

# ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ВНУТРИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА



Большинство угольных пластов характеризуются неравномерной проницаемостью по разным направлениям. Как правило, это соотносится с направлением главной оси напряжения и расположением кливажей. Проницаемость по основному направлению, как правило, в два раза выше проницаемости по второстепенному направлению, параллельному плоскости напластования, а в отдельных случаях это соотношение может быть гораздо большим. Проницаемость перпендикулярная плоскости напластования обуславливается протяженностью кливажей в пласте. Зачастую наличие прослоек аргиллитов или иных материалов замедляет движение газа через пласт. Проницаемость угольных пластов также меняется в процессе разработки.

Помимо проницаемости следует учитывать и диффузионный поток из угольных массивов в кливажи. Данное явление может представлять собой сочетание фиковской диффузии (массовый поток, определяемый градиентом плотности), диффузии Кнудсена (поток через поры, интенсивность которого прямо пропорциональна разнице давлений и обратно пропорциональна молекулярной массе), и небольших явлений ламинарного потока. Два последних явления практически неотделимы друг от друга, поскольку они оба обуславливаются перепадом давления.

В некоторых угольных пластах условием, ограничивающим уровень добычи газа, является диффузия из твердых пород в кливажи. Это обстоятельство, в частности, актуально для пластов, характеризующихся большим объемом кливажей, их большой шириной и проницаемостью.

Следует помнить, что не все угольные пласты изначально насыщены водой. В некоторых пластах газ, по всей видимости, присутствует в свободном виде. Такие пласты идентичны газовым куполам стандартных нефтяных коллекторов.

## Поток газа в толще угля

Согласно упрощенной общепринятой концепции движения газа в толще угля угольный пласт представляет собой твердый материал, газ внутри которого удерживается за счет сорбции. Толща угля разделена кливажами, трещинами и разломами. На рис. 1 представлено схематическое изображение модели толщи угля с кливажами. Модель показывает диффузию газа из толщи угля в кливажи и движение по ним.



**Ламинарный поток** 1

$$V = - \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

**Диффузия** 2

$$F = -D \frac{dC}{dx}$$

**Рис. 1: Схема движения газа в толще угля**

Где  $V$  – наблюдаемая скорость потока  
 $F$  – интенсивность потока по закону Фика (масса / (единица площади × время))  
 $D$  – коэффициент диффузии (длина<sup>2</sup> / время)  
 $C$  – концентрация (масса / единица объема)  
 $x$  – длина в направлении потока (длина)

Кливажи могут быть насыщены водой, находящейся под давлением, превышающим давление сорбции угля. В этом случае газ находится в состоянии сорбционного равновесия, при этом небольшое его количество растворено в воде. При понижении давления в кливажах в ходе дренажа вода движется по ним в направлении гидравлического градиента. Гидравлический градиент зависит от давления и гравитации (ламинарный поток) и описывается следующим уравнением:

$$V = -\left(\frac{k\rho}{\mu}\right)\left(\frac{d(P/\rho + gz)}{dl}\right)$$

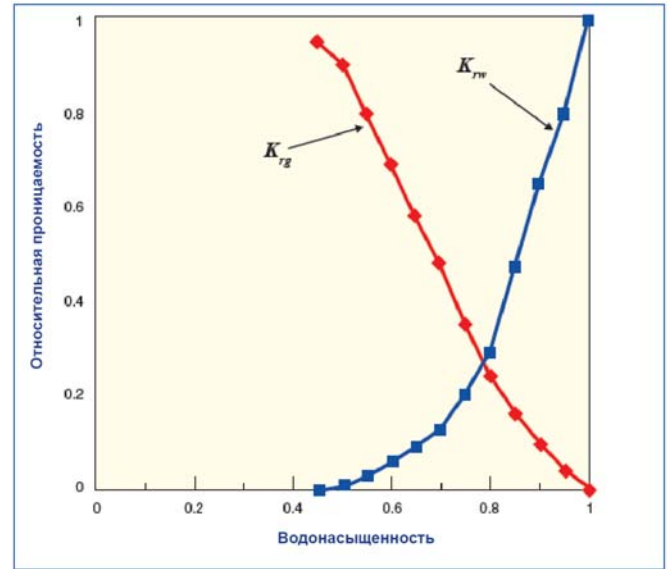
Где:

- $V$  – наблюдаемая скорость потока (расход / единица площади = длина / время)
- $\mu$  – абсолютная вязкость (масса/(длина × время))
- $P$  – давление (масса / (длина × время<sup>2</sup>))
- $\rho$  – плотность жидкости (масса / длина<sup>3</sup>)
- $g$  – ускорение свободного падения (длина / время<sup>2</sup>)
- $z$  – абсолютная отметка (длина)
- $l$  – длина в направлении потока (длина)

## Проницаемость

При падении давления жидкости в толще угля ниже давления сорбции из угля начинают выделяться пузырьки газа, который начинает замещать собой воду в кливажах. Таким образом, эффективная проницаемость угля относительно воды и газа изменяется, поскольку газ и вода препятствуют распространению друг друга. Такое состояние может описываться кривыми относительной проницаемости, пример которых представлен на рис. 2 – для газа ( $K_{rg}$ ) и для воды ( $K_{rw}$ ). Эффективная проницаемость для каждой фазы (вода и газ) рассчитывается путем умножения абсолютной проницаемости на относительную.

Рис. 2: Пример кривых относительной проницаемости



## Действующее напряжение

Относительная проницаемость угля изменяется в зависимости от его насыщенности водой, а абсолютная – от действующего напряжения. Действующее напряжение представляет собой общее напряжение в любом направлении, за вычетом части давления жидкости. Величина этой части зависит от протяженности заполненных жидкостью кливажей.

В тех угольных пластах, где давление жидкости отсутствует, напряжение распространяется непосредственно по кливажу или трещине. Наличие в кливажах жидкости под давлением означает, что эта жидкость принимает часть нагрузки на себя. Уравнение для расчета действующего напряжения выглядит следующим образом:

$$\text{Действующее напряжение} = \text{Общее напряжение} - c \times \text{давление жидкости} \quad 4$$

Где  $c$  зависит от протяженности кливажей, и в большинстве угольных пластов, при увеличении их протяженности стремится к единице.

Уголь является мягкой породой, как правило, характеризующейся наличием сети кливажей. Стенки породы по обеим сторонам кливажа не обладают идеальной совместимостью, и при росте действующего напряжения смыкаются, снижая проницаемость. Как правило, зависимость между проницаемостью и напряжением выражается следующим образом:

$$\log k = \log k_0 - 1/b \times (\text{действующее напряжение}) \quad 5$$

Где:

- $k$  – абсолютная проницаемость угля в любом направлении
- $k_0$  – проницаемость при нулевом действующем напряжении
- $b$  – коэффициент напряжение-проницаемость.

Коэффициент «напряжение-проницаемость» ( $b$ ) представляет собой изменение действующего напряжения, необходимое для изменения значения проницаемости на один порядок.

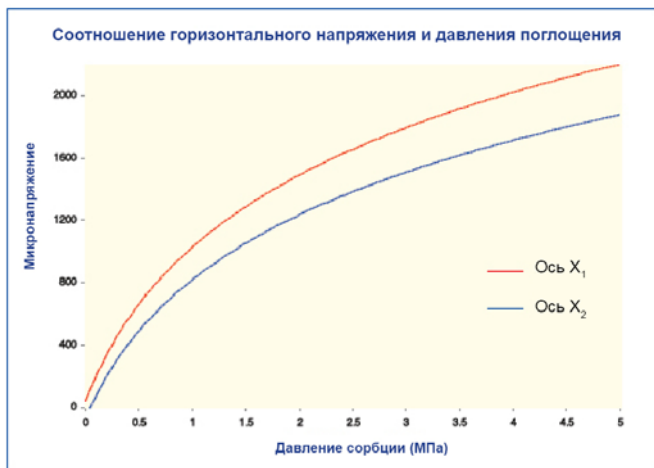
В мягких углях значение  $b$  может быть порядка 3 МПа, тогда как в более твердых – значительно превышать этот показатель.

Если давление жидкости в мягком угле в ходе дренажа меняется на 3 МПа, с учетом того, что коэффициент «напряжение-проницаемость» ( $b$ ) составляет 3 МПа, такое изменение и соответствующий рост действующего напряжения может привести к снижению проницаемости на один порядок.

## Напряжение и усадка

Уголь, в отличие от других пород, обладает свойством усадки при отдаче газа и воды. Данное свойство можно наблюдать, замеряя экземпляр угля при изменении давления газа с помощью точного прибора, такого как микрометр или тензодатчик. Пример изменения горизонтальной деформации при различных значениях давления сорбции показан на рис. 3. Давление сорбции и деформация показаны по осям  $x$ , и  $y$  соответственно. В данном случае при изменении давления сорбции на 3 МПа изменение микродеформации составляет 1500 и 1800 пунктов.

**Рис. 3: Пример изменения горизонтальной деформации (2 оси) в зависимости от давления сорбции**



Усадка угольного пласта обуславливает понижение горизонтального напряжения. При обширной дегазации горизонтальных пластов общее напряжение по вертикали поддерживается за счет нагрузки, создаваемой залегающими выше породами. Однако действующее напряжение по вертикали увеличивается из-за снижения давления жидкости внутри пласта. В случае с напряжением по горизонтали наблюдается иная ситуация. Породы, залегающие выше и ниже пласта, обеспечивают относительно равномерную деформацию. При извлечении жидкости из пласта часть нагрузки передается на уголь.

Увеличение горизонтального напряжения в угле, обусловленное изменением напряжения по вертикали, рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta\sigma'_{h/sw} = \Delta\sigma'_v \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) \quad 6$$

Где:

$\Delta\sigma'_{h/sw}$  – изменение действующего напряжения по горизонтали под действием собственного веса

$\Delta\sigma'_v$  – изменение действующего напряжения по вертикали

$\nu$  – Коэффициент Пуассона

Изменение горизонтального напряжения, обусловленное усадкой, выражается следующим образом:

$$\Delta\sigma'_{sh/1} = \frac{-E}{1-\nu^2} (\Delta\varepsilon_{sh/1} + \nu\Delta\varepsilon_{sh/2}) \quad 7$$

$$\Delta\sigma'_{sh/2} = \frac{-E}{1-\nu^2} (\Delta\varepsilon_{sh/2} + \nu\Delta\varepsilon_{sh/1}) \quad 8$$

Таким образом, формула для расчета изменения действующего напряжения по горизонтали, обусловленного оттоком жидкости, имеет вид:

$$\Delta\sigma'_{h/1} = \Delta P \left( 1 + \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) \right) - \frac{E}{1-\nu^2} (\Delta\varepsilon_{sh/1} + \nu\Delta\varepsilon_{sh/2}) \quad 9$$

$$\Delta\sigma'_{h/2} = \Delta P \left( 1 + \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) \right) - \frac{E}{1-\nu^2} (\Delta\varepsilon_{sh/2} + \nu\Delta\varepsilon_{sh/1}) \quad 10$$

Где:

$\Delta\sigma'_{h/1}$  – изменение действующего напряжения в горизонтальной плоскости по направлению 1

$\Delta\sigma'_{h/2}$  – изменение действующего напряжения в горизонтальной плоскости по направлению 2

$\Delta P$  – изменение давления жидкости

$\sigma_{sh/1}$  – изменение напряжения в горизонтальной плоскости по направлению 1, обусловленное усадкой

$\sigma_{sh/2}$  – изменение напряжения в горизонтальной плоскости по направлению 2, обусловленное усадкой

$\varepsilon_{sh/1}$  – деформация в горизонтальной плоскости по направлению 1, обусловленное усадкой

$\varepsilon_{sh/2}$  – деформация в горизонтальной плоскости по направлению 2, обусловленное усадкой

$\nu$  – Коэффициент Пуассона

$E$  – Модуль Юнга

При отсутствии усадки понижение давления жидкости обуславливает снижение действующего горизонтального напряжения (уравнение 6). При наличии усадки совокупный эффект описывается уравнениями 9 и 10. В отдельных случаях действующее горизонтальное напряжение может, как увеличиваться, так и уменьшаться. Влияние изменения напряжения на проницаемость описывается уравнением 5. При преобладании усадки, вызывающей снижение действующего напряжения проницаемость снижается, и наоборот.

При падении горизонтального напряжения до нуля, дальнейшая усадка обуславливает раскрытие кливажей. Теоретически проницаемость группы раскрытых кливажей, располагающихся параллельно, может быть рассчитана согласно уравнению 11. Данное уравнение эффективно для определения значимости расстояния между кливажами и их эффективной ширины.

$$k = A \left( \frac{a^3}{12} \right)$$

11

Где:

$k$  – проницаемость

$A$  – плотность кливажа на единицу длины

$a$  – ширина кливажа

## Пример практического применения

В реальной ситуации давление жидкости падает в ходе дренажа. Падение давления жидкости обуславливает рост действующего напряжения, и, в результате, снижение проницаемости. При усадке пласта такое снижение проницаемости замедляется, либо, что также возможно, прекращается, и проницаемость начинает расти. В отдельных случаях рост проницаемости достигает таких масштабов, что горизонтальное напряжение пласта падает до нуля, обуславливая раскрытие кливажей и значительное увеличение проницаемости.

На рис. 4 показана примерная ситуация на угольных шахтах Leichhardt в австралийском штате Квинсленд. Из иллюстрации видно, что изначальные значения проницаемости и пластового давления составляли 0,1 миллидарси и 4,2 МПа соответственно. В ходе дренажа давление жидкости упало до 3,8 МПа (давление сорбции), после чего началось выделение газа.

В этом диапазоне давлений проницаемость снижается ввиду увеличения действующего напряжения. Данный характер изменений имел тенденцию к продолжению (синяя линия), однако в реальной ситуации имела место усадка пласта (красная линия), что стало причиной снижения истинного напряжения и увеличения проницаемости до 1 миллидарси при давлении газа, составляющем 2,7 МПа. При таком давлении действующее напряжение в кливажах равно нулю. При дальнейшем понижении давления газа проницаемость резко повышается до 500 миллидарси при давлении 0,5 МПа. Данный случай не является характерным, однако наглядно демонстрирует значение усадки.

Рис. 4: Изменение проницаемости в зависимости от действующего напряжения и усадки. Источник: Gray (1987).

