

УДК622.831.622:831.325

**Московский О.В.**, аспирант  
(ОП «Шахта им. Ф.Э. Дзержинского»  
ГП «Дзержинскуголь»)

**Гаврилов В.И.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОНАСЫЩЕННОСТЬ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА**

**Московський О.В.**, аспірант  
(ВП «Шахта ім. Ф.Е. Дзержинського»  
ДП «Дзержинськвугілля»)

**Гаврилов В.І.**, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.  
(ІГТМ НАН України)

## **ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ДІЇ НА ГАЗОНАСИЧЕНІСТЬ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА**

**Moskovskiy O.V.**, Doctoral of Student  
(SE «Mine name by F.E. Dzerzhynskogo»  
SE« Dzerzhynskvugillia»)

**Gavrilov V.I.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **INFLUENCE HYDRODYNAMIC IMPACT ON GASSY COAL SEAMS**

**Аннотация.** В статье приведены результаты лабораторных исследований кинетических параметров взаимодействия угля и газа на угольных пробах, отобранных из пласта  $i_3^1$  ш/у «Суходольское-Восточное» с природной газоносностью 22,5-27 м<sup>3</sup>/т с.б.г.м. в процессе проведения гидродинамического воздействия методом ЭПР. Важным методическим отличием проведенных работ является переход от оценки интенсивности сигнала по особым точкам спектра к оценке по площади под кривой поглощения СВЧ энергии. Это позволило учесть изменение ширины сигнала ( $\Delta H$ ) и формы кривой при расчете концентрации парамагнитных центров (КПМЦ). В результате анализа получены данные о влиянии гидродинамического воздействия на концентрацию парамагнитных центров в угле разных фракций, распределение предельной сорбционной способности угольного вещества по длине обработанной зоны. Установлено, что в результате гидродинамического воздействия в угле снижается содержание активных, способных к взаимодействию с метаном парамагнитных центров, в результате чего снижается предельная сорбционная способность угольного вещества и повышается его газопроницаемость, а, следовательно, увеличивается объем выхода метана из пласта. Для оценки длительности процесса сорбционно-десорбционного взаимодействия предложен показатель постоянная времени протекания процесса  $T_N$ , характеризующий нарушенность угольного пласта.

**Ключевые слова:** кинетические параметры, гидродинамическое воздействие, высоко-частотная энергия, парамагнитные центры, сорбционная способность, газопроницаемость.

**Введение.** Техногенное нарушение равновесия в системе «уголь-газ» приводит к диффузионным, фильтрационным и сорбционно-десорбционным процессам в пласте. Выход системы из состояния равновесия сводится, в первую очередь, к повышению или понижению давления. При этом изменяется соотношение газа, который находится в свободном и сорбированном состоянии. Переход газа из одного состояния в другое может осуществляться с разной скоростью. При ведении горных работ увеличение значений кинетических параметров диффузионных, фильтрационных и десорбционных процессов крайне нежелательно. Однако информация об изменении этих параметров имеет большую практическую ценность при ведении горных работ по дегазации и снижению газодинамической активности напряженных газонасыщенных угольных пластов [1, 2].

**Основная часть.** Исследования кинетики взаимодействия угля и газа при изменении в системе барических условий проводились с использованием автоматизированной системы «ЭПР-ПК» [3]. Это позволило изучить угольное вещество в системе с газом, т. е. парамагнитную систему «уголь-газ» и быстротекущие ее изменения в режиме реального времени.

Лабораторные исследования проводились по ранее отработанным методикам, включающим регистрацию спектра поглощения СВЧ энергии парамагнитными центрами угля при нормальных условиях и до момента стабилизации при давлении 5 МПа, что дало возможность с высокой точностью зарегистрировать переходный процесс во времени и исследовать его параметры.

Для этого использовалась компьютерная система управления параметрами работы ЭПР-спектрометра PE-1301, позволяющая оцифровывать аналоговый сигнал и регистрировать его в виде массива данных в компьютере. Суть заключается в регистрации процесса перехода системы из стабильного состояния при нормальных условиях в другое стабильное состояние после повышения давления до 5 МПа. Для комплексного описания процесса взаимодействия угля и газа фиксировались не только параметры системы в стабильных состояниях до и после изменения давления, но и количественно оценивались кинетические характеристики, описывающие процесс стабилизации системы. Важнейшим условием получения полной и достоверной информации о процессе является стабилизация режимов работы спектрометра, а так же синхронизация во времени регистрации сигнала ЭПР системы «уголь-газ» и барических условий эксперимента. Присоединение ПК к ЭПР-спектрометру было проведено с помощью специально разработанных устройств согласования параметров исходного сигнала спектрометра (СУ-Г) и датчика давления (СУ-Р) через аналогоцифровой преобразователь (АЦП). Разработанное программное обеспечение позволяет регистрировать сигнал ЭПР с частотой дискретизации 1 Гц. Данная частота позволяет достоверно описывать начальный, наиболее динамический период процесса (30-36 точек вместо 2-3 при регистрации с помощью самописца КСП-4).

Обработка данных по стабилизации ширины линии поглощения ( $\Delta H$ ) после изменения барических условий в системе «уголь-газ» проводилась с учетом то-

го, что ширина линии непосредственно определяется разбросом энергетических уровней, занятых неспаренными электронами свободных радикалов в угле, и, следовательно, позволяет судить о реальном взаимодействии метана и радикалов угольного вещества. Спектры ЭПР отражают все изменения, произошедшие в угольном веществе с момента осадконакопления, и при этом изменяется не только концентрация свободных радикалов, но и их природа и структура. Совокупность всех этих процессов отражается на ширине и форме каждой индивидуальной линии спектра ЭПР угля, а их анализ помогает выявить роль тех или иных взаимодействий, которые формируют сигналы [4].

Аппроксимация переходного процесса производилась по экспоненциальному закону, характерному для быстропротекающих процессов стабилизации парамагнитной системы «уголь-газ» после возмущающего воздействия давлением [5]

$$I = I_{\text{исх}} - k_{\text{пас}}(1 - e^{-\frac{t}{T}}),$$

где  $I_{\text{исх}}$  - интегральная интенсивность исходного спектра ЭПР угольного образца;  $k_{\text{пас}}$  - коэффициент пассивации, отражающий процентное содержание в угле парамагнитных центров (ПМЦ) способных к взаимодействию с углем;  $t$  - текущее время,  $c$ ;  $T$  - постоянная времени переходного процесса,  $c$ .

Каменные угли имеют сложный сигнал ЭПР, представляющий суперпозицию широкой (с шириной линии между экстремумами первой производной  $\Delta H=6-9$  э) и узкой ( $\Delta H=1-2$  э) линий. Узкая линия спектров ЭПР углей обусловлена эффектом делокализации неспаренных электронов по системе сопряженных связей конденсированных ароматических и ациклических структур, а широкая - разорванными связями, т. е. свободными радикалами периферийных групп. При подаче повышенного давления в систему «уголь-газ» линия спектра теряет интенсивность и уширяется. Можно предположить, что во взаимодействие с молекулярным кислородом воздуха в первую очередь вступают свободные радикалы первой группы (с узкой линией), а показатель  $k_{\text{пас}}$  отражает процентное содержание в общей массе ПМЦ тех парамагнитных центров, природа которых обусловлена системой сопряженных связей конденсированных ароматических и алициклических структур.

Исследование кинетических параметров взаимодействия угля и газа осуществлялось на угольных пробах, отобранных из пласта  $i_3^1$  ш/у «Суходольское-Восточное» ОАО «Краснодонуголь». Угольные пробы отбирались в зонах проведения гидродинамического воздействия. Общий вес угольного материала шахтной пробы составлял 2 кг.

Отобранный уголь измельчался ударным воздействием с постоянными условиями для всех проб. Затем пробы просушивались при температуре не выше  $75^{\circ}\text{C}$  на протяжении 6 часов до состояния свободной сыпучести. При такой подготовке проб к исследованию процессов взаимодействия угля и газа на ЭПР-спектрометре химические реакции в угольном веществе не происходят, а

условий для выхода свободной влаги достаточно.

Результаты лабораторных исследований угольных проб представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Результаты исследований угольных проб, отобранных в процессе гидродинамического воздействия

Вид фракции	Выход летучих веществ $V^{daf}$ , %	Зольность $A^d$ , %	КПМЦ $N^d \times 10^{-19}$ , г	$k_{пасс}$ , %	Постоянная времени протекания процесса $T_N$ , с	Предельная сорбционная способность $Q$ , мг/г	Ширина линии $\Delta H$ , э	Изменение ширины линии $k_{\Delta H}$ , %
крупные куски	20,52	3,02	2,09	22,10	52,12	5,57	4,42	8,04
мелкие куски	21,82	19,99	2,38	23,57	30,63	6,75	4,30	5,65
«пена»	21,49	19,31	2,01	22,59	26,64	5,48	4,42	9,27
различные сочетания	21,01	2,93	2,10	23,82	33,46	6,03	4,36	7,98
	22,79	10,29	2,17	23,70	38,31	6,21	4,11	9,95
	22,73	23,82	2,04	23,27	39,11	5,72	4,17	11,54

По качественным характеристикам выделено три вида проб: крупные куски (диаметр более 20 мм), мелкая фракция (диаметр 2,0-20 мм) и «пена» (диаметр < 2 мм). Из табл. 1 видно, что крупные, ненарушенные куски угля имеют невысокую концентрацию ПМЦ. В мелкой фракции концентрация ПМЦ максимальная. Концентрация ПМЦ в «пене» наименьшая, что дает основание предположить о химическом взаимодействии парамагнитных центров с водой.

Значение показателя  $k_{пасс}$  для крупных кусков минимально, а для мелкой фракции несколько выше, что является следствием механического дробления угля и его истирания при выходе из скважины.

Минимальное время протекания процесса у наиболее нарушенных проб - «пены» и мелкой фракции, максимальное - у проб состоящих из крупных кусков.

Значения показателя предельная сорбционная способность угольного вещества  $Q$  для проб этого пробоотбора достаточно близки, но при этом фракция в виде «пены» имеет минимальное значение этого показателя.

Влияние парамагнитных молекул кислорода при повышении давления на ПМЦ системы сопряженных связей в угле интенсивнее, чем на свободные радикалы периферийных групп. Это можно объяснить действием молекул кислорода на систему сопряженных связей, обуславливающим изменения характера электронных взаимодействий. При этом не исключается возможность внедрения кислорода между отдельными конденсированными ароматическими слоями

макромолекул угольного вещества [6].

Результаты лабораторных исследований угольных проб, отобранных в обработанной гидродинамическим воздействием зоне пласта по восстановлению на расстояниях 30, 60 и 90 м от устья скважины, представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Результаты исследований угольных проб, отобранных в зоне гидродинамического воздействия на расстояниях 30, 60 и 90 м по восстановлению пласта

Расстояние от штрека до места отбора проб, м	Угольная пачка	Выход летучих веществ $V^{def}$ , %	Зольность $A^d$ , %	КПМЦ $N^a \times 10^{19}$ , г <sup>-1</sup>	$k_{пасс}$ , %	Постоянная времени протекания процесса $T_N$ , с	Предельная сорбционная способность $Q$ , мг/г	Ширина линии $\Delta H$ , э	Изменение ширины линии $k_{\Delta H}$ , %
30	верхняя	11,86	1,65	1,19	13,45	18,89	3,40	2,46	4,50
	нижняя	12,13	10,90	1,14	12,75	15,04	3,09	2,50	5,23
60	верхняя	11,58	1,70	1,18	12,48	29,42	3,15	2,50	4,54
	нижняя	12,86	5,81	1,23	13,38	21,62	3,50	2,32	5,61
90	верхняя	12,83	13,45	1,15	13,13	22,07	3,23	2,36	6,51
	нижняя	12,32	11,29	1,34	13,31	17,29	3,81	2,43	3,19

Ранее проведенными исследованиями [7] были установлены средние значения кинетических параметров переходного процесса взаимодействия угля и газа, представленные в табл. 3.

Таблица 3 - Средние значения кинетических параметров взаимодействия угля и газа верхней и нижней пачек пласта  $i_3^1$

Место отбора угольных проб	Концентрация ПМЦ $N^a \times 10^{19}$ , г <sup>-1</sup>	Относительное изменение интенсивности сигнала $k_{пасс}$ , %	Постоянная времени протекания процесса $T_N$ , с	Исходная ширина сигнала $\Delta H_{исх}$ , мТл
верхняя пачка	3,6	52,2	103,0	0,73
нижняя пачка	3,7	49,3	74,6	0,74

Общеизвестно, что внезапный выброс сопровождается выносом угольного вещества с повышенным содержанием парамагнитных центров. Установлено, что при проведении гидродинамического воздействия в вынесенном струей воды угле концентрация парамагнитных центров, примерно, в три раза меньше по сравнению с первоначальными значениями. Этот факт объясняется тем, что молекулы ископаемых углей склонны к деструкции разных типов, в том числе и к окислительно-гидролитической под влиянием воды, растворов щелочей, органических растворителей. Гидролиз углей приводит к разрыву различных связей и изменению компонентного состава. Свободные радикалы участвуют в реак-

циях фрагментации, о чем свидетельствует изменение сигнала ЭПР. Под действием циклических динамических воздействий так же происходит деструкция углеродных связей в ароматическом ядре молекулы угля. Ароматическая и алифатическая составляющие упрощаются, снижается молекулярная масса [8]. Показатель  $k_{\text{пасс}}$  свидетельствует о том, что структура угольного вещества сильно нарушена в результате гидродинамического воздействия. Это подтверждается существенным снижением значения постоянной времени протекания процесса  $T_N$  по сравнению со средним по пробоотбору. В нарушенном внешним воздействием угольном веществе процесс стабилизации сигнала ЭПР протекает быстрее.

Необходимо так же отметить аномально низкую предельную способность угольного вещества  $Q$  при высоком проценте активных, способных к сорбционному взаимодействию ПМЦ. Этот факт является подтверждением химического взаимодействия свободных радикалов угля с водой и продуктами ее гидролиза.

Исходя из вышеизложенного можно заключить, что в процессе гидродинамического воздействия часть свободных радикалов вступает во взаимодействие с молекулами воды и продуктами ее гидролиза, образуя устойчивые соединения, и этим снижает концентрацию ПМЦ в угле.

**Выводы.** На основании проведенных лабораторных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Гидродинамическое воздействие запускает процесс взаимодействия свободных радикалов и молекул воды, в результате которого образуются устойчивые соединения, что приводит к уменьшению концентрации ПМЦ в угольном веществе, снижению его предельной сорбционной способности и повышению проницаемости, а, следовательно, к увеличению объема выхода метана из угля.

2. Показатель постоянной времени протекания процесса  $T_N$  характеризует нарушенность угольного пласта и может быть использован для оценки длительности процесса сорбционно-десорбционного взаимодействия после изменения давления в системе «уголь-газ».

3. Показатель  $k_{\text{дн}}$  отражает процентное содержание в общей массе ПМЦ тех парамагнитных центров, природа которых обусловлена системой сопряженных конденсированных ароматических и ациклических структур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалева, И.Б. Особенности структурных и диффузионных кинетических характеристик углей в зонах газодинамических явлений / И.Б. Ковалева, Е.А. Соловьева // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр./ ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2002. – Вып. 34. – С. 182-186.
2. Suggate, R.P. Carbon NMR of coals: the effects of coal type and rank / R.P. Suggate, W.W. Dickinson // Int. J. of Coal Geology. - 2004. - 57. - P. 1-20.
3. Гончаренко, В.А. Автоматизация процесса обработки и расчета сорбционных и структурных свойств угля, определяемых методом ЭПР / В.А. Гончаренко, А.В. Бурчак, В.В. Котляров // Науковий вісник НГАУ. - 2001. - №4. - С. 69-71.
4. А.с. 1679325 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01N 24/10. Способ анализа углей методом ЭПР / А.С. Поляшов, А.В. Бурчак, В.Е. Забигаило, Н.И. Насос (СССР). - № 4691698 ; заявл. 03.03.92 ; опубл. 25.08.92, Бюл.

№ 12. - 3 с.

5. Лукинов, В.В. Генерация метана из угля и возможности ее оценки методом электронного парамагнитного резонанса / В.В. Лукинов, В.А. Гончаренко, А.В. Бурчак // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №8. – С. 85-86.

6. Саранчук, В.І. Хімія і фізика горючих копалин / В.І. Саранчук, В.В. Ошовський, Г.О. Власов. - Донецьк: Східний видавничий дім, 2003. - 201 с.

7. Интенсификация дегазации 23 восточной уклонной лавы пласта  $l_3^1$  шахтоуправление «Суходольское-Восточное» способом гидродинамического воздействия на угольный пласт : отчет о НИР : №495-167/05-6-КУО / ИГТМ НАН Украины ; рук. Софийский К.К. ; исполн. : Силян Д.П. [и др.]. - Днепропетровск, 2008. - 43 с.

8. Алексеев, А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – К.: Наукова думка, 2010. – 423 с.

---

#### REFERENCIS

1. Kovaleva, I.B. and Solovyev, E.A. (2002), “Features of structural and diffusive kinetic descriptions of coals are in the areas of the gas-dynamic phenomena”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technikal Mechanics], no. 34, pp. 182-186.

2. Suggate, R.P., and Dickinson, W.W. (2004), “Carbon NMR of coals: the effects of coal type and rank”, *Int. J. of Coal Geology*, no. 57, pp. 1-20.

3. Goncharenko, V.A., Burchak, A.V. and Kotlyarov, V.V. (2001), “Automation of process of treatment and calculation of сорбционных and structural properties of coal, determined the method of EPR”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnichoho universytetu*, no. 4, pp. 69-71.

4. Polyashov, A.S., Burchak, A.V., Zabigaylo, V.E., Nasos, N.I., copyright certificate, 1679325 МКГ<sup>4</sup> G01N 24/10, *Method of analysis of coals the method of EPR* - № 4691698 ; statement. 03.03.92 ; printed 25.08.92, bulletin № 12. - 3.

5. Lukinov, V.V., Goncharenko, V.A. and Burchak, A.V. (2000), “Generation of methane from coal and possibility of its estimation the method of electronic paramagnetic resonance”, *Gornyu informatsionno-analyticheskiy byulleten*, no. 8, pp. 85-86.

6. Saranchuk, V.I., Oshovskiy, V.V. and Vlasov, G.A. (2003), *Chimiya i fizika goryuchikh kopalyn* [Chemistry and physics of combustible minerals], Skhidnyi vydavnychiy dim, Donetsk, Ukraine.

7. Sofiyskiy, K.K. (2008), *Intensifikatsiya degasatsii 23 vostochnoy uklonnoy lavy plasta  $l_3^1$  shachtoupravlenie «Sukhodolskoe-Vostochnoe» sposobom gidrodinamicheskogo vozdeystviy na ugolnyy plast* [Intensification of degassing 23 east slope lavas of layer  $l_3^1$  mine management «Sukhodolskoye-Vostochnaya», IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

8. Alexeev, A.D. (2010), *Fizika uglya i gornykh protsesov* [Physics of coal and mountain processes], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

---

#### Об авторах

**Московский Олег Викторович**, аспирант, начальник добычного участка ОП «Шахта им. Ф.Э. Дзержинского» ГП «Дзержинскуголь», Дзержинск, Украина, [gpdu@inbox.ru](mailto:gpdu@inbox.ru).

**Гаврилов Вячеслав Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела ПТПРУМ, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [gawrilov.slawick@yandex.ru](mailto:gawrilov.slawick@yandex.ru).

#### About the author

**Moskovskiy Oleg Viktorovich**, Doctoral of Student, head of the mine site SE «Mine name by F.E. Dzerzhinskiy» SE«Dzerzhynskvugillia» Dzerzhynsk, Ukraine, [gpdu@inbox.ru](mailto:gpdu@inbox.ru).

**Gavrilov Vyacheslav Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher of Department of Undegroud Coal Mining Technology, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [gawrilov.slawick@yandex.ru](mailto:gawrilov.slawick@yandex.ru).

**Анотація.** В статті наведено результати лабораторних досліджень кінетичних параметрів взаємодії вугілля і газу на вугільних пробах, відібраних з пласта  $i_3^1$  ш/у «Суходольське-Східне» з природною газоносністю 22,5-27 м<sup>3</sup>/т с.б.г.м. в процесі проведення гідродинамічної дії методом ЕПР. Важливою методичною відмінністю проведених робіт є перехід від оцінки інтенсивності сигналу по особливих точках спектру до оцінки за площею під кривій поглинання СВЧ енергії. Це дозволило врахувати зміну ширини сигналу ( $\Delta N$ ) і форми кривої при розрахунку концентрації парамагнітних центрів (КПМЦ). В результаті аналізу отримані дані про вплив гідродинамічної дії на концентрацію парамагнітних центрів у вугіллі різних фракцій, розподіл граничної сорбційної здатності вугільної речовини по довжині обробленої зони. Встановлено, що в результаті гідродинамічної дії у вугіллі знижується зміст активних, здібних до взаємодії з метаном парамагнітних центрів, внаслідок чого знижується гранична сорбційна здатність вугільної речовини і підвищується його газопроникність, а, отже, збільшується об'єм виходу метану з пласта. Для оцінки тривалості процесу сорбційно-десорбційної взаємодії запропоновано показник постійна часу протікання процесу  $T_N$ , що характеризує порушеність вугільного пласта.

**Ключові слова:** кінетичні параметри, гідродинамічна дія, високочастотна енергія, парамагнітні центри, сорбційна здатність, газопроникність.

**Abstract.** The article shows the results laboratory research of the kinetic parameters of the interaction of coal and gas in the coal samples taken from the seams  $i_3^1$  mine management "Sukhodolskoye-Vostochnaya" with natural gas content 22,5-27 m<sup>3</sup>/per ton of dry ash-free basis in the process of hydrodynamic impact by EPR. An important methodological difference spent works is to move from estimation of the signal intensity in the singular points of the spectrum to the estimation of the area under the curve of the absorption of microwave energy. This would allow for variation in the width of the signal ( $\Delta H$ ) and the waveform in the calculation of the concentration of paramagnetic centers (CPMC). An analysis of the data on the impact of hydrodynamic impact on concentration of paramagnetic centers in coal of different fractions, the distribution of maximum sorption capacity of coal substance in length treated zone. Was established that as a result of hydrodynamic impact in decreasing content of active carbon, capable of reacting with methane paramagnetic centers, resulting in decreased sorption capacity limit coal matter and increases its gas permeability, and thus increasing the volume of methane from coals seam.

To estimate the duration of the process of sorption-desorption interactions proposed measure the time constant of the process  $T_N$ , characterized by a disturbance of the coal seam.

**Keywords:** kinetic parameters, hydrodynamic impact, high-energy, paramagnetic centers, sorption capacity, gas permeability.

*Стаття поступила в редакцію 01.11.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук К.К. Софийским*