

УДК 622.274.442

## **ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КРАЕВОЙ ЗОНЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА РОСТ ГРАДИЕНТА ГАЗОВОГО ДАВЛЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

Черепова А. Е., студент гр. ХТб-181, 1 курс,  
Романов Д. А., студент гр. ХТб-181, 1 курс,  
Смирнов В. Г., к.ф.-м.н, доцент каф. физики  
Научный руководитель: Дырдин В. В. д.т.н., профессор  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово

Кузнецкий угольный бассейн одно из крупнейших угольных месторождений в мире. Угольные пласты содержат не только твердое вещество, но и легкие углеводородные газы, главным образом, метан. При подземной добыче угля возникает ряд проблем, связанных с неконтролируемым выделением взрывоопасного газа – метана, способного стремительно переходить в газовую фазу. Избыточное содержание метана в атмосфере замкнутого пространства шахт создает опасность аварий, нарушающих слаженную работу шахты и несущих угрозу здоровью и жизни основных рабочих шахты. Высокое содержание газа в призабойном объеме угольного пласта и высокое давление газа являются причинами возникновения опасных газодинамических явлений, таких как внезапные выбросы угля и газа. Мощный внезапный выброс угля и газа с серьезными последствиями произошёл в 1995 году в Карагандинском угольном бассейне на шахте им. В.И. Ленина [1], когда в выработанное пространство шахты было отброшена 640 тонн угля и 550 тысяч кубических метров метана. В 1998 году на той же шахте произошел выброс мощностью 3 250 тонн угля и 1,3 миллиона кубометров метана. Внезапные выбросы угля и газа приводят к разрушению подземных механизмов и надземных построек. Решение данной проблемы может основываться на горнотехнических методах, одним из которых является управление горным давлением и температурой с целью контроля газовыделений [2-6]. Совершенствование методов управления горным и газовым давлением основано на повышении точности расчета газового давления и учете большего количества влияющих факторов.

Добыча метана из угольных пластов является новым сектором углегазовой отрасли России, но в промышленных масштабах еще не реализована. Ресурсы метана в недрах Кузбасса до глубины 1,8 км составляют около 14% от мировых ресурсов метана. Кемеровская область на сегодняшний день располагает потенциалом добычи метана из угольных пластов в объеме 3,0–4,0 млрд. м<sup>3</sup> в год. Развитие данного потенциала возможно только на основе глубоких научных знаниях о процессах, протекающих в угольных пластах.

Основное количество метана в угольном пласте находится в конденсированном, связанном состоянии. Находящийся в угле метан частично раство-

рен в твердом угольном веществе, образуя твердый углегазовый раствор, а часть метана сорбирована на поверхности трещин и пор. По последним научным данным сорбированное состояние метана составляет лишь малую часть от общего содержания метана в угле. Метан в угольных пластах формирует газовые гидраты, стабильность которых обеспечивается при высоком газовом давлении [7]. Нарушение равновесия угольного пласта [4-8], происходящее при ведении горных работ, неизбежно ведет к столкновению с угольным метаном. Выделение метана из угольного пласта основывается на двух последовательных процессах массопереноса: (1) диффузия метана из твердого раствора в фильтрационный объем; (2) фильтрация газа через всевозможные каналы, трещины и поры [2-3] в сторону выработанного пространства. Низкая прочность угля и высокая газоносность пласта являются основными факторами, приводящими к возникновению газодинамических явлений. Вероятность возникновения газодинамических явлений возрастает при высоком градиенте газового давления в краевой зоне. Градиент газового давления определяется многими факторами: фильтрационными свойствами и метаноносностью угольного пласта, свойствами газа, температурой угольного массива.

**Цель работы:** Расчет градиента газового давления в краевой зоне угольного пласта с учетом неоднородности распределения температуры в призабойном пространстве пласта для совершенствования прогноза газодинамических явлений.

На рис. 1 показана схема, на основании которой вычисляем распределение газового давления впереди угольного забоя. Ось  $OX$  направлена от фронта забоя вглубь угольного пласта по оси выработки. Горное давление вышележащих пород создает в краевой зоне угольного пласта зону пластических деформаций угля, зону концентрации напряжений и зону упругих деформаций, состояние которой близко к состоянию ненарушенного угольного пласта. Из глубины угольного пласта в направлении выработки происходит фильтрация метана.

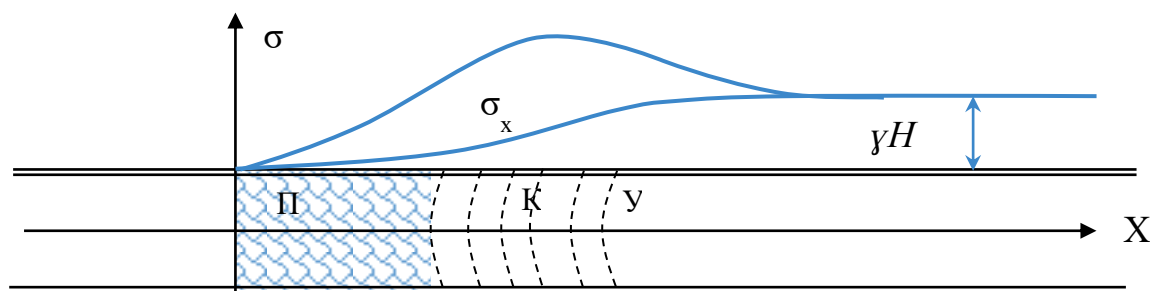


Рис. 1. Схема краевой зоны угольного пласта

Для расчета распределения газового давления в краевой зоне угольного пласта используем стационарное приближение, считая, что на кромке забоя давление всегда равно атмосферному давлению, а на некотором расстоянии  $L$  от забоя сохраняется постоянное давление газа. Обозначим  $P_0$ ,  $P_1$  — атмосферное давление и давление газа на расстоянии  $L$  в глубине угольного пла-

ста. Примем также, что возникающий при этом поток массы газа  $G$ , равный отношению массы метана  $dm$ , прошедшей через площадь  $ds$  за время  $dt$ , имеет постоянную величину в любом сечении впереди забоя и направлен противоположно оси ОХ:

$$G = \frac{dm}{dsdt} = \rho \frac{dV}{dsdt} = \text{const},$$

где масса газа выражена через его плотность и объем:  $dm = \rho dV$ . Для единичной площади сечения поток массы может быть записан через плотность газа  $\rho$  и  $w$  – скорость фильтрационного течения:

$$G = -\rho(x)w(x).$$

Плотность метана связана с давлением –  $P$  и  $T$  – температурой уравнением состояния идеального газа:

$$\rho(x) = \frac{MP}{RT},$$

где  $M$  – молярная масса газа,  $R$  – газовая постоянная. Таким образом, для потока газа можно записать следующее выражение:

$$G = -\frac{M \cdot P(x)}{R \cdot T(x)} w(x) \quad (1)$$

Скорость потока рассчитаем в соответствии с законом Дарси:

$$w(x) = -\frac{k}{\eta} \frac{dP(x)}{dx} \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации;  $\eta$  – вязкость газа;  $\frac{dP(x)}{dx}$  – градиент газового давления в краевой зоне.

**I.** На первом этапе будем считать температуру во всех точках угольного пласта постоянной. Исключая скорость потока из уравнений (1) и (2) получим дифференциальное уравнение относительно давления, которое можно решить методом разделения переменных. В точке с координатой  $x = 0$  давление равно  $P_0$ , а для точки  $x = L$  давление  $P_1$ , тогда получим:

$$\frac{GRT\eta}{Mk} L = \frac{P_1^2 - P_0^2}{2}. \quad (3)$$

Если в качестве границы диапазона принять произвольную координату  $x$  и давление  $P(x)$ , соответствующее данной координате, то можно записать:

$$\frac{GRT\eta}{Mk} x = \frac{P(x)^2 - P_0^2}{2}. \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4) можно выразить распределение давления в краевой зоне угольного пласта через значение давления на границах диапазона:

$$P(x) = \sqrt{P_0^2 + \frac{x}{L}(P_1^2 - P_0^2)}. \quad (5)$$

Чтобы выразить градиент газового давления продифференцируем выражение (5) и получим:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_1^2 - P_0^2}{2LP(x)}. \quad (6)$$

В соответствии с графиком распределения давления газа в краевой зоне угольного пласта (рис. 2) можно сделать вывод, что наибольший градиент газового давления возникает в непосредственной близости к фронту забоя. График построен для значений  $P_0 = 0.1$  МПа,  $P_1 = 2.0$  МПа,  $L = 15$  м.

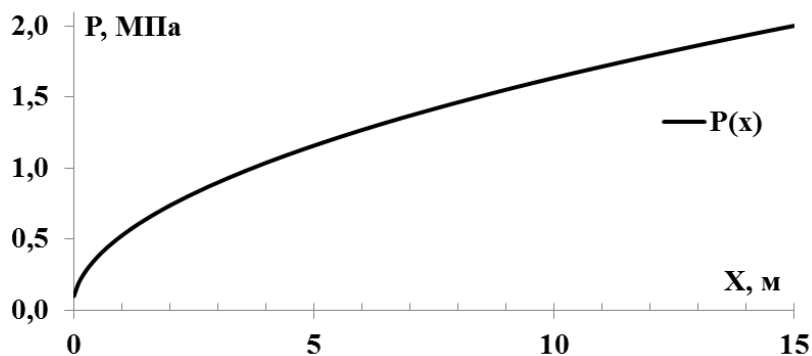


Рис. 2. Зависимость газового давления от координаты  $x$

При выводе формул (5) и (6) мы не учитывали тепловые явления, происходящие в краевой зоне угольного пласта.

**II.** Переход метана в свободную форму сопровождается значительным тепловым эффектом, близким по своей величине к теплоте фазового перехода метана из конденсированного состояния в свободную форму. Оценка температурных эффектов может быть осуществлена на основе анализа теплового баланса испарения метана. Угольные пласты высокой газоносности содержат в себе от 22 до 44 м<sup>3</sup>/тонну угля, что эквивалентно  $\nu$  = от 1 до 2 моль метана на килограмм угля. Молярная теплота перехода метана в газовую фазу из сорбированного состояния равна теплоте испарения  $\lambda = 8.2$  кДж/моль. Теплоемкость угля  $c = 1.2$  кДж/(кг× К). В итоге, изменение температуры угля после испарения метана можно оценить по следующей формуле:

$$\Delta T = \frac{\nu \lambda}{mc}.$$

В соответствии с представленными выше значениями температура угля в глубине пласта может понижаться на 7–14 градусов. Обратим внимание, что для оценки температурных эффектов, в качестве теплоты перехода в газообразное состояние принята теплота испарения метана, однако часть метана в угольном пласте находится в соединениях, теплота разложения которых значительно отличается от теплоты испарения метана. К примеру, теплота разложения газового гидрата метана, в расчете на моль выходящего газа составляет 54 кДж. Значительное изменение температуры краевой зоны угольного пласта происходит в связи с потоком тепла, возникающим при разнице температуры шахтной атмосферы и температуры залегания угольного пласта.

Процессы окисления могут изменить температуру поверхности забоя на несколько десятков градусов.

Распределение температуры, которое возникает в краевой зоне угольного пласта вполне устойчиво. Зона влияния выработки имеет протяженность 5–15 метров вглубь угольного пласта, такая протяженность эквивалентна расстоянию, на которое продвигается забой за 2–7 дней, можно считать, что сложившееся распределение температуры обновляется каждую неделю и не успевает прийти к состоянию, когда температура во всех точках краевой зоны имеет одинаковое значение. При этом будем считать, что в каждом сечении пласта достигается температурное равновесие между фильтрующимся газом и углем.

Для условий Кузбасса обычная температура залегания угольного пласта составляет 280-290 Кельвин. Относительное изменение температуры в глубине угольного пласта может достигать величины  $\Delta T/T_0 \approx 0.1 - 0.2$  и иметь как положительное, так и отрицательное значение. Чтобы вычислить влияние изменения температуры в краевой зоне угольного пласта на градиент газового давления примем распределение температуры в виде линейной функции:

$$T(x) = T_0(1 + \beta x), \quad (8)$$

где  $\beta = \frac{\Delta T}{T_0 L}$ ,  $T_0$  – температура на кромке забоя, ось  $x$  проходит вдоль оси забоя вглубь выработки (рис. 1).

Для идеального газа коэффициент вязкости пропорционален корню квадратному из температуры, и с учетом принятого распределения температуры (8) можно считать, что вязкость газа меняется вглубь угольного пласта:  $\eta = \eta_0 \sqrt{1 + \beta x}$ , а если использовать приближение  $\beta \cdot x \ll 1$ , то коэффициент вязкости можно записать в виде:

$$\eta = \eta_0(1 + 0.5\beta x), \quad (9)$$

где  $\eta_0$  – вязкость метана, соответствующая температуре на кромке забоя.

На основе выражений (1) и (2), подставив зависимости (8) и (9) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{GRT_0\eta_0}{Mk}(1 + 1.5\beta x)dx = \frac{1}{2}d(P^2). \quad (10)$$

Интегрируя данное выражение (10) от кромки забоя до координаты  $L$ , а затем, интегрируя до произвольной координаты  $x$ , получим выражения, аналогичные (3) и (4):

$$\begin{aligned} \frac{GRT_0\eta_0}{Mk} L(1 + 0.75\beta L) &= \frac{P_1^2 - P_0^2}{2}, \\ \frac{GRT_0\eta_0}{Mk} x(1 + 0.75\beta x) &= \frac{P(x)^2 - P_0^2}{2}. \end{aligned}$$

Отсюда рассчитаем распределение давления в краевой зоне угольного пласта, а также градиент газового давления:

$$P(x) = \sqrt{P_0^2 + \frac{x + 0.75\beta x^2}{L + \beta L^2} (P_1^2 - P_0^2)}, \quad (11)$$

$$\frac{dP(x)}{dx} = \frac{1 + 1.5\beta x}{1 + 0.75\beta L} \cdot \frac{P_1^2 - P_0^2}{2LP(x)}. \quad (12)$$

Рассчитанный по формуле (12) градиент газового давления на кромке забоя для случаев, когда температура в глубине угольного пласта ниже, чем температура на кромке забоя ( $\beta = -0.02 \text{ м}^{-1}$ ); когда температура в краевой зоне однородна ( $\beta = 0.00 \text{ м}^{-1}$ ); и когда температура в глубине угольного пласта выше, чем температура на кромке забоя ( $\beta = +0.02 \text{ м}^{-1}$ ), имеет, соответственно, значения: 1.72, 1.33 и 1.09 МПа/м. Изменение градиента газового давления вглубь угольного пласта для этих трех случаев показано на рис. 3.

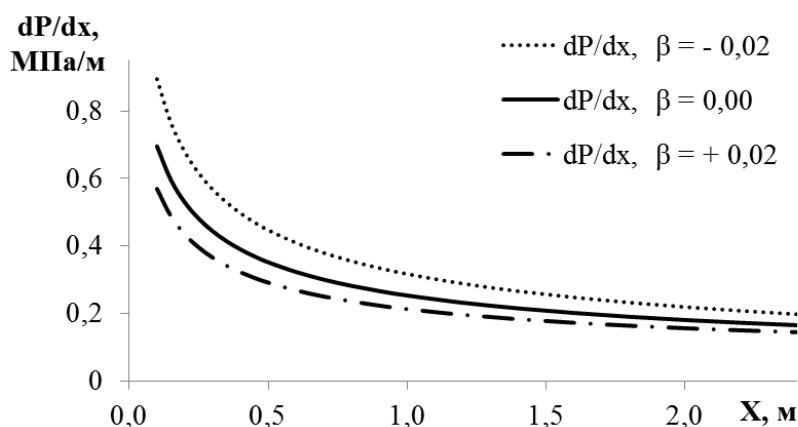


Рис. 3. Градиент газового давления в краевой зоне угольного пласта

Если температура в глубине забоя ниже, чем температура угля вблизи поверхности обнажения, то градиент газового давления в призабойной области увеличивается примерно на 30%, а в случае, когда температура внутри угольного пласта выше, чем температура поверхности забоя, градиент газового давления снижается примерно на 22% относительно градиента давления, рассчитанного в изотермической задаче.

Данный факт можно интерпретировать следующим образом. Высокая температура угольного пласта впереди забоя препятствует фильтрации метана за счет увеличения вязкости и возрастания удельного объема газа. Последующее охлаждение газа на кромке забоя приводит к снижению и объемного расхода газа через поверхность забоя и градиента газового давления. В противоположность этому, когда температура в глубине угольного пласта ниже, чем температура на кромке забоя, увеличивается направленный в сторону забоя поток газа за счет увеличения плотности газа, находящегося в фильтрационном объеме и за счет снижения вязкости. А при повышении температуры вблизи поверхности забоя возрастает вязкость газа, происходит расширение газа, что приводит к возрастанию удельного объема газа и градиента газового давления.

Такое увеличение градиента газового давления в краевой зоне может быть существенным фактором возникновения ГДЯ и как следствие серьезной проблемой, препятствующей подземной добыче угля.

### Литература

1. Бирюков, Ю.М. и др. Каталог внезапных выбросов угля и газа (Карагандинский угольный бассейн) — Калининград: изд. КГТУ, Академия горных наук. — 2009. — 158 с.
2. Черданцев А. М., Сидоренко А. А. Прогноз метановыделения на выемочных участках с учетом влияния геомеханических процессов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — №5. — С. 106–110.
3. Алексеев А. Д. и др. Диффузионно – фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // Журнал технической физики. — 2007. — том 77. — вып. 4. — С. 65–74
4. Слесаренко А. П., Венгеров И. Р. Приближенные решения нелинейных краевых задач фильтрации десорбирующегося метана в неоднородных пластах угля // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. — 2014 (67). — С. 4–9.
5. Минеев, С. П. Особенности оценки метановыделения в выработки выемочного участка / С. П. Минеев, М. В. Лыжков, В. В. Шевченко // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. — 2013. — Вып. 111 — С. 112–119.
6. Звягильский, Е. Л. Управление метановыделением на выемочных участках угольных шахт / Е. Л. Звягильский, Б. В. Бокий, О. И. Касимов // Донецк: Ноулидж, Донецкое отделение. — 2013. — 125 с.
7. Смирнов, В. Г. Влияние разложения газогидрата на рост трещин в массиве угля впереди забоя подготовительной выработки / В. Г. Смирнов, В. В. Дырдин, З. Р. Исмагилов, Т. Л. Ким // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 96–103.
8. Смирнов, В. Г. Трещинообразование в угольных пластах, склонных к внезапным выбросам угля и газа / Смирнов В. Г., Дырдин В. В., Шепелева С. А. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. — № 6 (100). — С. 20–26.