

Раздел 1. Физика угля и горных пород

УДК 537.868: 53.043

Т.А. Василенко¹, А.К. Кириллов¹, В.В. Соболев²,
А.С. Дорошкевич³, Е.А. Пронский¹

ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УВЛАЖНЕННОГО КАМЕННОГО УГЛЯ ПРИ МАГНИТОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

¹ Институт физики горных процессов НАН Украины,
49600, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2-а.

² Государственное ВУЗ «НГУ»,
49005 г. Днепр, пр. Дмитрия Яворницкого, 19.

³ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины,
03680, Киев, пр. Науки, 46.

Представлены результаты исследования отклика увлажненных угольных образцов на импульсное магнитное воздействие с частотой 1 Гц. Совместные измерения методом импедансной спектроскопии и импульсного ЯМР спектрометра широких линий на частоте ядер водорода ¹H позволили интерпретировать эффект воздействия импульсных магнитных полей на систему уголь-вода на основе представлений о двойных электрических слоях, которые формируются в результате адсорбции полярных молекул воды на поверхности порового пространства ископаемых углей.

Ключевые слова: диэлектрические свойства, импедансная спектроскопия, неоднородная среда, поляризация, уголь.

Введение

В условиях интенсификации добычи угля в шахтах Украины актуальной является дегазация угольных пластов, обеспечивающая безопасность работы шахтеров. В настоящее время есть достаточно традиционных способов дегазации и извлечения метана. Тем не менее, разрабатываются новые подходы для решения таких задач. Один из них предусматривает воздействие электромагнитным полем на угольный пласт [1-3]. Определенные режимы воздействия импульсного магнитного поля могут приводить к изменению кинетики химических реакций в углях, основанных на свободных радикалах [4]. В естественных условиях на электропроводность влияет содержание влаги в угольном пласте. Эффективным методом, позволяющим исследовать влияние влажности, а также физических воздействий на электрофизические свойства пористых сред в широком интервале частот, является метод электрохимического импеданса [5].

Для реализации предлагаемого метода электромагнитного воздействия необходимо изучить электрофизические свойства углей, изменяющиеся в ряду метаморфизма и от влажности пласта. Для этой цели проведены эксперименты [6], основанные на измерениях комплексного импеданса Z методом импедансной спектроскопии, который получил широкое распространение при изучении жидкостей и гетерогенных сред.

В настоящей статье представлены результаты изучения эффекта воздействия импульсного магнитного поля на образцы углей с помощью импедансной спектроскопии (ИС) и методом ядерного магнитного резонанса, выполненного на ЯМР спектрометре широких линий. Совместное использование двух методов позволило сделать заключение о физических механизмах изменения электрофизических параметров увлажненных образцов каменного угля. Ранее были выполнены исследования отклика угля марки ДГ из шахты «Россия» (ГП «Селидовуголь») и антрацита на электромагнитное воздействие методом ИС [7, 8].

1. Результаты исследования методом импедансной спектроскопии

Необходимость в постановке эксперимента на ЯМР спектрометре возникла после получения результатов обработки данных импедансной спектроскопии влагонасыщенного образца угля марки К (ш. Бажанова, пласт m_3 : $A^d = 6,9$, $S_t^d = 2,5$, $V^d = 23,1$, $V^{daf} = 24,8\%$ [9]) в диапазоне частот 1 Гц – 1 МГц. Вид диаграммы Коула-Коула для импеданса Z (годограф), которая построена в координатах $\text{Re}Z - \text{Im}Z$ для исходного образца и образца, подвергнутого импульсному воздействию, существенно отличались друг от друга, причем не происходила релаксации диаграммы к первоначальному виду в течение нескольких суток. Описание аппаратуры и метода измерения детально изложено в работе [7,10].

Если до воздействия годограф можно описать искаженной полуокружностью, что означает наличие одной параллельной RC цепочки в эквивалентной электрической схеме (ЭЭС), то в последующем после магнитоимпульсного воздействия (МИВ) появляется дополнительный элемент в ЭЭС, указывающий на изменение механизмов электропроводности в области низких частот. Поэтому в годографе появляется еще одна искаженная полуокружность (рис. 1). Весь импеданс-спектр эволюционирует так, что частота $\omega_m = 2\pi f_m$, соответствующая максимальному значению мнимой компоненты комплексного импеданса $\text{Im}Z$, со временем смещается в область все более низких частот. Эта закономерность наблюдается для обеих составляющих годографа (рис. 1). В таблице 1 представлены данные для частоты $f_m = 2\pi/\omega_m$, из которых получены характерные времена релаксации $\tau = 1/\omega_m$ возбужденной МИВ системы уголь-флюид. Отметим, что после МИВ электросопротивление R_1 возросло почти в четыре раза, а емкость C_1 увеличилась почти 8 раз. В течение первого часа после МИВ $f_{m,1}$ не изменялась, оставаясь равной 644 Гц.

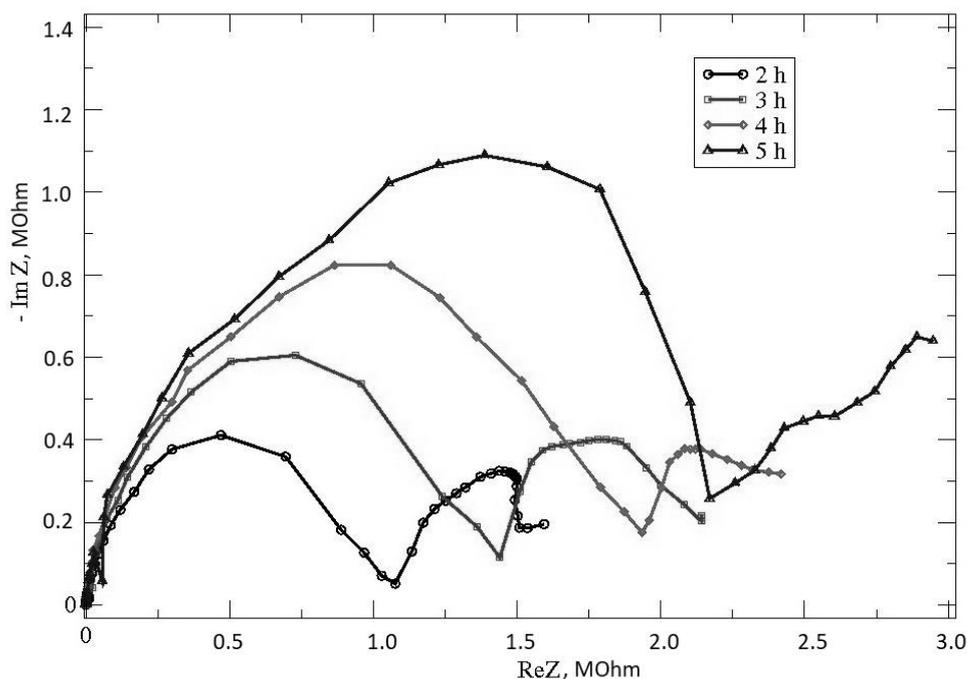


Рис. 1. Изменение годографа в течение пяти часов после импульсного воздействия

Таблица 1

Изменение частоты f_m со временем

Время после МИВ, час	$f_{m,1}$, Гц	R_1 , МОм экспер	C_1 , 10^{-11}	$f_{m,2}$, Гц экспер	$f_{m,2}$, Гц, модель	R_2 , МОм	C_2 , 10^{-9}
До МИВ	3760	1,8	0,22	-	-	-	-
0	644	6,9	1,8	2,4	-	-	-
1	750	<u>6,86</u>	<u>2,3</u>	2,4	-	-	-
2	1557	5,3	1,9	25	6,8	6,4	3,6
3	863	6,8	2,7	18,9	16,4	7,4	1,3
4	580	<u>8,3</u>	<u>2,9</u>	6,8	5,0	6,1	5,2
5	266	12,2	4,9	1,8	-	-	-
23	480	<u>9,3</u>	<u>3,4</u>	4,3	4,3	10,4	3,5

Для сравнения были проанализированы данные для сухого образца, полученные при том же режиме воздействия. Частота $f_{m,1}$ оставалась неизменной и равной 287 Гц в течение 24 часов после воздействия. Эти данные, приведенные здесь для понимания необходимости исследования образцов угля мето-

дом ЯМР, показывают, что особенности поведения со временем образцов связаны с особенностями отклика воды, сорбированной на поверхности и находящейся в объеме пор угля.

Определим по графикам значения R , которые входят в равенство $R_1 C_1 \omega_m = 1$, как половину предельного значения оси Z' пересечения годографа с горизонтальной осью. По этим данным построены регрессионные зависимости изменения сопротивления и емкости со временем (рис. 2), из которых восстановлены значения R_1 и C_1 , подчеркнутые в таблице 1 для моментов времени 1, 4 и 23 часа после МИВ.

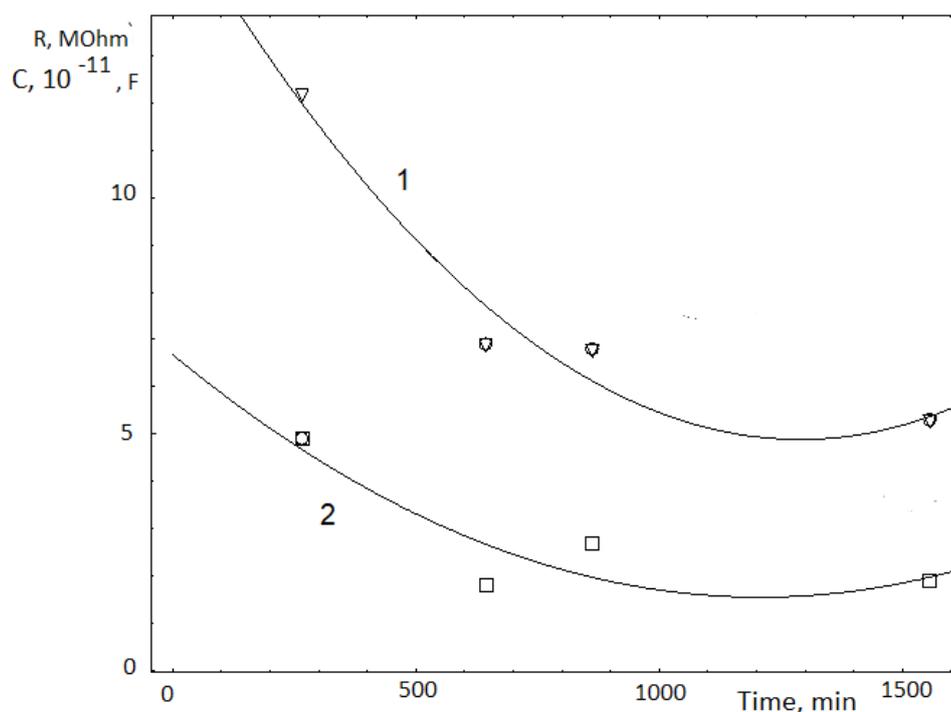


Рис. 2. Регрессионные зависимости электросопротивления (1) и емкости (2), характеризующие объемные электрофизические параметры угольного образца

Построение эквивалентных электрических схем (ЭЭС) для годографов проводилось с помощью программного пакета *EIS Spectrum Analyser*, опубликованного на вебсайте Европейского интернет-центра импедансной спектроскопии [11]. Достаточно надежно удавалось аппроксимировать годограф моделью Войта [12] в виде двух параллельных соединений емкости и активного сопротивления (рис. 3), каждый из которых описывает объемную и поверхностную составляющую электрофизических свойств неоднородной пористой структуры угольного образца. Однако в отдельные моменты приходилось вводить элементы с постоянной фазой (CPE) и элемент Варбурга W [12, 13], описывающий диффузионные процессы в низкочастотной части годографа (рис. 4).

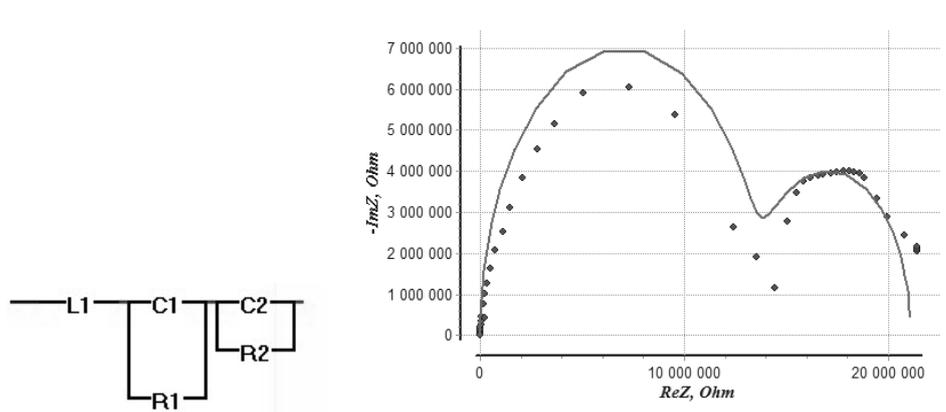


Рис. 3. Аппроксимация годографа и эквивалентная электрическая схема для образца через 3 часа после МИВ

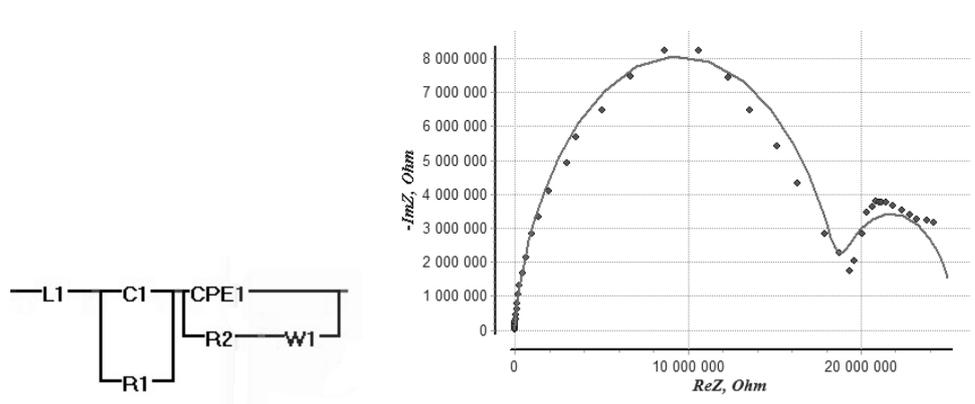


Рис. 4. Аппроксимация годографа и эквивалентная электрическая схема для образца через 4 часа после МИВ

Каждому элементу ЭЭС соответствует свое значение времени релаксации $\tau = 1/\omega_m = 1/2\pi f_m$. Для каждого момента времени после МИВ получены значения времен релаксации: $\tau_1 \approx 10^{-4}$ сек для объемной компоненты, и $\tau_1 \approx (10^{-3} - 10^{-2})$ сек, которые на несколько порядков превосходят дебаевские времена релаксации для воды, что указывает на поляризацию сложной гетерогенной структуры угольного вещества по механизму Максвелла-Вагнера [14, 15]. Из рис. 5 следует, что эквивалентная электрическая схема (ЭЭС) в виде параллельного соединения двух элементов: емкости C и активного сопротивления R достаточно удовлетворительно описывает отдельные части годографа для угольного образца.

Представляет интерес изменение компонент диэлектрической проницаемости $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ для объемной части образца. Используя данные из таблицы 1 и соотношения [16]

$$\begin{aligned}\varepsilon' &= C \cdot d / (\varepsilon_0 S), \\ \varepsilon'' &= R^{-1} \cdot d / (\varpi \varepsilon_0 S)\end{aligned}\quad (1)$$

вычислены характерные величины действительной части ε' для моментов измерений после МИВ (таблица 2). Геометрические параметры образца равны $d = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $S = 24 \text{ мм}^2 = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая постоянная вакуума.

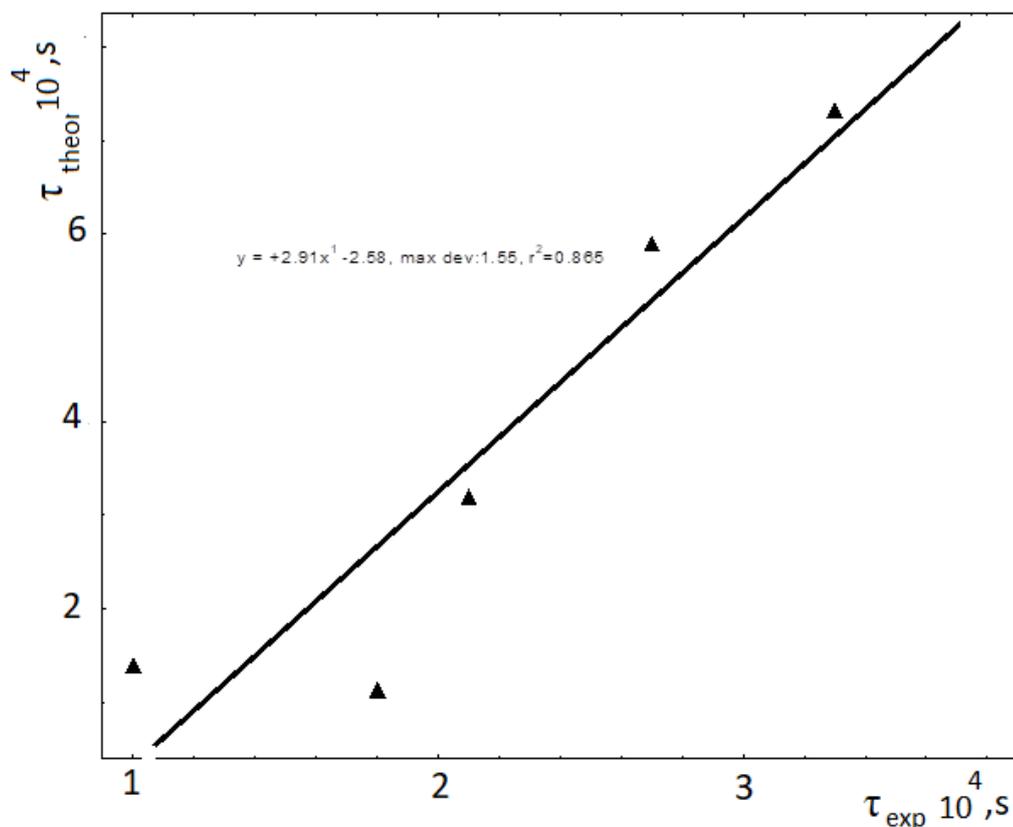


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и модельных значений времен релаксации τ

Поскольку для действительной части удельной электропроводности выполняется равенство $\sigma' = \varepsilon_0 \varepsilon'' \cdot \omega$, то можно вычислить и соответствующую удельную электропроводность для частоты ω_m при каждом измерении. Действительно, подставляя ε'' из (1), имеем равенство для вычисления σ' : $\sigma' = d/(R \cdot S)$.

Таблица 2
Изменение электрофизических параметров угля после МИВ

Время после МИБ, час	$C, 10^{-11} \Phi$	$\varepsilon'/\varepsilon_0, 10^4$	$\sigma', 10^{-3} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$
До МИБ	0,22	0,31	6,94
0	1,8	2,54	1,81
1	2,3	3,25	1,82
2	1,9	2,68	2,36
3	2,7	3,81	1,84
4	2,9	4,09	1,51
5	4,9	6,92	1,02
23	3,4	4,80	1,34

Представленные в таблице 2 значения ε' и σ' в каждой строке соответствуют частотам из второго столбца таблицы 1. Именно эти значения описывают годограф для объемной электропроводности в ЭЭС на каждый момент измерений.

2. ЯМР измерения эффекта магнитоимпульсного воздействия

Исследовались образцы из ш. Россия ШУ Селидово (уголь марки Г: пласт l_1 , невыбросоопасный, $A^d = 11,5\%$; $S = 4,3\%$; $W = 6,9\%$; $V^{daf} = 45,4\%$). Фракция 2-2,5 мм насыщалась парами воды в эксикаторе в течение одного месяца. После этого были подготовлены три образца. Первый и второй помещали в ампулы для дальнейшего измерения на спектрометре спин-эхо, а третий просушивался на электронных весах-влажномере для определения влажности. По данным влагомера влажность составила 4,4%. Опытный образец подвергался импульсному воздействию с частотой 1 Гц в течение одного часа. Опытный и контрольный образцы размещались в приемный контур спектрометра спин-эхо. Измерения проводились методом Хана и методом прогрессивного насыщения [17] для определения времен релаксации спинов ядер ^1H на резонансной частоте $f \approx 20$ МГц.

Рассмотрим изменения времен релаксации, полученные методом спин-эхо для контрольного и опытного образцов. Использовалась стандартная методика аппроксимации сигнала спин-эхо при измерении времени поперечной релаксации T_2 . При этом зависимость амплитуды спин-эхо от времени задержки аппроксимировалась суммой двух экспоненциальных функций, в которых одно время релаксации $T_{2,c}$, соответствует водородсодержащей компоненте угольного вещества, а вторая $T_{2,f}$ – флюиду, в нашем случае – воде:

$$A(\tau) = a \cdot \exp(-2\tau/T_{2,c}) + b \cdot \exp(-2\tau/T_{2,f}), \quad (2)$$

где 2τ – задержка эхо-сигнала относительно первого импульса, коэффициенты a и b дают представление об относительном вкладе обеих составляющих в общий сигнал спин-эхо. Вид релаксационной кривой сигнала спин-эхо при ЯМР измерениях увлажненных угольных образцов в значительной степени

определяется распределением молекул воды в объеме порового пространства по состояниям их подвижности, которое в свою очередь характеризуется плотностью распределения $P(T_2)$ по временам поперечной релаксации ядерных спинов водорода, входящего в состав молекулы воды. Такие распределения были вычислены методом регуляризации Тихонова [18], как решения уравнения Фредгольма первого рода:

$$M(t) = \int_0^{\infty} P(T_2)K(t, T_2)dT + \varepsilon(t), \quad (3)$$

где левая часть равенства является экспериментальной кривой при измерениях времени поперечной релаксации T_2 , частным случаем которой является представление сигнала спин-эхо в виде двух экспоненциальных функций (2). Слагаемое $\varepsilon(t)$ – шумовая компонента сигнала.

В результате погрешностей, имеющих место при измерениях на спектрометре и в процессе аппроксимации, имеется некоторый разброс данных для времен релаксации. Для более надежных результатов были проведены также измерения для просушенного образца угля, который не содержал влагу. Получено среднее значение $T_{2,c} = 22$ мкс, которое использовалось при вычислении времен релаксации влагонасыщенных образцов. Получены величины для контрольного образца $T_{2,f} = 113 \pm 3$ мкс по всем шести измерениям. Если использовать все измерения для опытных, подвергнутых МИВ образцов, то получается $T_{2,f} = 111$ мкс, близкое к значению, полученному для контроля. Однако, следует учесть, что при измерениях опытных образцов после проведения серии первых трех измерений была проведена подстройка резонансной частоты и усиления. Поэтому необходимо провести усреднение для этих групп измерений отдельно. Оказалось, что для первой партии $T_{2,f} = 123,6 \pm 3,8$ мкс, а для второй серии измерений $T_{2,f} = 101,7 \pm 5,5$ мкс. Поэтому интерпретация эффекта МИВ является затруднительной.

Измерение времени T_1 продольной релаксации проводилось методом прогрессивного насыщения [17]. Релаксация сигнала в этом случае также аппроксимировалась двумя слагаемыми:

$$I(t) = a[1 - \exp(-2t/T_{2,c})] + b[1 - \exp(-2t/T_{2,f})], \quad (4)$$

где второе слагаемое соответствует релаксации ядерных спинов протонов, входящих в состав молекулы воды.

Для сухого образца получено значение $T_{1,c} = 174 \pm 4$ мс, которое было зафиксировано при дальнейшей обработке данных ЯМР для увлажненных образцов. Получено $T_{1,f} = 65,6$ мс для контроля и $T_{1,f} = 61,1$ мс для опытных образцов.

Вторая серия экспериментов была проведена по иной схеме, чтобы исключить эффект теплового воздействия на образец, помещенный в соленоид при проведении МИВ в течение часа.

Использовались три образца (таблица 3): 1 – контрольный, который не подвергался воздействию ИМП; 2 – образец, который находился в соленоиде в течение 1 часа при включенном вентиляторе; 3 – опытный образец, который подвергался воздействию ИМП при включенном вентиляторе, что предусмотрено в стандартной методике эксперимента, для устранения теплового эффекта ИМП (джоулевые потери).

Таблица 3

Экспериментальные данные для измерений методом ЯМР

№ измерений	T_{1f} , мс	a	b	a/b	Комментарии
1	64,8	339	281	1,206	контроль
2	70,0	377	228	1,654	вентилятор
3	41,3	169	484	0,349	После МИВ
	T_{2f} , мкс				
4	106	$4,28 \cdot 10^4$	1275	33,6	контроль 1
5	89,6	$3,92 \cdot 10^4$	1344	29,2	контроль 2
6	107	$2,62 \cdot 10^4$	1448	18,1	вентилятор
7	148	$4,22 \cdot 10^4$	943	44,8	После МИВ

Из таблицы 3 следует, что имеется явное повторение тенденции изменения параметров аппроксимирующих уравнений: уменьшение T_{1f} и увеличение T_{2f} после ИМП. Воздействие вентилятора на контрольный образец практически не повлияло на время продольной релаксации T_{1f} . Дополнительное воздействие импульсов магнитного поля привело к существенному изменению отношения амплитуд a/b из выражения (4) для T_1 . Наблюдается явно выраженный эффект МИВ при измерении времени поперечной релаксации T_{2f} для тех же образцов, который выражается в увеличении T_{2f} после МИВ и увеличении отношения амплитуд a/b в выражении (2) для сигнала спин-эхо.

3. Обсуждение

Возможны два варианта эффекта воздействия МИВ на систему уголь-вода. В первом варианте предполагается, что после импульсного воздействия слабого магнитного поля часть молекул воды будет активирована, оторвана от поверхности пор и перейдет в свободное состояние в объем пор. Общее количество резонирующих спинов, входящих в состав молекул воды, не изменится. При этом суммарное, измеряемое спектрометром спин-эхо время релаксации T_{2f} увеличится по сравнению с контролем, что и наблюдается в первой серии измерений.

Полученное во второй серии измерений уменьшение $T_{2,f}$ может соответствовать случаю, когда произошло относительное увеличение сорбированной компоненты воды по сравнению со свободной. Возможно, что при этом в приемном контуре спектрометра уменьшилось общее количество резонирующих спинов ядер водорода, входящих в молекулу воды.

Для проверки этих гипотез вычислим отношение коэффициентов, стоящих перед экспонентами аппроксимирующих сигнал спин-эхо выражений. Если в первой серии измерений для опытного образца получено отношение $a/b = 20,4$, а для контрольных образцов $a/b = 23,6$, что соответствует первому варианту предполагаемого эффекта МИВ. Для второй серии эксперимента получено отношение $a/b = 44,8$, что согласуется с предположением о потере части молекул воды из объемной фазы, которая не сорбирована на поверхности пор. С помощью данных, представленных на рис. 6 и в таблице 4 можно понять, какие изменения произошли с молекулами воды после МИВ.

Таблица 4

Сравнительные данные для распределений $P(T_2)$

	$\lg(T_{2,f})$	$P(T_2)_{\max}$	$P(T_2)_{\max}$ (нормировано)
До МИВ	-1,756	0,457	1
	-1,617	0,345	0,75
	-1,269	0,396	0,87
После МИВ	-1,809	0,294	1
	-1,678	0,506	1,72
	-1,322	0,233	0,79

Первая строка для каждого номера файла соответствует времени релаксации для угольной компоненты спектра спин-эхо. Вторая и третья относятся к сорбированной и свободной компонентам воды соответственно. Из таблицы следует, что до МИВ амплитуды свободной и сорбированной компонент в распределениях сравнимы по величине, в то время как после МИВ интенсивность свободной компоненты заметно уменьшилась.

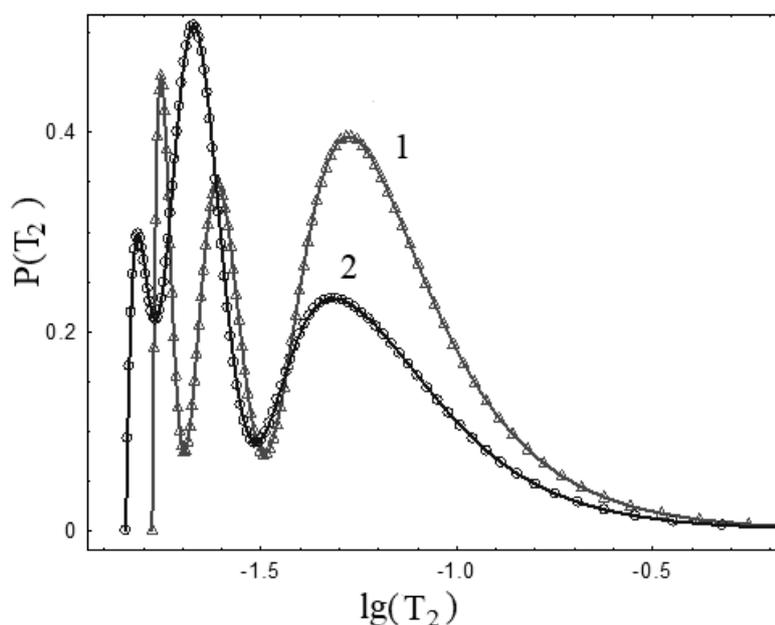


Рис. 6. Плотность распределения времени спин-спиновой релаксации в образцах угля до (1) и после (2) магнитоимпульсного воздействия

Данное заключение подтверждается результатами вычисления функции плотности распределения $P(T_2)$ времени поперечной составляющей T_2 , представленными на рис. 6. Относительная высота максимумов характеризует относительное содержание сорбированной и объемной компонент H_2O в поровом пространстве образца. Крайний левый пик распределения на графике, относительно которого нормируются остальные пики, соответствует водородсодержащей компоненты твердой матрицы угля. Центральный пик – к сорбированной компоненте воды, а оставшийся пик справа – менее связанной (объемной воде).

Выводы

Совместные измерения методами ЯМР широких линий и импедансной спектроскопии позволили интерпретировать эффект воздействия импульсных магнитных полей на систему уголь-вода на основе представлений о двойных электрических слоях (ДЭС), которые формируются в результате адсорбции полярных молекул воды на поверхности порового пространства ископаемых углей (рис. 7,а). Действительно, современная теория строения ДЭС [19, 20], логически развивающая представления Гельмгольца, Штерна, Гуи и Чепмена, рассматривает ДЭС в виде двух частей (рис. 7,б). Одна его часть находится непосредственно у межфазной поверхности (слой Гельмгольца или адсорбционный слой), другая - в диффузной части толщиной λ , зависящей от свойств дисперсионной среды и ионов внутреннего слоя. Значение потенци-

ала в слое Гельмгольца при удалении от потенциалобразующих ионов снижается линейно от φ_0 до потенциала диффузного слоя φ_δ , а затем, изменяется по экспоненте (рис. 7,б).

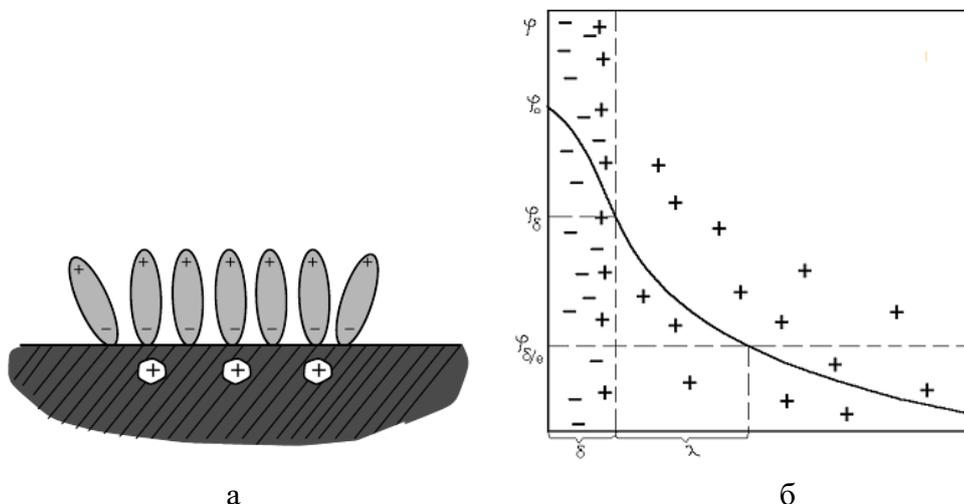


Рис. 7. Распределение молекул воды вблизи активных центров на поверхности пор угля (а) [21]; и в окрестности двойного электрического слоя (б)

Таким образом, в нашем случае, два состояния молекул воды, отличающихся по степени подвижности, очевидно, относятся к воде, которая физически связана (адсорбирована) на активных центрах поверхности пор и трещин. Молекулы воды с относительно малыми временами спин-спиновой релаксации $T_{2,f}$, связанные с поверхностью, расположены во внутренней части ионной оболочки в первом адсорбционном слое, они формируют заряженный потенциалобразующий слой, а молекулы с большими временами $T_{2,f}$ соответствуют молекулам воды, пространственно расположенным во внешней ее части – диффузном слое и объеме пор. Ионы диффузного слоя, согласно данным СЭИ, обеспечивают непрерывность электрических свойств.

1. Электромагнитное воздействие на угольный пласт для активации процесса / А.Д. Алексеев, А.К. Кириллов, А.Г. Мнухин, А.М. Брюханов. – Физико-технические проблемы горного производства: сб. научн. тр. / Под общ. ред. А.Д. Алексеева. – Донецк: Институт физики горных процессов НАН Украины, 2007. – Вып. 9. – С. 5 - 19.
2. Alexeev A.D. Physics of coal and mining processes. CRS Press – 2012. – 358 p.; Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов / А. Д. Алексеев – Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Киев: Наук. думка, 2010. – 423 с.
3. Алексеев А.Д. Патент на корисну модель № 48639. Україна, МПК E21F 7/00/ Спосіб дії на вугільний пласт / А.Д. Алексеев, В.Г. Грінюв, А.К. Кірілов,

- О.М. Брюханов, А.Г. Мнухин. Заявл 19.10.2009. Оpubл. 25.03.2010. – Бюл. № 6. – С. 3.
4. *Soboliev V.* Magnetic stimulation of transformations in coal / V. Soboliev, N. Bilan, D.Samovik // *Mining of Mineral Deposits.* – Leiden, Netherlands: CRC Press / Balkema, 2013. – P. 221-225.
 5. *Поклонский Н.А.* Основы импедансной спектроскопии композитов: курс лекций / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук. – Минск: Изд-во БГУ, 2005. – 130 с.
 6. Диэлектрические свойства углей в интервале частот до 1 МГц. Физико-технические проблемы горного производства / А.Д. Алексеев, А.К. Кириллов, Т.Е. Константинова [и др.] // *Сб. научн. трудов.* – Вып. 13. – Донецк, 2010. – С. 22-31.
 7. Изменение электрофизических параметров каменного угля при магнитоимпульсном воздействии / Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, А.С. Дорошкевич, А.В. Шило // *Физико-технические проблемы горного производства // Сб. научн. трудов.* – Вып. 15. – Донецк, 2012. – С. 7–19.
 8. Исследование методом импедансной спектроскопии отклика антрацита на тепловое и электромагнитное воздействие / Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, А.С. Дорошкевич, А.В. Сапрыкина // *Физико-технические проблемы горного производства // Сб. научн. трудов.* – Вып. 16. – Донецк, 2013. – С. 7–15.
 9. Технологическая ценность угля шахты «Красноармейская Западная № 1» / Ю.С. Кафтан, И.Д. Дроздник, С.С. Торяник, Н.Б. Бидоленко, А.Р. Давидзон // *Углекимический журнал.* - 2002. - № 3-4. - С. 3-7.
 10. Влияние импульсных магнитных полей на структуру пироэлектриков на основе LaBSiO_5 и LaBGeO_5 / Т.Е. Константинова, А.С. Дорошкевич, И.А. Даниленко, Г.К. Волкова [и др.] // *Актуальные проблемы прочности, Материалы XLIII международной конференции, 27 сентября – 1 октября 2004 г., Витебск, Беларусь. Часть 1.* – С. 191-196.
 11. <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser> / – [Электронный ресурс] - Программа для анализа и моделирования спектров импеданса.
 12. Импедансная спектроскопия электролитических материалов. Учебное пособие. - УрГУ: Екатеринбург, 2008. – 70 с.
 13. *Дамаскин Б.Б.*, Принципы современных методов изучения электрохимических реакций // Б.Б. Дамаскин. - М.:Изд. МГУ, 1965. – 102 с.
 14. *Духин С.С.* Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах // С.С. Духин, В.Н. Шилов. – Киев: Наукова думка, 1972. – 206 с.
 15. *Mondal R.A.*, Maxwell-Wagner polarization in grain boundary segregated NiCuZn ferrite / R.A. Mondal, B.S. Murty, V.R.K. Murthy // *Current Applied Physics.* – Vol. 14. – 2014. – P. 1727–1733.
 16. Application of dielectric spectroscopy to the detection of contamination in sandstone / V. Saltas, F. Vallianatos, P. Soupios, J.P. Makris, D. Triantis. // *Proc. of Intern. Workshop in Geoenvironment and Geotechnics, Greece, 2005.* – ISBN 960-88153-7-1, P. 269–274.
 17. *Вашман А.А.* Ядерная магнитная релаксационная спектроскопия / А.А. Вашман, И.С. Пронин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.

18. *Svergun D.I.* Determination of the regularization parameter in indirect–transform methods using perceptual criteria / D.I. Svergun // *J. Appl. Cryst.* – Vol. 25. – 1992. – P. 495–503.
19. *Щукин Е.Д.* Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. – 445 с.
20. *Bard A.J.* *Electrochemical Methods*, Second ed. / A.J. Bard, L.R. Faulkner. – New York: John Wiley&Sons, Inc., 2001.
21. *Королев В.А.* Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы / В.А. Королев // *Соровский образовательный журнал.* – 1996. - №9. – С. 79-85.

Т.А. Василенко, А.К. Кірілов, В.В. Соболев, О.С. Дорошкевич, Є.О. Пронський

ЗМІНА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗВОЛОЖЕНОГО КАМ'ЯНОГО ВУГІЛЛЯ ПРИ МАГНІТОІМПУЛЬСНІЙ ДІЇ

Представлені результати дослідження відклику зволжених вугільних зразків на імпульсну магнітну дію з частотою 1 Гц. Спільні вимірювання методом імпедансної спектроскопії та імпульсного ЯМР спектрометра широких ліній на частоті ядер водню ^1H дозволили інтерпретувати ефект дії імпульсних магнітних полів на систему вугілля-вода на основі уявлень про подвійні електричні шари, які формуються в результаті адсорбції полярних молекул води на поверхні порового простору викопного вугілля.

Ключові слова: діелектричні властивості, імпедансна спектроскопія, неоднорідне середовище, поляризація, вугілля.

Т.А. Vasilenko, A.K. Kirillov, V.V. Sobolev, A.S. Doroshkevich, E.A. Pronsky

CHANGE OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF MOISTENED FOSSIL COAL UNDER MAGNETIC IMPULSIVE IMPACT

The results of a study of the response of moistened coal samples to pulse magnetic action with a frequency of 1 Hz are presented. Combined measurements by the method of impedance spectroscopy and pulse NMR spectrometer of wide lines at the frequency of ^1H hydrogen nuclei made it possible to interpret the effect of pulse magnetic field on the coal-water system on the basis of the concepts of double electric layers, which formed as a result of adsorption of polar water molecules on the surface of the pore space of fossil coals.

Keywords: dielectric properties, impedance spectroscopy, inhomogeneous medium, polarization, coal.