

**В.А. Бобин**

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ЧАСТЯМИ ПЛАСТА С ОБРАЗОВАНИЕМ В НЕМ УСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ СКВОЗНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРЕЩИН ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ЗАБЛАГОВРЕМЕННОЙ ДОБЫЧИ**

На основе теоретических выкладок и расчетов показано, что формирование системы сквозных вертикальных трещин в угольном пласте приводит к существенному увеличению (на порядок величины и более) проницаемости и коэффициента фильтрации угольного пласта в вертикальной плоскости. Обоснован способ повышения гидродинамической связи между частями пласта с образованием в нем устойчивой системы сквозных вертикальных трещин при реализации технологии его заблаговременной добычи, дана оценка влияния системы сквозных вертикальных трещин в угольном пласте на газодинамическую связь между его частями, расположенными в кровле и почве, разработана методика расчета проницаемости неразгруженных угольных пластов с системой вертикальных трещин, образованных в их добычной зоне. *Ключевые слова:* извлечение метана, угольный пласт, фильтрация, горизонтальные скважины, вертикальные трещины, гидродинамическая связь.

---

**П**оложительный опыт, примеры и концепция промышленного извлечения метана из угольных пластов содержится в работах К.Н. Трубецкого, В.В. Гурьянова, Л.А. Пучкова, В.М. Шика и других исследователей.

Однако промышленная добыча метана из угольных пластов требует глубокой теоретической проработки данного вопроса, в частности, разработки новых методов интенсификации газовыделения из угольного пласта.

Особенность этих способов заключается в том, что с их помощью дана научно обоснованная оценка возможности и целесообразности освоения ресурсов горючего газа в метаноугольных месторождениях с применением скважин слож-

ного профиля и установлены закономерностей формирования фильтрационных характеристик неразгруженного угольного пласта.

Анализ научной литературы показал, что наиболее важными идеями, которые целесообразно использовать для разработки схем вскрытия угольных пластов с помощью вертикально-горизонтальных скважин являются идеи:

1) улучшения фильтрационных характеристик зон пласта, примыкающих к добычным скважинам,

2) формирования внутри угольного пласта специального техногенной зоны вокруг добычной скважины, образованной гидроразрывами в подошве и кровле пласта и дополнительным формированием в подошве пласта зародышевых трещин,

3) использования виброволнового воздействия на такую техногенную зону в угольном пласте с возможностью проявления геоэффекта,

4) применения гидроразрыва угольного пласта в наиболее оптимальном пространственном направлении.

В настоящей статье дано научно обоснование идеи улучшения фильтрационных характеристик зон пласта, примыкающих к добычным скважинам, которая была реализована в виде способа повышения гидродинамической связи между частями пласта с образованием в нем устойчивой системы сквозных вертикальных трещин при реализации технологии его заблаговременной добычи

С физической точки зрения этот способ интенсификации извлечения метана из угольного пласта направлен на формирование зоны перетока метана между частями пласта для повышения гидродинамической связи между ними, а также между горизонтальными скважинами, пробуренными по пласту [1].

С его помощью в угольном пласте создается устойчивая система сквозных вертикальных трещин, которые вместе с трещинами гидроразрыва в породах почвы и кровли пласта формируют обширную газопроницаемую зону, газодинамически связанную с объемом иницирующей полости.

Иницирующие полости создают, а трещины гидроразрыва одновременно формируют соответственно в породах почвы и кровли угольного пласта на расстоянии, равном  $0,1 m$ , где  $m$ -

мощность пласта. Для этого охлаждают слои почвы и кровли, примыкающие к пласту, жидким азотом нагнетанием его в пласт через трещины гидроразрыва, образованные в породах почвы и кровли, при этом иницирующие полости ориентируют в вертикальной плоскости сечения пласта, а затем формируют через них систему трещин гидроразрыва, насквозь пересекающих угольный пласт по мощности и гидродинамически соединяющих между собой трещины гидроразрыва, сформированные в породах почвы и кровли, а также горизонтальные скважины, пробуренные по пласту.

На рис. 1 представлена схема вскрытия газовой залежи угольного пласта [2—3].

При этом реализация схемы вскрытия осуществляют следующим образом.

Бурят иницирующую скважину 1 так, чтобы забой скважины находился на расстоянии порядка  $0,1m$ , где  $m$  — мощность угольного пласта; выше кровли пласта, создают в скважине иницирующую (зародышевую) полость 2. Затем бурение иницирующей скважины продолжают, а заканчивают, когда забой скважины будет на  $0,1m$  ниже почвы пласта, далее создают

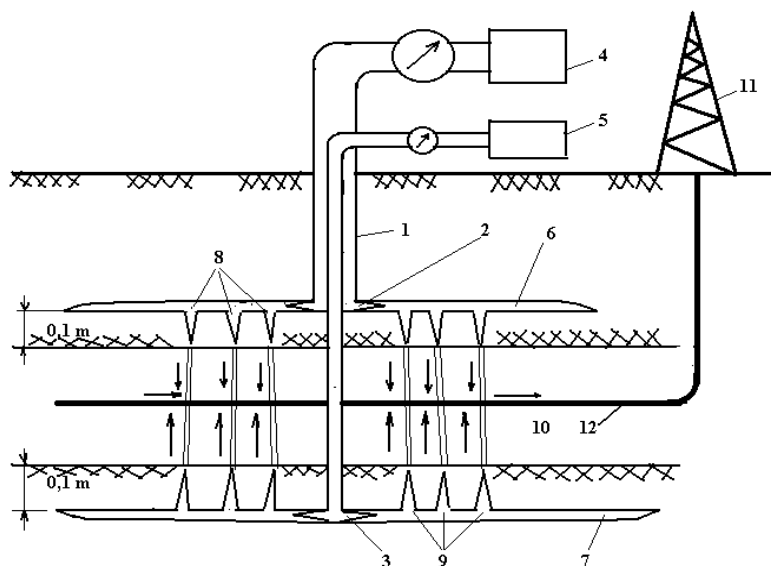


Рис. 1

инициирующую полость 3. Далее полости 2 и 3 герметизируют независимо друг от друга, каждая из которых образует свою систему нагнетания соответственно 4 и 5. После герметизации полостей 2 и 3 одновременно в породах почвы и кровли формируют трещины гидроразрыва 6 и 7 с помощью нагнетания в них жидкости под давлением.

Таким образом, в результате создания трещин гидроразрыва в породах почвы и кровли угольного пласта в пространстве будет сформирован объем, который при виде на него сверху геометрически похож на цилиндр с неправильной боковой поверхностью.

Дальнейшие операции способа направлены на создание в этом объеме системы трещин, значительно увеличивающей его проницаемость. Для этого, во-первых, проводят циклическое гидровоздействие, благодаря которому трещинная проницаемость угольных пластов в плоскости их поперечного сечения независимо от их прочностных свойств может быть увеличена в 3—10 раз. Далее, во-вторых, в трещины гидроразрыва 6 и 7 нагнетают жидкий азот с температурой — 170<sup>0</sup>С с целью значительно охладить слои породы почвы и кровли, примыкающие к пласту, для того, чтобы сформировать в них системы вторичных зародышевых инициирующих трещин 8 и 9, которые, по сути, являются трещинами сжатия, ориентированными в вертикальной плоскости, и кончики которых достигают поверхности угольного пласта 10. Затем через системы нагнетания 4 и 5 подают жидкость под высоким давлением и формируют систему трещин гидроразрыва 8 и 9, насквозь пересекающих угольный пласт по мощности и гидродинамически соединяющих между собой трещины гидроразрыва, сформированные в породах почвы и кровли.

Вертикальная часть 11 добычной скважины бурится вне контура добычной зоны пласта 12, а система горизонтальных добычных скважин 13 ее пересекает добычную зону по всей длине.

В результате метан, выделяющийся из угольного пласта через образованные системы микро- и макротрещин поступает в систему горизонтальных скважин 13 и далее на поверхность.

Особенностью настоящего способа добычи метана из неразгруженных угольных пластов является процесс образования

Таблица

Категории по трещиноватости	Степень трещиноватости	Среднее расстояние между трещинами, м	Удельная трещиноватость, м <sup>-1</sup>
I	Чрезвычайно трещиноватые (мелкоблочные)	До 0,1	Более 10
II	Сильнотрещиноватые (среднеблочные)	0,1 — 0,5	10 — 2
III	Среднетрещиноватые (крупноблочные)	0,5 — 1	2 — 1
IV	Малотрещиноватые (весьма крупноблочные)	1 — 1,5	1 — 0,65
V	Практически монолитные	Свыше 1,5	До 0,65

сквозных вертикальных трещин в угольном пласте за счет использования сжиженного азота. Цель этого технологического приема заключается в интенсификации процесса раскрытия естественных систем трещин как в породах почвы и кровли угольного пласта, так в самом пласте. Эффект раскрытия достигается за счет увеличения зияния этих трещин при ледообразовании в породах почвы и кровли, примыкающих к угольному пласту.

Естественно, что длительность процесса раскрытия в основном зависит от категории трещиноватости пород почвы и кровли, характеристика которых приведена в таблице.

Как известно угольные месторождения сосредоточены в осадочных породах, которые и представлены в основном песчаниками, известняками, аргиллитами, алевролитами, глинистыми, песчано-глинистыми и углистыми сланцами. Аргиллиты — уплотненные и сцементированные в процессе геологического изменения глинистые породы. Алевролиты — горные породы, сцементированные из мелких песчаных частиц размером до 0,1 мм. Эти породы по представленной выше классификации можно отнести к породам средней трещиноватости, у которых среднее расстояние между трещинами составляет 0,5 —

1 м, а удельная трещиноватость —  $2 \text{ — } 1 \text{ м}^{-1}$ , т.е. на длине магистральной трещины гидроразрыва 6 и 7 находится в среднем 1 или 2 вторичных зародышевых инициирующих трещин 8 и 9, и, соответственно на одном квадратном метре поверхности трещин гидроразрыва может быть сосредоточено от 4 до 6 зародышевых трещин.

Тогда на всей поверхности трещин гидроразрыва, имеющих средний радиус формирования порядка 100 м, может быть сосредоточено  $(1,2\text{—}1,8) \cdot 10^5$  вторичных зародышевых инициирующих трещин.

Естественно, одномоментно раскрыть все это количество вторичных зародышевых трещин в процессе гидроразрыва не представляется возможным. Поэтому процесс раскрытия вторичных зародышевых трещин будет носить циклический характер. В первом цикле раскрывается определенное число естественных систем трещин, которые увеличивают газопроницаемость угольного пласта в вертикальной плоскости и обеспечивают газодинамическую связь между его частями, прилежащими к его почве и кровле. Уже во втором цикле и всех последующих для того, что еще больше повысить проницаемость угольного пласта в процессе вторичного гидроразрыва в вертикальной плоскости приходится трещины, образованные в первом цикле, замораживать жидким азотом, чтобы временно закрыть их и обеспечить нужные условия для вторичного гидроразрыва. Во втором цикле вновь образуется определенное количество вертикальных трещин. Третий и последующие циклы повторяют все технологические операции, описанные во втором цикле, и так до тех пор, пока не будет достигнуто проектное значение газопроницаемости угольного пласта в вертикальной плоскости, а также проектное значение скорости газовыделения из неразгруженной части угольного пласта.

Как показано в работе [4] при реализации такой схемы создания надежной и эффективной газодинамической связи между частями угольного пласта в вертикальной плоскости требуется 50—60 циклов замораживания — размораживания длительностью 20 — 30 минут каждый.

Пространственная конфигурация образующейся системы трещин в почве и кровле угольного пласта и в нем самом определяется как свойствами этих двух сред, так и взаимодействием между прорастающими трещинами. Как было показано выше расстояние между трещинами для принятых значений трещиноватости составляет 0,5 м или 1 м, что значительно больше диаметра трещин, который составляет порядка нескольких миллиметров. Поэтому взаимным влиянием трещин друг на друга можно пренебречь.

Известно из работы [3], что развитие трещины в упругой среде описывается уравнением вида:

$$K_1^2 = E\gamma/(1 - \nu^2), \quad (1)$$

где  $K_1$  — коэффициент интенсивности напряжений для прорастающей трещины,  $E = (1-10) \cdot 10^3$  МПа — модуль Юнга (модуль упругости среды),  $\gamma = (0,1-10)$  Н/м — величина удельной энергии на образование новой поверхности (коэффициент поверхностного натяжения газонасыщенного угольного вещества),  $\nu = 0,3$  — коэффициент Пуассона. Для максимальных значений  $E$ ,  $\gamma$  и  $\nu$  получим значение  $K_1 = 1,05 \cdot 10^6$  Н/м<sup>3/2</sup>.

В свою очередь коэффициент интенсивности напряжений является функцией давления жидкости ( $P_0$ ) в зоне гидроразрыва и давления, создаваемого трещиной в районе прорастающей ( $\sigma_T$ ), и вычисляется по формуле:

$$K_1 = P_0 \cdot (\pi b)^{1/2} - \sigma_T \cdot (\pi b)^{1/2} \quad (2)$$

где  $b$  — полудлина зародышевой трещины (для данного случая это вторичные зародышевые инициирующие трещины 8 и 9, длина которых равна десятой доли от мощности пласта, например, для мощности пласта  $m = 2$  м,  $b = 0,1$  м).

При этом давление, создаваемое трещиной в районе прорастающей, определяется следующим выражением

$$\sigma_T = 2 \cdot P_0 \cdot a \cdot (1 + y^2/(a^2 + y^2)) / \pi x / (a^2 + y^2)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $a$  — полудлина большой трещины (т.е. трещины рассекающей пласт от почвы до кровли,  $a = 1$  м),  $y$  — расстояние

от большой трещины до зародыша (это расстояние в зависимости от удельной трещиноватости принимаем равным или 0,5 м, или 1 м).

При известных значениях  $K_1$ ,  $a$ ,  $b$  и  $u$  определяем значение  $P_0$  (давление жидкости в зоне гидроразрыва) с помощью формулы (2) и учетом соотношения (3), оно равно

$$Z_0 = L_1 \cdot (\pi i)^{1.2} \cdot (1 - 2\phi \cdot (1 + n^2 \cdot (\phi^2 + n^2)) \cdot \pi c \cdot (\phi^2 + n^2)^{1.2}) \quad (4)$$

Для принятых значений величин, входящих в формулу (4) получим для давления жидкости значение равное  $P_0 = 5,85 \times 10^6 \text{ Н/м}^2 = 5,85 \text{ МПа}$ .

Согласно формуле из работы [3] в момент гидроразрыва фильтрация угольного пласта в вертикальном направлении возрастает в сотни и тысячи раз. Эта формула для проницаемости ( $K_T$ ) трещиноватого угольного пласта имеет вид :

$$K_T = \alpha \cdot \Gamma \cdot \delta^3 / 12, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от геометрии трещин.  $\Gamma$  — удельная трещиноватость (1/м),  $\delta$  — раскрытие трещин (м). Для реального значения раскрытия трещины порядка 0,1 мм =  $10^{-4}$  м значение проницаемости, вычисленное по формуле (5)  $K_T = 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 = 2Д$  (два дарси), что является значительной величиной и характеризует угольный пласт в вертикальной плоскости, как развитую фильтрационную систему.

В свою очередь для определения коэффициента фильтрации ( $K_0$ ) воспользуемся его известной зависимостью от величины проницаемости угольного пласта, плотности ( $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ) и динамической вязкости ( $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ) воды. Она имеет вид:

$$K_0 = \rho \cdot g \cdot K_T / 12\mu. \quad (6)$$

Расчеты по формуле (6) дают для коэффициента фильтрации значение равное  $K_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ .

Таким образом, теоретические выкладки и расчеты по ним показывают, что формирование системы сквозных вертикальных трещин в угольном пласте приводит к существенному уве-



личению (на порядок величины и более) проницаемости и коэффициента фильтрации угольного пласта в вертикальной плоскости, что интенсифицирует газодинамическую связь между его частями, расположенными в кровле и почве, и позволяет характеризовать угольный пласт в вертикальной плоскости, как развитую фильтрационную систему.

Формулы (1—6) составляют основу методики расчета проницаемости неразгруженных угольных пластов с системой вертикальных трещин, образованных в их добычной зоне, которая по известным значениям модуля Юнга ( $E$ ), величине удельной энергии на образование новой поверхности ( $\gamma$ ) и коэффициенту Пуассона ( $\nu$ ) позволяет сначала определяется значение коэффициента интенсивности напряжений ( $K_1$ ) для вертикальной прорастающей трещины, затем вычислять значения давления жидкости гидроразрыва, и, наконец, определять значение коэффициента фильтрации ( $K_0$ ), используя известную зависимость его от величины проницаемости угольного пласта, плотности ( $\rho$ ) и динамической вязкости ( $\mu$ ) воды.

В завершении на основе найденных значений давления жидкости гидроразрыва, проницаемости и коэффициента фильтрации делается вывод о возможности формирования системы сквозных вертикальных трещин в угольном пласте и их влияния на газодинамическую связь между его частями, расположенными в кровле и почве, и эффективность извлечения метана из образованной зоны.

### **Заключение**

Таким образом, в ходе исследований получены следующие результаты:

1. Научно обоснован способ повышения гидродинамической связи между частями пласта с образованием в нем устойчивой системы сквозных вертикальных трещин при реализации технологии его заблаговременной добычи


2. Дана оценка влияния системы сквозных вертикальных трещин в угольном пласте на газодинамическую связь между его частями, расположенными в кровле и почве.

3. Разработана методика расчета проницаемости неразгруженных угольных пластов с системой вертикальных трещин, образованных в их добычной зоне.

Эти результаты позволяют не только научно обоснованно реализовать проекты добычи метана из неразгруженных угольных пластов с помощью горизонтальных скважин и отдельной добычной зоны, расположенной между трещинами гидроразрыва, но и эффективно их использовать при добыче метана.

---

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Патент РФ № 1627673, кл.Е 21 В 43/00. Бюл. № 6, 1991.
2. Патент РФ № 2211323 «Способ добычи угольного метана из неразгруженных пластов». Бобин В.А., Бобин А.В. Бюл. № 24, 2003.
3. Бобин В.А. Проект добычи метана из неразгруженных угольных пластов с помощью отдельной добычной зоны, расположенной между трещинами гидроразрыва. ГИАБ, Труды научного симпозиума «неделя горняка-2011», отд. Выпуск № 1, с.211—220.
4. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Извлечение метана из угольных пластов. М., Изд-во МГГУ, 2002, 383 с. 

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

---

Бобин Вячеслав Александрович — Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

