

## **ГЕОМЕХАНИКА**

УДК 658.382.2

### **ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КИСЛОРОДА С УГЛЕМ В АДСОРБЕРАХ ОТКРЫТОГО И ЗАКРЫТОГО ТИПА**

Н.М. Качурин, А.В. Волберг, А.Н. Качурин, В.П. Стась

*Получены зависимости, которые позволяют полностью воспроизвести процесс взаимодействия кислорода с углем, протекающий в адсорберах открытого и закрытого типа. Рекомендуется данные зависимости использовать в качестве математических моделей для решения обратных задач при оценке численных значений константы скорости при низкотемпературном окислении угля и углового коэффициента изотермы сорбции Генри.*

*Ключевые слова: низкотемпературное окисление, уголь, кислород, адсорбер, математическая модель, сорбция, константа низкотемпературного окисления.*

Рентгеноструктурный анализ углей показал, что приемлема следующая модель структуры угля. Макромолекулы углеродной составляющей угольного вещества представляют собой двумерные ароматические системы регулярного строения, расположенные на деформированных поверхностях, связанных между собой ковалентными связями. Нерегулярность укладки конденсированных систем приводит к появлению межмолекулярных плоскостей, которые способны сорбировать кислород на своих поверхностях. Справедливость этой гипотезы подтверждается наличием размытого максимума интенсивности отраженного излучения на рентгенограмме, соответствующего интервалу межплоскостных расстояний от 0,25 до 1,2 нм [1 – 3].

Таким образом, будет происходить физическая адсорбция кислорода на этих поверхностях, при этом его молекулы удерживаются на расстоянии 0,3 нм у активных поверхностей силами Ван-дер-Ваальса. Затем начинается процесс хемосорбции кислорода углем, переходящий в реакцию низкотемпературного окисления. Далее для некоторой части молекул

кислорода будет происходить хемосорбция, при которой адсорбированные молекулы удерживаются на расстоянии порядка 0,1 нм у активной поверхности силами химического сродства, аналогичными силами валентной связи между атомами в молекуле кислорода, в результате чего происходит распад молекул кислорода, на атомы и радикалы, и обмен электронами с атомами углерода. Затем следует десорбция и отвод продуктов реакции от активной поверхности [4 – 5].

В лабораторных условиях для определения окислительной активности угля по интенсивности поглощения кислорода углем при низкотемпературном окислении необходимо исследовать в кинетической области угольные частицы диаметром не более 0,1 мм, так как при этом влиянием диффузии кислорода в угле можно пренебречь [6 – 7].

Предположим, что нам удалось обеспечить взаимодействие кислорода, находящегося в газовой смеси, с частицами угля, находящимся в адсорбере, в кинетической области процесса. Возможные технологические схемы лабораторных исследований процесса низкотемпературного окисления угля реализуются в адсорберах открытого или закрытого типа (рис. 1 и 2).

Первая схема предусматривает поддержание постоянной концентрации кислорода в адсорбере. При второй схеме концентрация кислорода в адсорбере будет уменьшаться от некоторого начального значения  $C_0$  до нуля. Рассмотрим каждую из этих схем.

*1 схема эксперимента:* кислород + уголь в адсорбере открытого типа → комплекс «кислород-уголь».

Уравнение кинетики сорбции имеет вид [8 – 9]

$$\frac{da}{dt} = K(a_p - a), \quad (1)$$

где  $a$  – объем кислорода, сорбированного единичной массой угля;  $a_p$  – равновесная сорбция кислорода углем.

Тогда для концентрации кислорода  $c_k$ , изменяющейся от 0 до 1, можно записать, что равновесная сорбция определяется по формуле  $a_p = \Gamma c_k$  и при  $c_k = c_g = \text{const}$ , где  $\Gamma$  – константа Генри (угловой коэффициент линейного участка изотермы сорбции кислорода углем);  $c_g$  – концентрация кислорода в атмосферном воздухе; получим частный случай уравнения (1)

$$\frac{da}{dt} = K(\Gamma c_g - a). \quad (2)$$

Интегрируя уравнение (2), найдем выражение для сорбции кислорода углем, когда справедливо использование изотермы сорбции Генри,

$$a(t) = \Gamma c_g \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a_0}{\Gamma c_g} \right) \exp(-Kt) \right], \quad (3)$$

где  $a_0 = \text{const}$  – начальная сорбция кислорода, обусловленная тем, что процесс поглощения кислорода может пойти гораздо раньше, чем уголь окажется в адсорбере и тогда  $a(0) = a_0 = \text{const}$ .

Определим скорость сорбции  $U$ :

$$U = \frac{da}{dt} = \Gamma C_0 K \left( 1 - \frac{a_0}{\Gamma C_0} \right) \exp(-Kt). \quad (4)$$

Если  $a_0 = 0$ , то  $U = \Gamma c_g K \exp(-Kt)$ , а при  $t = 0$   $U|_{t=0} = \Gamma c_g K$ . Тогда  $U/c_g|_{t=0} = U_0 = \Gamma K$ , где -  $U_0$  начальная скорость сорбции кислорода углем при концентрации кислорода в газовой смеси, равной 1.



**Рис. 1. Технологическая схема лабораторных исследований процесса диффузии кислорода в сферическую угольную частицу в адсорбере открытого типа**

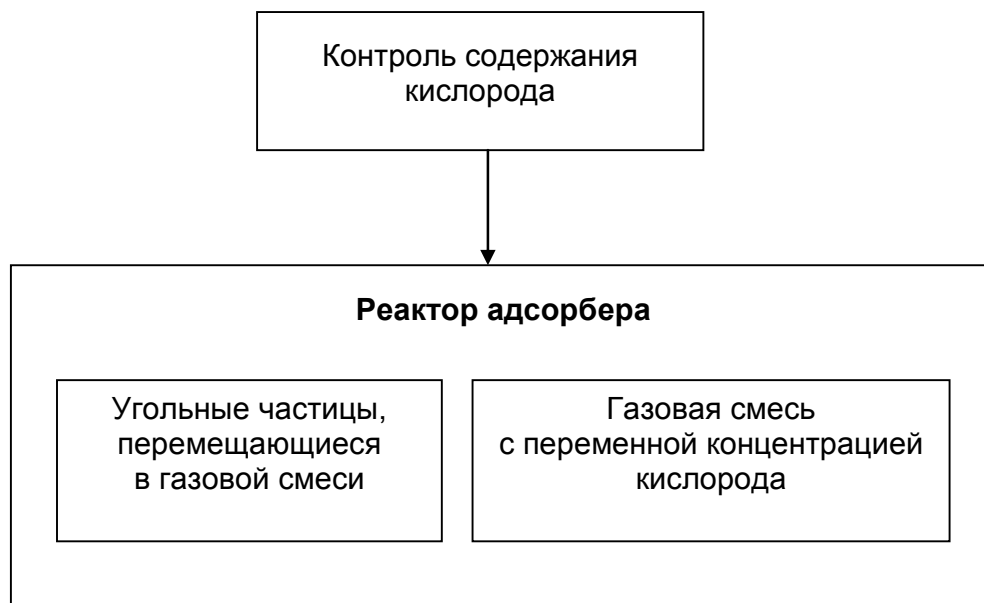
Следовательно,

$$U_0 = \frac{U(0)}{c_g} = \Gamma K = \frac{a_p K}{c_g}. \quad (5)$$

Значение  $U_0$ , которое определяется при давлении 0,1 МПа и температуре  $t_A = 25$  °С, где  $t_A$  – температура термодинамической системы «газовая смесь - уголь», численно равная температуре газовой смеси в адсорбере, которую принято обозначать  $U_{25}$ .

При малых значениях времени  $\exp(-Kt) \approx 1 - Kt$ , тогда при  $a_0 = 0$  получим, что

$$a(t) = \Gamma c_g K t = U_0 c_g t. \quad (6)$$



**Рис. 2. Технологическая схема лабораторных исследований процесса диффузии кислорода в адсорбере закрытого типа**

Лабораторные эксперименты показывают, что линейность функции  $a(t)$  наблюдаются на временном интервале от десятков часов до десятков суток.

2 схема эксперимента: кислород + уголь в адсорбере закрытого типа → комплекс «кислород – уголь».

Уравнение кинетики сорбции имеет вид [9 – 10]

$$\frac{da}{dt} = K(\Gamma c_k - a), \quad (7)$$

где  $c_k = C(t)$ ;  $a(0) = a_0 = \text{const}$ .

Уравнение (7) решим с использованием преобразования Лапласа. Изображение уравнения (7) после применения интегрального преобразования Лапласа будет иметь вид  $sa_L - a_0 = K\Gamma C_L - Ka_L$ , где  $a_L$ ,  $C_L$  - изображения функций  $a(t)$  и  $C(t)$  после совершения преобразования Лапласа;  $s$  - комплексный параметр преобразования Лапласа.

Изображение решения уравнения (7) можно записать как  $a_L = K\Gamma(K + s)^{-1} C_L$ . Тогда, переходя к оригиналу, решение уравнения (4) получим в следующем виде:

$$a(t) = a_0 \exp(-Kt) + K\Gamma \exp(-Kt) \int_0^t C(\tau) \exp(-K\tau) d\tau. \quad (8)$$

Предположим, что концентрация кислорода в адсорбере убывает экспоненциально (это, как правило, подтверждается экспериментально), то есть

$$C(t) = C_0 \exp(-k_a t), \quad (9)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация кислорода в газовой смеси;  $k_a$  – коэффициент, учитывающий скорость уменьшения концентрации кислорода в адсорбере закрытого типа, 1/с.

Тогда, подставив зависимость (9) в выражение (8) и выполнив интегрирование, получим следующую зависимость:

$$a(t) = \left\langle a_0 + \frac{K\Gamma C_0}{k_a + K} \left\{ 1 - \exp[-(k_a + K)t] \right\} \right\rangle \exp(-Kt). \quad (10)$$

Если закон изменения концентрации кислорода в адсорбере не известен, то математическая модель сорбции кислорода углем будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dt} &= K(\Gamma c_a - a), \\ \frac{dc_a}{dt} &= k_a(\Gamma c_a - a), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $c_a$  - концентрация кислорода в адсорбере закрытого типа.

Начальные условия в этом случае имеют вид  $a(0) = a_0 = \text{const}$ ,  $c_a(0) = C_0 = \text{const}$ . Решение системы уравнений (11) для этих условий также целесообразно получить, используя преобразование Лапласа. Решение системы уравнений (11) получено в виде

$$a(t) = \frac{\Gamma(C_0 K + a_0 k_a)}{K + k_a \Gamma} + \frac{(a_0 - C_0 \Gamma) k_a}{K + k_a \Gamma} \exp[-(K + k_a \Gamma)t], \quad (12)$$

$$c_a(t) = \frac{C_0}{K + k_a \Gamma} \left\{ K + k_a \Gamma \exp[-(K + k_a \Gamma)t] \right\}. \quad (13)$$

Зависимости (12) – (13) позволяют полностью воспроизвести процесс, протекающий в адсорбере закрытого типа. Поэтому данные зависимости, а также формулы (3), (4), (6) и (10) целесообразно использовать в качестве математических моделей для решения обратных задач при оценке численных значений константы скорости низкотемпературного окисления и углового коэффициента изотермы сорбции Генри. При этом тип адсорбера необходимо обосновывать исходя из конкретных целей лабораторных исследований.

## Список литературы

1. Захаров Е.И., Качурин Н.М., Комиссаров М.С. Самовозгорание углей. Тула. Издательство ТулГУ. 2010. 318 с.
2. Обеспечение безопасности технологического процесса отработки угольных месторождений/ Н.М. Качурин, Л.Э. Шейнкман, А.Е. Пушкарёв, Р.А. Ковалев // Известия Тульского государственного университета. Сер. Естественные науки. 2012. № 1-2. С. 142-148.
3. Склонность углей к низкотемпературному окислению и оценка опасности возникновения эндогенных пожаров/ Н.М. Качурин, А.Ю. Ермаков, В.И. Ефимов, А.В. Волберг // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 4. С. 36-39.
4. Определение местоположения очага самовозгорания в угольном массиве/ Н.М. Качурин, А.Ю. Ермаков, В.И. Ефимов, А.В. Волберг // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 3. С. 44-46.
5. Процессы тепломассообмена на породных отвалах шахт Кузбасса/ Н.М. Качурин, С.А. Воробьев, Л.Л. Рыбак, Р.В. Сидоров // Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2015. № 2. С. 48-56.
6. Качурин Н.М., Захаров Е.И. Температура угольного слоя в аэродинамически активной зоне обрушения // Известия вузов. Горный журнал. 1982. № 9. С. 61-65.
7. Способ определения окислительной активности углей и устройство для его осуществления / Соколов Э.М., Качурин Н.М., Захаров Е.И., Шкловер С.В. // А.с. 1090080 СССР, МКИ<sup>3</sup> 01 № 7/14, 01 № 33/22. Опубл. 15.12.83. Бюл. № 46. 6 с.
8. Захаров Е.И., Качурин Н.М., Панферова И.В. Прогноз самовозгорания угля / Совершенствование способов борьбы с эндогенными пожарами. Сб. ст. // Донецк, 1987. С. 10-11.
9. Качурин Н.М., Рожков В.Ф., Симанкин А.Ф. Фильтрация воздуха в плоских породных отвалах // Известия вузов. Горный журнал. 1985. № 12.
10. Соколов Э.М., Качурин Н.М., Кузнецов А.А. Аэродинамические процессы и протяженных выработках углекислитообильных шахт // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 1982. № 8. С. 52.

*Качурин Николай Михайлович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Волберг Александр Владимирович, директор, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Россия, Москва, Сибирский НИИ Углеобогатения,*

*Качурин Александр Николаевич, канд. техн. наук, инж., [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

Стась Виктор Павлович, асп., [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет

*PHYSICAL MODEL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION INTERACTING OXYGEN WITH COAL IN ADSORBERS OF OPEN AND CLOSED TYPE*

*N.M. Kachurin, A.V. Volberg, A.N. Kachurin, V.P. Stas*

*Dependences were gotten which making it possible completely to reproduce the process of interacting oxygen with coal in adsorbers of open and closed type. It's recommended using the dependences as mathematical models for solving inverse problems by evaluating numerical volumes of low-temperature oxidation rate constant and angular coefficient of Henry adsorption isotherm.*

*Key words: low-temperature oxidation, coal, oxygen, adsorber, mathematical model, sorption, low-temperature oxidation rate constant.*

*Kachurin Nikolai Michailovich, Doctor of Sciences, Full Professor, Head of a Chair, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Volberg Alexander Vladimirovich, Director, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Moscow, Siberian Coal Beneficiation Institute,*

*Kachurin Alexander Nikolaevich, Candidate of Technical Science, Engineer, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Stas Viktor Pavlovich, Post Graduate Student, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University*

Reference

1. Zaharov E.I., Kachurin N.M., Komissarov M.S. Samovozgoranie uglej. Tula. Izdatel'stvo TulGU. 2010. 318 s.
2. Obespechenie bezopasnosti tehnologicheskogo processa otrabotki ugol'nyh mestorozhdenij/ N.M. Kachurin, L.Je. Shejnkman, A.E. Pushkarjov, R.A. Kovalev // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki. 2012. № 1-2. S. 142-148.
3. Sklonnost' uglej k nizkotemperaturnomu okisleniju i ocenka opasnosti voznikovenija jendogennyh požarov/ N.M. Kachurin, A.Ju. Ermakov, V.I. Efimov, A.V. Volberg // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2016. № 4. S. 36-39.
4. Opredelenie mestopolozhenija ochaga samovozgoranija v ugol'nom massive/ N.M. Kachurin, A.Ju. Ermakov, V.I. Efimov, A.V. Volberg // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2016. № 3. S. 44-46.
5. Processy teplomassoobmena na porodnyh otvalah shaht Kuzbassa/ N.M. Kachurin, S.A. Vorob'ev, L.L. Rybak, R.V. Sidorov // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle. 2015. № 2. S. 48-56.
6. Kachurin N.M., Zaharov E.I. Temperatura ugol'nogo sloja v ajerodinamicheski aktivnoj zone obrushenija // Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal. 1982. № 9. S. 61-65.
7. Sposob opredelenija okislitel'noj aktivnosti uglej i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / Sokolov Je.M., Kachurin N.M., Zaharov E.I., Shklover S.V. // A.s. 1090080 SSSR, MKI3 01 № 7/14, 01 № 33/22. Opubl. 15.12.83. Bjul. № 46. 6 s.

8. Zaharov E.I., Kachurin N.M., Panferova I.V. Prognoz samovozgoranija uglja / Sovershenstvovanie sposobov bor'by s jendogennymi pozharemi. Sb. st. // Doneck, 1987. S. 10-11.

9. Kachurin N.M., Rozhkov V.F., Simankin A.F. Fil'tracija vozduha v ploskih porodnyh otvalah // Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal. 1985. № 12.

10. Sokolov Je.M., Kachurin N.M., Kuznecov A.A. Ajerodinamicheskie processy i protjazhennyh vyrabotkah uglekislotobil'nyh shaht // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal. 1982. № 8. S. 52.

УДК 622.457.2

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД КРОВЛИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПОДМОСКОВНОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

В.М. Логачева, В.А. Мишанова

*Рассмотрены геологические и геоэлектрические характеристики углевлещающих пород (кровель) Подмоскoвнoгo угольнoгo бассейна. Приведены данные электрического сопротивления каждого из наиболее распространенных литотипов. Сделан вывод о основополагающих для электрометрического прогнозирования геоэлектрических характеристик пород.*

*Ключевые слова: Подмоскoвнoгo угольнoгo бассейн, углевлещающие породы, литотипы, геоэлектрические характеристики.*

Моссбасс, так же как и содержащая его в своем составе Московская синеклиза имеет горизонтально-слоистую структуру имеющую понижение к югу. Надугольный комплекс имеет водоносный горизонт, литифтирован, дифференцирован по физико-механическим свойствам и имеет в своём составе ряд нарушений разнообразных генетических типов и морфологии. Их наличие приводит к прорывам пльвунов и воды в лавы, благодаря чему нагрузка на эту лаву падает в 3-5 раз.

Относительно очистных забоев в основу этой единой классификации легло понятие управляемости кровли, продемонстрированное в табл. 1. Понятие «управляемость кровли» было выбрано за свою универсальность и информативность. Так, например, трудноуправляемые кровли выделяются по фактору тяжести нагружения и устойчивости нижних слоёв одновременно [1, 2].

Среди песков наибольшее распространение получили мелкозернистые, с диаметром зерен 0,05 – 0,25 мм, алевроиты – промежуточная порода между песками и глинами с размерам частиц от 0,07 до 0,10 мм, которые приурочены к верхним горизонтам углесодержащей толщи, в основном в