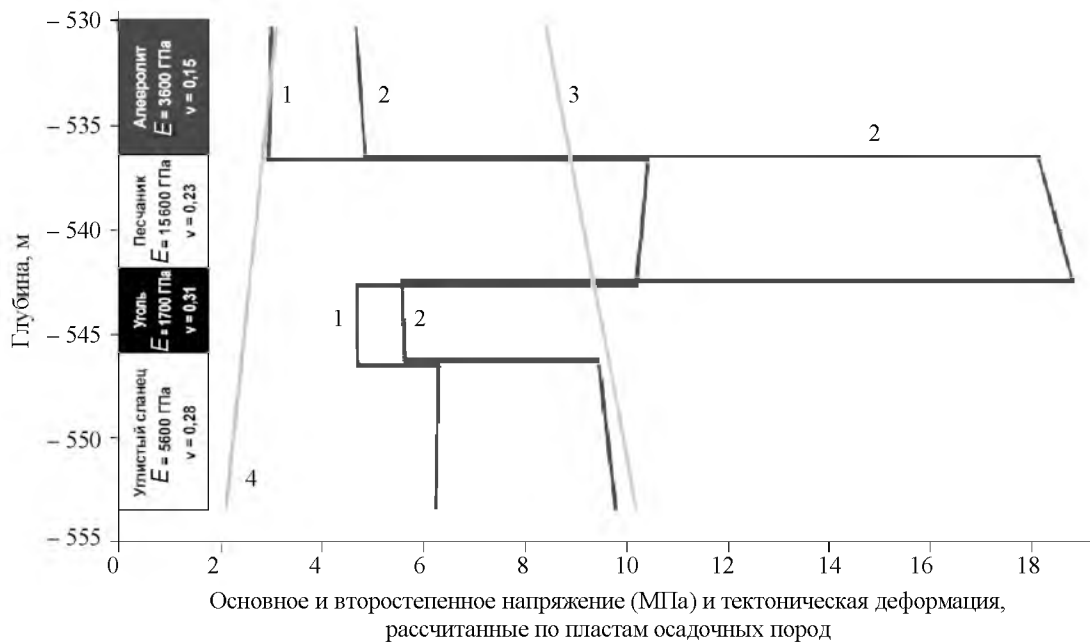


Рис.2. Теоретическое распределение напряжений по типичному осадочному разрезу (показано постепенное изменение тектонических деформаций и вызванные ими напряжения в породах различной прочности) 1 и 2 – минимальное и максимальное горизонтальное напряжения; 3 и 4 – основные и второстепенные тектонические деформации,  $\times 10^4$

трансформации напряжений в тектонические деформации. Тектоническая деформация – это деформация, которой должна подвергнуться порода, чтобы в ней возникло заданное напряжение.

Тектоническая деформация вычисляется путем измерения напряжения, вычитания из него горизонтального компонента напряжения, сгенерированного собственным весом породы использованием параметров породы (глубина, плотность и коэффициент Пуассона). Далее вычисляется деформация, которая генерирует это напряжение. Хотя этот подход использует простые вычисления для упругих деформаций, примечательно, как часто тектонические деформации являются постоянными, в то время как напряжение меняется весьма существенно. Это является правилом с редкими исключениями. Надежная величина тектонической деформации дает возможность для вычисления всех напряжений в последовательности, используя модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$  для имеющихся типов пород. На рис.2 показан пример напряжений по разрезу и соответствующих тектонических деформаций.

Исключения из этого правила возникают при наличии несогласий и сложных сбросов и складок. Каждый из этих случаев нужно рассматривать индивидуально, и большие горные выработки могут потребовать десятков измерений напряжения, сотен анализов обрушения скважин, некоторой информации о гидроразрывах и сейсмозаведки. Знания о напряжениях очень важны. Они влияют на характер обвалов породы, выбор направления разработки, направленную проницаемость породы и направление распространения гидроразрывов.

**Содержание газа в угле.** Измерение содержания газа в угле в основном производится путем помещения керна в канистру как можно быстрее, и измерения выделения газа со временем\*. В течение этой процедуры керн должен содержаться при температуре, равной температуре угольного пласта. Остаточное содержание газа может быть определено путем отбора образцов угля и их истирания для ускорения процесса выделения газа. Мы не считаем нужным нагревать керн или измельченный уголь для ускорен-

\* AS 3980, Australian Standard™. Guide to the determination of gas content of coal – Direct desorption method, second edition, 1999.

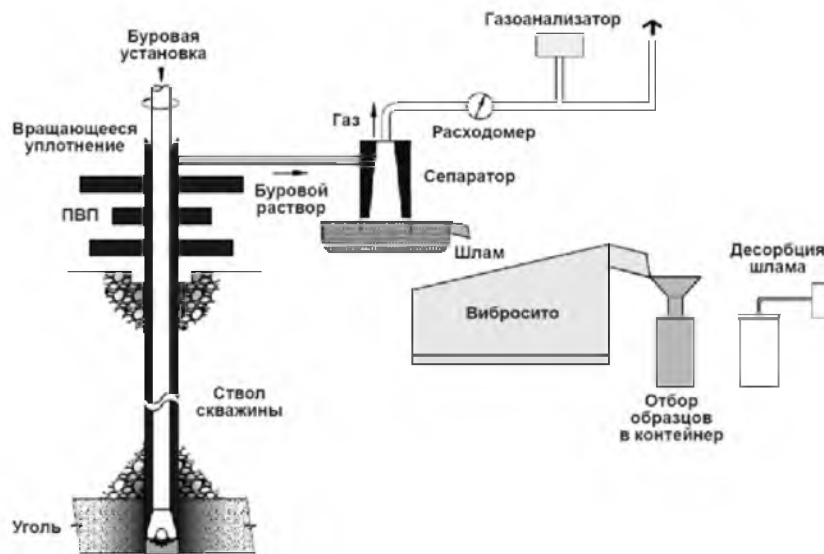


Рис.3. Схема установки по определению содержания газа на поверхности

ного выделения газа, так как это не соответствует условиям в пласте угля. Количество потерянного газа оценивается по графику зависимости начального выделения газа от квадратного корня от времени, которое является теоретически и часто практически линейным. Этот график может быть продолжен к моменту предполагаемого начала выделения газа, когда керн извлекался на поверхность. Проблемы возникают, если начальная скорость выделения газа высока, что приводит к высокой начальной потере газа. Это может произойти при большой трещиноватости угля, большом коэффициенте диффузии или большом интервале времени между подъемом керна и помещением угля в канистру для десорбции.

Если потери газа превышают 10 % общего содержания газа, то требуется применение альтернативных методов. График начального периода выделения газа, однако, полезен для определения характера десорбции газа из угля. Это важно также для оценки вероятности выбросов газа и выделения газа из добытого угля. Используя угол наклона графика начального выделения газа и общее содержание газа, можно найти относительный коэффициент диффузии. Термин относительный использован потому, что теоретически подразумевается, что керн имеет цилиндрическую форму с диффузией Фика\*.

\* Crank J. The Mathematics of Diffusion, 2nd Edition. Oxford: Clarendon Press, 1975.

На практике керн является заведомо неоднородным и с некоторой степенью трещиноватости, и это влияет на величину найденного коэффициента диффузии. Альтернативным подходом является вычисление скорости дегазации на единицу массы угля и использование этого отношения для вычисления начального выделения газа из керна.

Возможны также некоторые другие методы определения содержания газа в угле. Один из них предполагает бурение открытой скважины с положительным дифференциальным давлением бурового раствора. Раствор выносит угольные обломки на поверхность вместе с выделившимся газом. Уплотнение ротора предотвращает потери этой смеси, которая подается в сепаратор, откуда газ выделяется позитивным давлением в расходомер, определяющий его количество. Жидкость и угольные обломки подаются затем в прибор для очистки жидкости, откуда обломки могут быть собраны для дальнейшего выделения газа. Эта система имеет практически нулевые потери газа, но требует тщательной записи показаний приборов с целью точного определения времени, когда газ и обломки поступили на поверхность. Достоинство этого метода в том, что он также определяет зависимость содержания газа от глубины. (рис.3).

Компания имеет аналог для подземных работ, который может использоваться с воз-

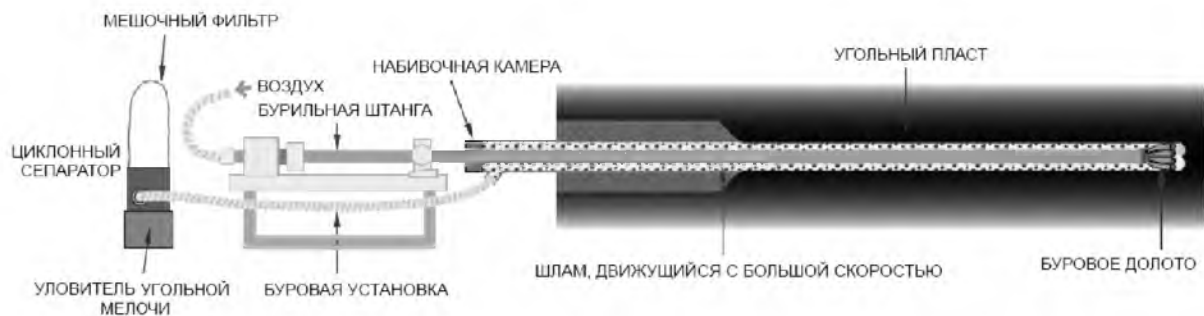


Рис.4. Установка для подземных работ по сбору шлама воздушного бурения

душным бурением. Метод особенно подходит для определения опасностей выбросов, так как дает информацию о суммарном объеме обломков, содержании газа, распределении размера частиц и коэффициенте диффузии. Схема установки показана на рис.4.

**Измерение проницаемости.** Наиболее эффективным процессом измерения проницаемости угля в сочетании с колонковым бурением является испытание пласта пластоиспытателем на трубах (DST). Тест включает в себя размещение пакеров сверху и снизу испытываемого пласта. Далее уровень жидкости в буровой колонне понижается, пакеры герметизируются. Когда давление в зоне испытаний стабилизируется, открывается клапан, давая доступ жидкости в буровую колонну. После притока жидкости, когда объемы газа и воды замеряются, клапан закрывается и начинается рост давления. Форма графика давления в испытываемой зоне может быть проанализирована с использованием теории скважинных испытаний для получения значений проницаемости и начального давления в пласте.

В некоторых тестах можно также увидеть характер зависимости проницаемости от эффективного напряжения в пласте. Тесты с поступлением жидкости в буровую колонну безусловно более надежны, чем тесты с нагнетанием жидкости в пласт, поскольку жидкость вымывает из окружающего пласта в скважину загрязнения в отличие от второго варианта. Технология теста позволяет оператору видеть выделяющиеся газ и жидкость и идентифицировать жидкость из пласта для взятия образцов. Эти достоинства перевешивают недостатки, когда газовая

фаза выделяется в больших количествах, что усложняет интерпретацию теста.

Однако одиночный тест скважины не может определить анизотропность проницаемости. Для этого, наряду с тестом скважины, необходимо поместить датчики давления в другие наблюдательные скважины. Обычно это дорогостоящая операция, однако существуют варианты уменьшения стоимости, когда тест проводится как часть группы DST-тестов с наблюдательными датчиками давления или мероприятий по дегазации пластов.

Существуют аналоги тестов на поверхности для подземных условий. Они включают тесты на горизонтальных скважинах с точками измерения давления в боковых скважинах.

**Изотерма сорбции.** Помимо лабораторного определения сорбционных изотерм, иногда полезно проводить замеры естественных сорбционных изотерм в естественных условиях. Особенно это относится к случаям, когда присутствует смешанный газ. При этом керн извлекается из буровой колонны и помещается в герметичный сосуд, свободное пространство в котором заполняется водой. Давление и температура в сосуде постоянно замеряются. Как только происходит стабилизация давления и температуры, сосуд открывается и часть газовой смеси и воды стравливается, измеряется и анализируется на химический состав. После этого сосуд снова герметизируется для стабилизации давления и температуры. Эта процедура повторяется, пока давление не упадет до близкого к атмосферному, после чего сосуд открывается, измеряется объем и масса угля, часть образца размалывается с целью определения остаточного количества газа.



Рис.5. Результаты смоделированного изменения напряжения для глубокозалегающих углей с высоким напряжением в бассейне Боуэн (Квинсланд, Австралия). Максимально и минимальное горизонтальное напряжение начинаются от 5,6 МПа. Влияние на напряжение от сжатия угля начинается только с 2,7 МПа

**Изменения напряжения в углях во время дегазации.** Для того чтобы предсказать поведение проницаемости угля во время дегазации, необходимо знать напряжение в угле, давление в пласте, давление сорбции и характер сжатия угля при выделении им газа. Также необходимо определить модуль Юнга для угля. Сжатие угля измеряется физическим методом обратным абсорбции газа образцом угля и измерения его деформации.

Использование всех измерений дает возможность смоделировать изменения в горизонтальном напряжении в пласте с начала дегазации до ее конца. Основной тенденцией для эффективного горизонтального напряжения является рост при начальном уменьшении давления в пласте с последующим его некоторым уменьшением в результате сжатия угля при десорбции газа. Какая тенденция будет доминировать, зависит от свойств угольного пласта. Пример смоделированного изменения напряжения для глубокозалегающих углей с высоким напряжением в бассейне Боуэн, Квинсланд, Австралия показан на рис. 5.

Если эффективное напряжение увеличивается, то можно ожидать уменьшения проницаемости и наоборот.

**Возможные варианты добычи глубокозалегающего малопроницаемого угля с высоким напряжением в пласте.** Предположим, что мы провели достаточные работы по геологической, геотехнической разведке и определению характеристик месторождения. Был обнаружен уголь с очень низкой проницаемостью (порядка нескольких десятков микродарси). В дополнение к этому на-

пряжения в пласте существенно выше прочности угля, что приводит к тому, что пробуренные скважины в угле не остаются открытыми. Предположим также, что мы имеем дело с многослойными пластами и все пласты склонны к выбросам. Задача состоит в том, как найти безопасные способы добычи этого угля. Первая состоит в том, как организовать безопасный вход в шахту. Бурение шахтных стволов или проходка горизонтальных штолен должна производиться безопасно. Для этого уголь должен быть дегазирован и разгружен для производства выработок в нем. Это может быть достигнуто с применением дистанционных взрывов или путем дробления высокоэнергичным газом.

Далее прокладывается серия штреков ниже разрабатываемого пласта. Затем бурятся скважины в породе под пластом, обсаживаются, цементируются и перфорируются на расстоянии примерно 10 м в зависимости от проницаемости. Предполагая, что порода может быть подвергнута гидроразрывам, распространяющимся в пласт, гидроразрывы проводятся в каждой перфорации. Если гидроразрывы не распространяются вертикально в пласт, то скважины бурятся в пласт из штреков, пересекающих пласт, и гидроразрывы делаются в них. После этого пласт дегазуруется. Эта технология может использоваться для дренажа выработок и выемочных штреков для добычи сплошным забоем. Технология может использоваться и для дегазации больших блоков, если проницаемость угля достаточна для дренажа в приемлемые сроки до газосохранения, позволяющего добычу.

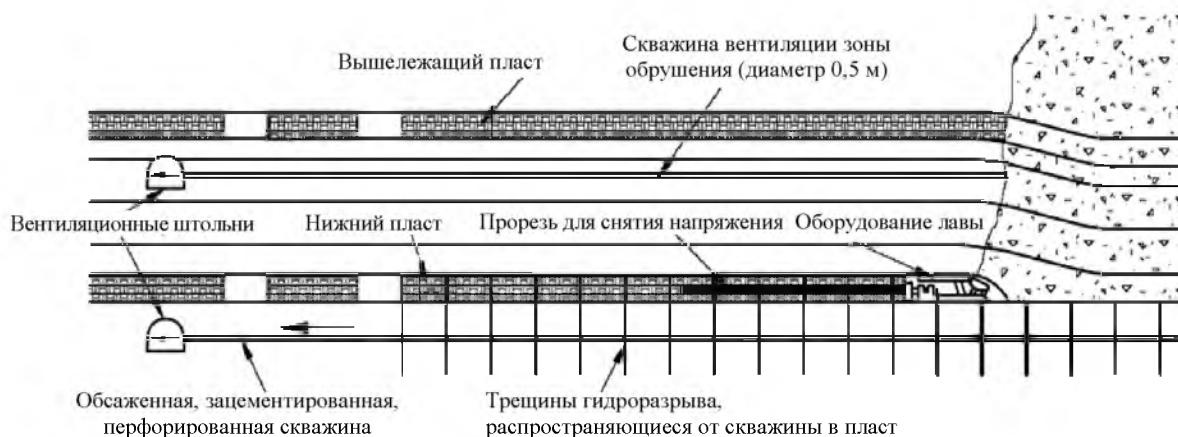


Рис.6. Метод добычи с предварительной дегазацией при помощи гидроразрывов из скважин, пробуренных в породах подошвы пласта. Дренаж угольного блока осуществляется с помощью прорези для снятия напряжения перед отработкой. Зона разгрузки дегазируется посредством вентиляционных штголен

Если эта технология не подходит, используется альтернативная методика. Она включает проходку выемочных штреков и протаскивание цепной пилы между ними через целик так, чтобы провести местную дегазацию для добычи угля. Для отвода газа потребуется нестандартное проектирование. Возможны заклинивания цепной пилы при неблагоприятных геомеханических условиях.

Перед добычей сплошным забоем бурятся вентиляционные штольни из выработок в породе, используя микротуннельное оборудование над и под пластом вдоль длины забоя. Они подсоединяются к вытяжной вентиляции для удаления газа разгруженных зон из выработок.

Этот процесс продолжается на нескольких уровнях угольных пластов. Общая концепция состоит в разработке шахты в породе, для того чтобы избежать выбросов и

снизить вероятность самовозгорания. Дренажирование сделано из выработок. Жидкость высокого давления для гидроразрывов подается в штреки из дозирующей установки и насосов высокого давления, находящихся на поверхности. Дозирующая установка смешивает расклинивающий агент, присадки и воду. Насос высокого давления затем подает жидкость для гидроразрывов под землю. На рис.6 показан разрез подземной добычи с использованием описанного метода.

Если достигнуто адекватное понимание геологии, геомеханики и характеристик месторождения, то, проявляя изобретательность, последовательность и имея хорошее финансирование, можно безопасно разрабатывать почти любые угольные пласты. Вопрос, будет ли эта разработка прибыльной, является предметом дополнительного рассмотрения для каждого конкретного случая.