

3. Научные разработки институтов охраны труда ВЦСПС. – М., 1971.– Вып. 73.– С. 75-78.
4. Вредные вещества в промышленности. Т. II. Органические вещества: справочник для химиков, инженеров и врачей / под ред. Н.В. Лазарева. – 7-е изд., пер. и доп. – Л.: Химия, 1976. – 624 с.
5. Сальников, В.К. Испытания покрытий из пенопластов на пожарную опасность / В.К. Сальников, А.И. Исачкин // Сб. науч. тр. ДонУГИ. – Донецк, 1977. – № 63. – С. 226-233.
6. Канин, В.А. О механизме отверждения карбамидной смолы изометилтетрагидрофталевым ангидридом / В.А. Канин, А.В. Пашенко // Полімерний журнал. – 2007. – XXIX, № 3. – С. 208-213.
7. Технология упрочнения горных пород, углей и грунтов на основе использования синтетических материалов. Методические указания: КД 12.01.001-2000. - К.: Минтопэнерго Украины, 2001. – 25 с.

УДК 622.822.225

Асп. И. Г. Старикова
(ИФГП НАН Украины)

МАССОПЕРЕНОС КИСЛОРОДА В ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УГЛЯХ

У роботі розглянуто масоперенос кисню в газонасиченій вугільній речовині з урахуванням його сорбції вугіллям. У рамках запропонованої моделі масопереносу встановлено, що глибина проникнення кисню у вугільний масив пропорційна квадратному кореню з коефіцієнта масопереносу кисню і обернено пропорційна константі швидкості сорбції.

MASS TRANSFER OF OXYGEN IN GAS-SATURATED COAL

The paper considers oxygen mass transfer in a gas-saturated coal substance with accounting of gas sorption by coal. Within the frameworks of the proposed mass transfer model, it was established that the penetration depth of oxygen into a carbon array is proportional to the square root of the mass transfer coefficient of oxygen and inversely proportional to the constant of sorption rate.

Возникновение и развитие процесса самонагрева ископаемого угля определяется процессом поглощения (сорбцией) углем кислорода с последующим окислением угля и выделением тепла. Степень окисления, при прочих равных условиях, зависит от фракционного состава угля и его метанонасыщенности. В литературе и нормативных документах в основном приведены результаты по кинетике сорбции кислорода мелкофракционным классам ископаемых углей с содержанием метана, не превышающим 10-15% от их газоносности. В то же время установлено [1,2], что при газонасыщенности угольных фракций более 5 м³/т процесс окисления их кислородом не активизируется. Этот результат наиболее свойствен угольным целикам, оставленным в зонах геологических нарушений и целикам, прилегающим к горным выработкам. Интенсивность газовыделения таких объектов прямо пропорциональна количеству метана, пористости угля, эффективной диффузии и обратно пропорциональна квадратному корню из времени дегазации [3].

Стандартная оценка времени десорбции метана из системы микроблоков при их размере $R \approx 5 \cdot 10^{-5}$ м и коэффициенте диффузии $D \approx 10^{-6}$ м²/с показывает практически мгновенный выход метана из области целика. Время выхода основного метана, находящегося в закрытых порах и растворенного в полимерной структуре угля, пропорциональны квадрату линейного размера целика и может составлять годы. Поэтому активация угольного вещества кислородом может осуществляться только при десорбции основного метана до величин менее 5 м³/т. с. б.

Одним из факторов, интенсифицирующих десорбцию основного метана из угля по механизму фильтрации и, соответственно, ускорение сорбции углем кислорода, является степень разрушения угольного целлика и связанное с этим явлением многократное увеличение его контактирующих поверхностей.

Механизм прохождения кислорода внутрь угольного пласта состоит в наложении двух процессов - фильтрации и диффузии. Во время движения молекул кислорода по транспортным каналам они сталкиваются друг с другом, со стенками канала и с молекулами метана.

Частота столкновений ω молекул кислорода при прохождении канала равна сумме частоты соударений молекул друг с другом и со стенками канала ω_v и частоты соударений с молекулами метана ω_m .

$$\omega = \omega_v + \omega_m,$$

а так как эти частоты обратно пропорциональны коэффициентам фильтрации и диффузии соответственно, то можно записать:

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_f} + \frac{1}{D_m} \quad (1)$$

где D – коэффициент массопереноса кислорода в пласте, D_f – коэффициент фильтрации, D_m – коэффициент диффузии кислорода в метане.

Коэффициент диффузии кислорода в метане (тяжелого газа в легком, см. [4]) вычисляется по формуле:

$$D \approx \frac{T^{3/2}}{\sigma P m} \quad (2)$$

где σ – сечение рассеяния кислорода на метане, $\sigma = (d_1 + d_2)^2$, d_1 - диаметр молекулы метана, d_2 - диаметр молекулы кислорода, P – давление метана в фильтрационном объеме угля, m – масса молекулы метана, T – температура угольного пласта.

Из этой формулы следует, что чем больше давление метана в фильтрационном объеме угля, тем коэффициент диффузии кислорода меньше. Это значит, что метан препятствует проникновению кислорода в угольный пласт, то есть уменьшает его пожароопасность, хотя, казалось бы, метан горючий газ и должен провоцировать пожар.

Оценочные значения коэффициента фильтрации и диффузии:
 $D_m \approx 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_f \approx 10^{-7} \div 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$.

Значение коэффициента фильтрации сильно зависит от диаметра каналов и варьируется в связи со структурой угля. Для рыхлых углей $D_f \approx 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, для плотных углей $D_f \approx 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

В формуле (1) при большом коэффициенте фильтрации его обратная величина мала, и тогда основную роль в проникновении кислорода в пласт играет диффузия (задержка кислорода метаном играет основную роль). Если же фильтрация мала, то его обратная величина велика и основную роль играет фильтрация (задержка кислорода происходит не из-за метана, а ввиду малой пропускной способностью каналов).

В проникновении кислорода немаловажную роль играет также взаимодействие кислорода с углем. Основной характеристикой процесса взаимодействия кислорода с углем является константа скорости сорбции $k(T)$ [5]. Эта величина экспоненциально, по закону Аррениуса, зависит от температуры. Однако на небольшом интервале, от 20^0 С до 120^0 С , эту зависимость можно считать линейной, $k(T) = U_0 + E(T - T_0)$, где U_0 и E находят из эксперимента. Соответствующие

данные группируются вокруг значений $U = 0.83 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}}$,
 $E = 0.3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$.

Целью данной работы являлось установление закономерностей проникновения кислорода в газонасыщенный угольный пласт. Для этого необходимо записать уравнение диффузии с учетом взаимодействия угля с кислородом. Все вышеприведенные соображения позволяют найти вид уравнения, определяющего распределение кислорода по простиранию угольного пласта.

Движущей силой процесса проникновения кислорода в пласт является градиент химического потенциала кислорода μ . Он имеет следующий вид [6]:

$$\mu = T \ln c \quad (3)$$

где T - температура угольного пласта (в энергетических единицах она же температура газа), c – объемная доля кислорода в газе, заполняющем фильтрационный объем.

Скорость потока кислорода равна взятому со знаком минус произведению подвижности M на градиент химического потенциала.

После соответствующих преобразований и использования соотношения Эйнштейна, $D = MT$, получим уравнение диффузионного типа для объемной доли (концентрации) кислорода.

$$\frac{\partial c}{\partial T} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - k(T)c, \quad (6)$$

где x – координата вдоль простирания пласта.

Правая часть полученного уравнения состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое описывает проникновение кислорода в угольный пласт (приход кислорода), второе учитывает, что взаимодействие кислорода с углем является химической реакцией первого порядка [1] (уход кислорода).

Начальное условие к уравнению (6):

$$c(x,0) = 0, \quad (7)$$

Граничное условие состоит в том, что на границе пласта с выработанным пространством концентрация кислорода совпадает с его концентрацией в воздухе:

$$c(0,t) = c_0, \quad (8)$$

Обезразмериваем уравнение таким образом:

Время измеряет в единицах $[k(T)]^{-1}$, координату в единицах $\sqrt{\frac{D}{k(T)}}$.

Уравнение (6) решается стандартным путем преобразования Лапласа по времени, в результате приходим к представлению решения в интегральном виде (с учетом начального и граничного условий):

$$c(x,t) = c_0 e^{-x} - \frac{2c_0 e^{-t}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin ux e^{-u^2 t} u du}{1+u^2}, \quad (9)$$

В записи решения (9) координата и время – безразмерны; соответствующие масштабы указаны выше. Из (9) видно, что на больших, по сравнению с $[k(T)]^{-1}$ временах, интегральным членом можно пренебречь. Это означает, что устанавливается стационарная концентрация, кислород проникает в пласт на ограниченную глубину, вне которой концентрацию можно считать равной нулю. Численные значения величин $k(t)$ [5] показывают, что кислород проникает за время порядка суток на глубину порядка двух-трех метров, после чего его дальнейшее проникновение прекращается. Вследствие этого самонагревание пласта может произойти лишь в его приграничной части.

Результаты численных расчетов пространственно-временной зависимости концентрации кислорода в компактном угольном массиве (согласно (9)) приведены на рисунке 1. Из рис. 1 видно, что выход на стационарный режим происходит за времена (безразмерные) порядка единицы, то есть за $[k(T)]^{-1}$; глубина проникновения кислорода в пласт порядка единицы (то есть в размерном виде, порядка $\sqrt{\frac{D}{k(T)}}$).

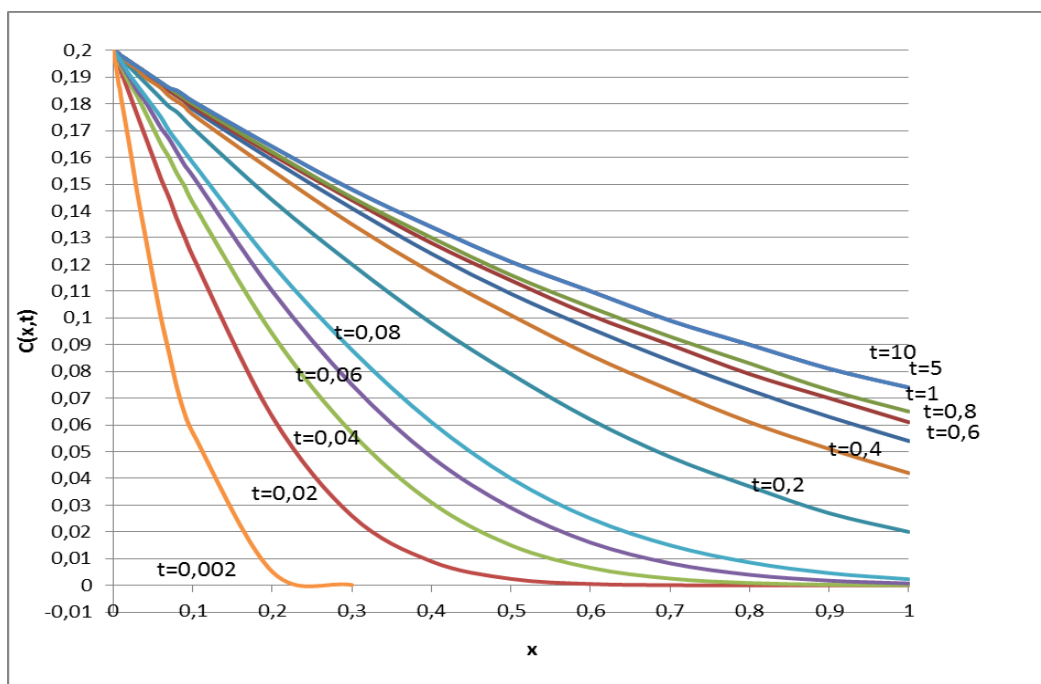


Рис. 1 – Результаты численных расчетов пространственно-временной зависимости концентрации кислорода в компактном угольном массиве

Выводы.

1. Проникновение кислорода в газонасыщенный угольный массив происходит лишь на ограниченную глубину, которая пропорциональна квадратному корню из коэффициента массопереноса кислорода и обратно пропорциональна константе скорости сорбции.
2. Остаточный метан препятствует проникновению кислорода в угольный пласт и тем самым снижает возможность самонагревания угля.
3. Установлено, что время проникновения кислорода в пласт при температурах от 20°C до 100°C находится в пределах суток, то есть более ускоренно по сравнению с характерным временем самонагревания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселовский, В.С. Самовозгорание промышленных материалов / Веселовский В. С. - М. Недра. 1964.
2. Саранчук, В.И. Теоретические основы самовозгорания угля/Саранчук В. И., Баев Х. А. М. Недра, 1976 – 205.
3. Брюханов, В.И., Расследование и предотвращения аварий на угольных шахтах / К. К. Бережинский, В. И. Брюханов и др.Т. (Макеевка-Донбасс), 2004 – 548 с.
4. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. V. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М.:Физматлит. 2002. – 616 с.
5. Глузберг, Е.И. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров / Глузберг Е. И. М.: Недра, 1986. – 161 с.
6. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т. X. Физическая кинетика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М.:Физматлит. 2002. – 616 с.