

УДК 622.831.537.86

Гладкая Е.В., канд. техн. наук
(ИФГП НАН Украины)

**ПРОГНОЗ ОПАСНОСТИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫДАВЛИВАНИЙ УГЛЯ
ПО ФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ И ВЕЩЕСТВЕННОМУ СОСТАВУ
УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ПЕСЧАНИКОВ**

Гладка О.В., канд. техн. наук
(ИФГП НАН України)

**ПРОГНОЗ НЕБЕЗПЕКИ РАПТОВИХ ВИДАВЛЮВАНЬ ВУГІЛЛЯ ЗА ФІЗИ-
ЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ТА РЕЧОВИННИМ СКЛАДОМ ВУГЛЕВМІС-
НИХ ПІСКОВИКІВ**

Gladkaya Ye.V., Ph.D.(Tech)
(IPMP NAS of Ukraine)

**THE COAL SUDDEN SQUEEZING DANGER PROGNOSIS BASING ON
PHYSICAL PROPERTIES AND MATERIAL COMPOSITION OF THE
CARBONACEOUS SANDSTONES**

Аннотация. В статье приведены результаты исследований влияния физических свойств песчаника основной кровли $l_1Sl_2^1$ на призабойную часть угольного пласта l_1 при проведения горных работ на шахте им. А.Ф. Засядько. В результате экспериментальных исследований физических свойств песчаника было установлено, что в области внезапных выдавливания угля наблюдается уменьшение количества водосодержащих компонент ($\Delta W < 4\%$) в песчанике. Также анализ результатов исследований показал, что изменение количества водородсодержащих компонент ΔW в песчанике обусловлено как относительным изменением общего содержания железа в нем, так и отдельных его соединений, определенных методом Мессбауэровской спектроскопии.

Полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами геологической и маркшейдерской съемок, фиксирующих фактическое состояние кровли и угольного массива пласта l_1 . На основе закономерностей влияния соединений железа на количество водородсодержащих компонент в песчанике, обоснован и предложен критерий для прогноза внезапных выдавливания угля.

Ключевые слова: внезапные выдавливания угля, песчаник, основная кровля, соединения железа, водородсодержащие компоненты.

В настоящее время горные работы на угольных шахтах Донбасса ведутся на глубинах более 1000 метров. С переходом горных работ на большие глубины наблюдается рост частоты и интенсивности внезапных разрушений призабойной части угольного массива (внезапные выдавливания угля) при проведении подготовительных и выемочных выработок, обусловленных неравномерным распределением напряженно-деформированного состояния системы «угольный пласт - вмещающие породы» [1, 2].

Одним из факторов, влияющих на проявление внезапных выдавливания (отжимов) угля в призабойное пространство лав, является состав и структура вмещающих горных пород. Высокая изменчивость их свойств является причи-

ной неравномерного деформирования призабойной области угольного пласта и скачкообразного характера перераспределения напряжений впереди забоя выработки. Это относится в основном к мощным пластам песчаника, залегающим в основной кровле угольных пластов, являющиеся наиболее крепкими слоями в разрезе угленосной толщи и оказывающие на угольный пласт дополнительные, неравномерно-распределенные нагрузки и пластические деформации в процессе ведения горных работ [3].

В связи с этим, оценка степени влияния углевмещающих песчаников на призабойную часть угольного пласта и разработка на ее основе критериев прогноза внезапных выдавливаний угля является актуальной задачей, решение которой существенно позволит повысить не только эффективность, но и безопасность ведения горных работ.

Работы по изучению особенностей влияния свойств песчаника на проявления внезапных выдавливаний угля проводились при отработке 13-й восточной лавы по пласту l_1 на ПАО «Шахта им А.Ф. Засядько». Пласт l_1 относится к опасным по внезапным выбросам угля и газа, по суфлярным выделениям газа, глубина залегания пласта составляет 1170 м. Основная кровля угольного пласта представлена выбросоопасным, газонасыщенным и обводненным песчаником $l_1Sl_2^1$ мощностью до 30 м. Песчаник серого цвета, в основном полевошпатово-кварцевый на глинистом цементе, с горизонтальной и косой слоистостью, трещиноватый. На участке проведения экспериментальных работ наблюдались внезапные отжимы угля по всей мощности пласта на величину 0,3 - 0,5 м.

Пробы песчаника $l_1Sl_2^1$ отбирались через каждые 10 м по длине 11 технологических скважин, пробуренных по песчанику $l_1Sl_2^1$ с 13-го восточного вентиляционного и 13-го восточного конвейерного штреков. По полученным пробам песчаника $l_1Sl_2^1$ исследовались структурное состояние породообразующего кварца и количество водородсодержащих компонент в нем [4, 5].

В результате экспериментальных исследований физических свойств песчаника было установлено, что в зонах внезапных выдавливаний угля наблюдается уменьшение количества водосодержащих компонент ($\Delta W < 4\%$) в песчанике. Анализ спектрометрических данных свидетельствует, что водосодержащие компоненты (ΔW) идентифицируется как твердая фаза, с увеличением концентрации которой в структуре песчаника его модуль упругости возрастает.

При этом изменчивость ΔW , согласно проведенным исследованиям, напрямую связана с содержанием в образцах песчаника соединений железа, определенных методом Мессбауэровской спектроскопии [6]. Для данного цикла исследований изготавливались образцы песчаника в виде порошка с размером частиц менее 0,1 мм и снимались Мессбауэровские спектры песчаника на спектрометре фирмы WISSEL. В качестве радиоактивного источника использовался $Co-57$ в матрице хрома активностью 50 милликюри. Спектры измерялись в режиме постоянных ускорений. Для обработки спектров использовался метод наименьших квадратов с помощью программы UNIVEM.

Мессбауэровские спектры песчаника состоят из суперпозиций двух или трех компонент-дублетов с различными квадрупольными расщеплениями и химиче-

скими сдвигами. Квадрупольное расщепление определяется как расстояние между лоренцевскими линиями дублетов, химический сдвиг взят относительно альфа-железа. Дублет с малым квадрупольным расщеплением и сдвигом относится к трехвалентному железу, а дублет с большими значениями квадрупольного расщепления и сдвига относится к двухвалентному железу. Различие в спектрах состоит в относительной интенсивности этих компонент.

Анализ Мессбауэровских спектров песчаника показал, что железо в нем может присутствовать в виде трехвалентного железа FeS_2 (пирита) и двухвалентного железа в виде сидерита $FeCO_3$ и сульфатов железа, значительную долю которых составляют кристаллогидраты $FeSO_4 \cdot nH_2O$. Кристаллогидраты могут находиться в виде тетрагидрата $FeSO_4 \cdot 4H_2O$ и в виде моногидрата $FeSO_4 \cdot H_2O$.

На рис.1 приведен Мессбауэровский спектр песчаника основной кровли пласта l_1 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» с 60-го метра скважины, пробуренной с 13-го восточного вентиляционного штрека (пикет №55).

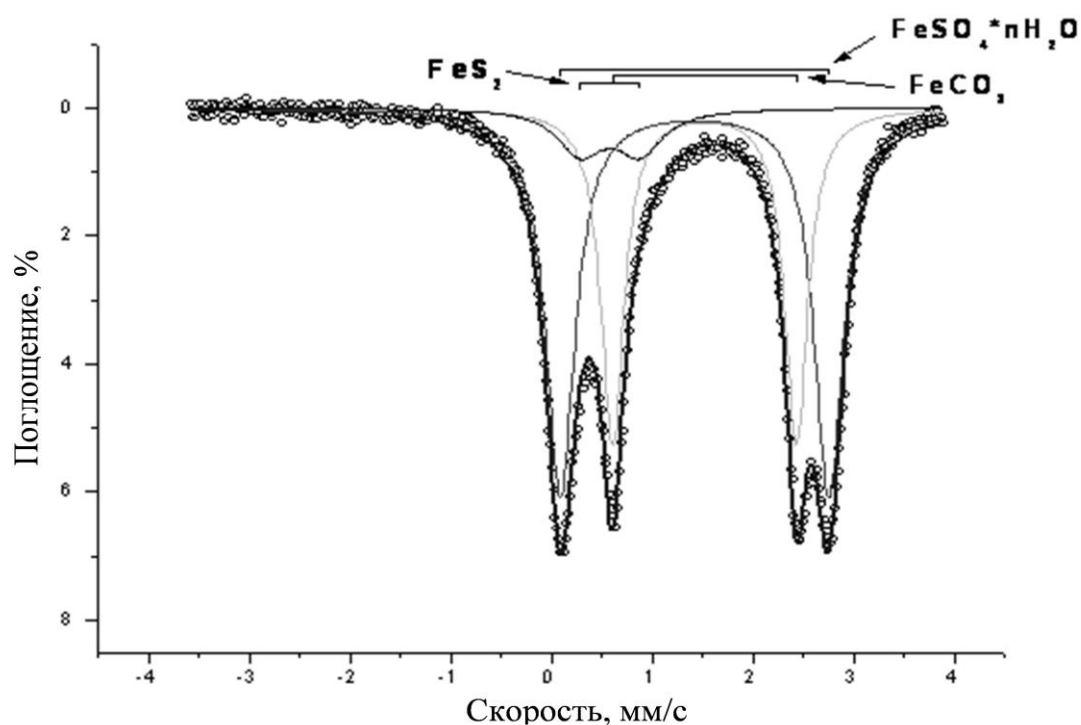


Рисунок 1 – Мессбауэровский спектр песчаника основной кровли пласта l_1 с 60-го метра скважины, пробуренной с 13-го восточного вентиляционного штрека (пикет №55), шахта им. А.Ф. Засядько

По оси ординат спектра показано поглощение в процентах, по оси абсцисс скорость радиоактивного источника относительно поглотителя из песчаника (в мм/с). В спектре хорошо видны компоненты от двухвалентного железа в двух формах - $FeCO_3$ (40,83% от площади всего спектра железа) и кристаллогидрата $FeSO_4 \cdot nH_2O$ (48,61% от общей площади спектра), остальное железо находится в виде трехвалентного пирита FeS_2 . Такая комбинация железа и общего количества железа позволяет, на основе мессбауэровских спектров, сделать вывод, что повышение количества водородсодержащих компонент в песчанике основной

кровли пласта l_1 коррелирует с появлением интенсивной компоненты в мессбауэровском спектре от двухвалентного железа.

Полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами геологической и маркшейдерской съемок, фиксирующих фактическое состояние кровли и угольного массива пласта l_1 .

Анализ результатов исследований показал, что изменение количества водородсодержащих компонент ΔW в песчанике обусловлено как относительным изменением общего содержания железа в нем (рис. 2), так и отдельных его соединений.

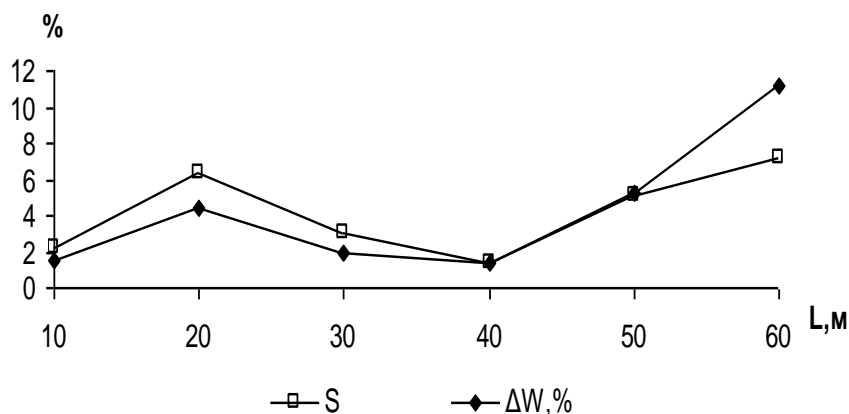


Рисунок 2 – Изменение содержания железа S (%) и водородсодержащей компоненты ΔW (%) в песчанике основной кровли пласта l_1 шахты им. А.Ф. Засядько по длине скважины (L, м), пробуренной с 13-го восточного вентиляционного штрека пикет №55

Для учета влияния нескольких факторов на изменение количества водородсодержащей компоненты в песчанике полученные результаты анализировались с помощью метода группового учета аргументов (МГУА) [7, 8]. Этот метод позволяет получать модель оптимальной сложности и максимальной точности с учетом нескольких факторов. В результате проведенных аналитических исследований была получена эмпирическая зависимость количества водородсодержащих компонент содержания различных соединений железа в песчанике по некоторым из технологических скважин:

$$\Delta W = 1,37 \cdot 10^{-8} \cdot x_2^2 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6^2 - 0,136 \cdot x_3 + 2,47,$$

где x_2 – общее содержание соединений железа в песчанике, %; x_3 – содержание FeS_2 , %; x_4 – содержание двухвалентного Fe^{2+} , %; x_5 – содержание $FeCO_3$, %; x_6 – содержание кристаллогидратов $FeSO_4 \cdot nH_2O$, %.

Полученные в результате проведенных аналитических исследований эмпирические зависимости количества водородсодержащих компонент от количества различных соединений железа в песчанике по скважинам, пробуренным с пикетов №44, №55, №48, №46 позволили установить, что количество водородсодержащих компонент находится в линейной зависимости от относительного содержания сего железа и содержания кристаллогидратов в песчанике (рис. 3).

При этом коэффициент корреляции $r > 0,8$.

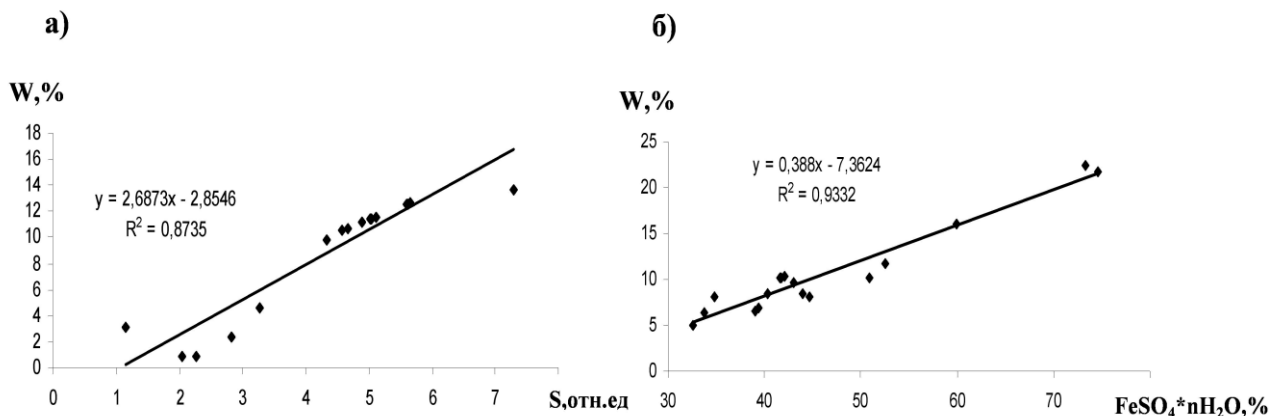


Рисунок 3 – Зависимость количества водородсодержащих компонент ΔW от общего содержания соединений железа S (а) и содержания кристаллогидратов (б) в песчанике основной кровли пласта l_1 на ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»

Дальнейший анализ Мессбауэровских спектров песчаника также показал, что в зонах внезапных выдавливания угля происходит уменьшение количества двухвалентного железа $FeSO_4 \cdot nH_2O$. Так по скважине, пробуренной с 13-го восточного вентиляционного штрека (пикет №44) в зоне отжима (35-45м по длине скважины) наблюдается уменьшение содержания $FeSO_4 \cdot nH_2O$ на 20%, а содержание сидерита $FeCO_3$ увеличивается на 40% (рис.4).

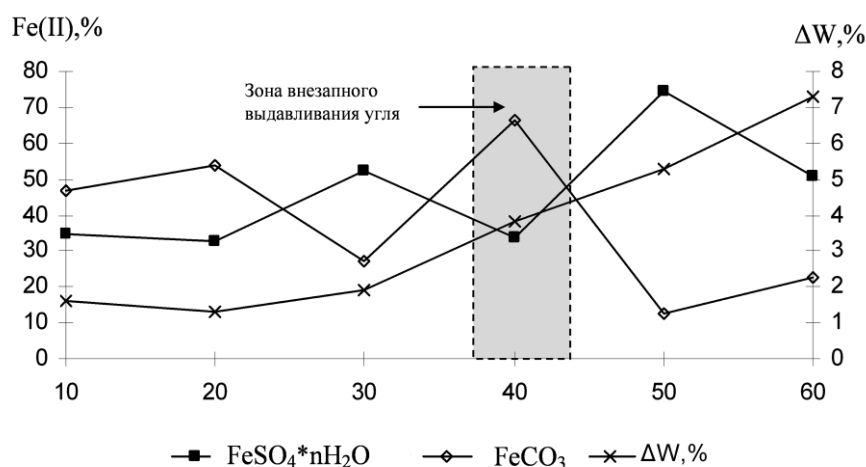


Рисунок 4 – Изменение содержания двухвалентного железа ($Fe(II)$, %) и водородсодержащей компоненты (ΔW , %) в песчанике основной кровли пласта l_1 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» по длине скважины, пробуренной с 13-го восточного вентиляционного штрека пикет №44

Аналогичная картина изменения количества водородсодержащих компонент и соединений железа в зонах внезапных выдавливания угля была получена при исследовании песчаника основной кровли угольного пласта из скважин, пробуренных с 13-го восточного конвейерного штрека. По длине каждой из этих скважин содержание трехвалентного железа FeS_2 (пирита) практически не из-

менялось и составляло 15-20%.

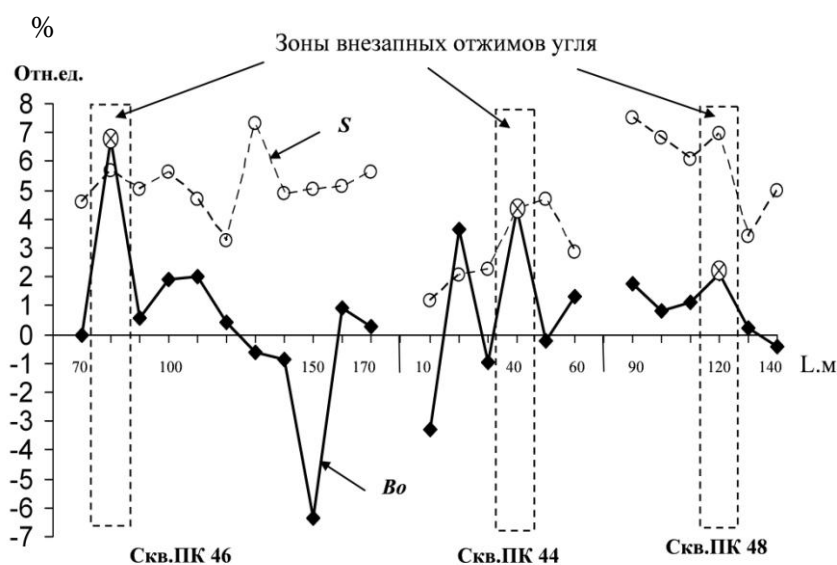
Таким образом, проведенные исследования показали, что изменение количества водородсодержащих компонент в песчанике осуществляется за счет разложения $FeSO_4 \cdot nH_2O$ и $FeCO_3$ при нагревании исследуемых образцов. При увеличении температуры нагрева до 750^0C происходит отрыв кристаллогидратной воды за счет ступенчатой дегидратации и разложения термически неустойчивого соединения $FeCO_3$.

Для определения склонности угольных пластов к внезапным выдавливаниям угля на основе экспериментальных данных был разработан критерий B_0 , физическая сущность которого базируется на экспериментально установленных закономерностях изменения физических свойств песчаника и его вещественного состава:

$$B_0 = \frac{\Delta W}{\Delta Fe}, \text{ при } S \geq 4$$

где ΔW – удельные изменения количества водородсодержащих компонент в песчанике; ΔFe – удельные изменения содержания кристаллогидратов $FeSO_4 \cdot nH_2O$; S – общее содержание железа, % (по данным мессбауэровских спектров).

Анализ изменений показателя B_0 показал, что увеличение значений B_0 в 2 раза и более при повышенном содержании соединений железа и особенностей микроструктуры (изменение фазового состава) хорошо согласуются с проявлениями внезапных выдавливаний угля по результатам геологической и маркшейдерской съемок (рис. 5).



S – общее содержание железа, % (по данным мессбауэровских спектров); L – интервал отбора проб, м; \otimes – внезапные выдавливания угля

Рисунок 5 – Изменение показателя B_0 в песчанике основной кровли пласта l_1 по длине технологических скважин, ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»

На основе полученных результатов были определены следующие критериальные значения параметра B_0 для пласта l_1 :

1. $B_0 \geq 2$ — внезапное выдавливание угля (при повышенном содержании со-

единений железа в песчанике основной кровли);

2. $B_o < 2$ — отсутствие внезапных выдавливания угля.

Также полученные результаты позволили получить зависимость параметра B_o от содержания соединений железа в песчанике (рис. 6).

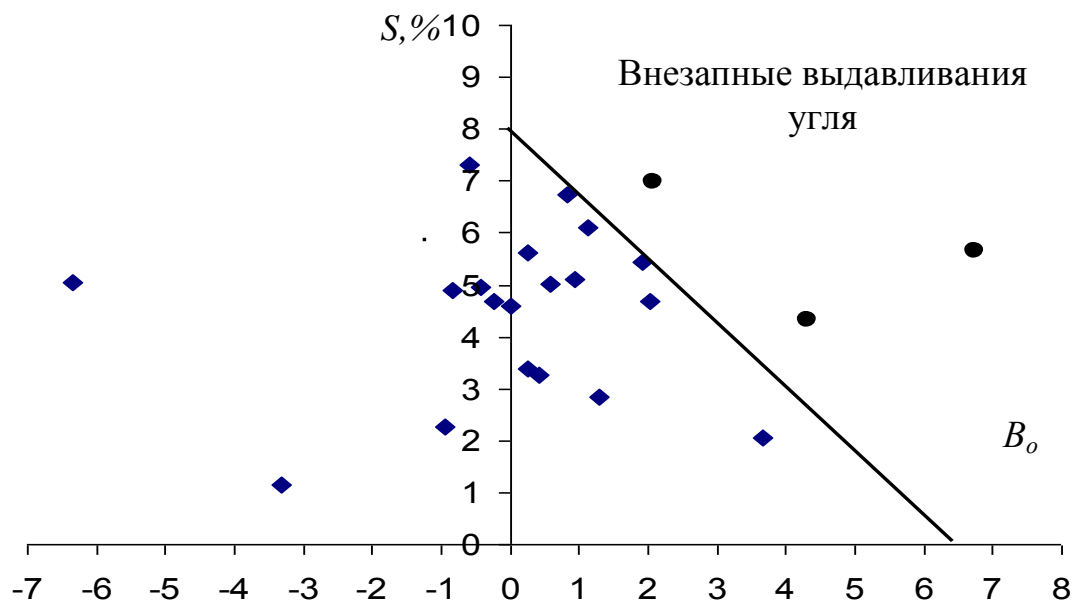


Рисунок 6 – Зависимость параметра B_o от содержания соединений железа S (по данным Мессбауэровских спектров, %) в песчанике

Аппроксимация разделяющей линии образцов из зон внезапных выдавливания и вне их является критерием прогноза склонности угольных пластов к внезапным выдавливаниям угля, который имеет вид:

$$D = S + 1,23 \times B_o \geq 8,$$

где S - общее содержание железа, % (по данным Мессбауэровских спектров).

Выводы

Таким образом, на основе проведенных исследований за изменчивостью физических свойств песчаника основной кровли, выявлено влияние их неоднородности на проявления динамической активности угольного пласта в виде внезапных выдавливания.

Установлено, что количество водородсодержащих компонент ΔW в песчанике основной кровли угольного пласта находится в зависимости от содержания в нем соединений железа. На основе полученных результатов обоснован критерий прогноза внезапных выдавливания угля для пласта l_1 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько», учитывающий удельные изменения количества водородсодержащих компонент ΔW и двухвалентного железа в песчанике основной кров-

ли. Также получены критериальные значения вышеприведенных показателей физических свойств песчаника основной кровли, которые обуславливают развитие внезапных выдавливаний угля и позволяют повысить точность прогноза этих явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Внезапные выдавливания угля: монография / В.П. Коптиков, И.А. Южанин, В.П. Евдокимова [и др.]. — Донецк: Ноулидж, 2010. — 240 с.
2. Большинский, М.И. Газодинамические явления в шахтах / М.И. Большинский, Б.А. Лысиков, А.А. Каплюхин. — Севастополь: Вебер, 2003. — 284 с.
3. Кравченко, А.В. Геомеханическое обоснование критерия прогноза внезапных выдавливаний угля с учетом физических особенностей вмещающих пород. / А.В. Кравченко // Физико-технические проблемы горного производства : сб. науч. тр. НАН Украины, Институт физики горных процессов. — Донецк. — 2011. — №14. — С. 86 — 92.
4. Механизм разрушения песчаника с учетом фазового состояния кварца и водородсодержащих компонент / Г.П. Стариков, Е.В. Гладкая, В.В. Завражин, А.В. Кравченко // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. НАН Украины, Институт физики горных процессов. — 2007. — №. 10. — С. 13—18.
5. Прогноз аномальных зон в песчанике по изменению фазового состояния кварца и количества водородсодержащих компонент / Г.П. Стариков, Е.В. Гладкая, В.В. Завражин, А.В. Кравченко // Материалы XVIII Международной Научной Школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». — Симферополь: Таврический национальный университет, 2008. — С. 302 — 304.
6. Medina J.C., Butala S.J., Bartholomew C.H. and Lee M.L. (2000), *Fuel*, Vip.-79,-p. 89.
7. Метод группового учета аргументов (МГУА) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://mgua.irtc.org.ua>.
8. Proceedings of International Workshop on Inductive Modelling (IWIM 2007) - Prague: Czech Technical University, 2007. - 329 P.

REFERENCES

1. Koptikov, V.P., Yuzhanin, I.A., Yevdokimova, V.P., Muravyov, V.M. and Ryzhkov M.F. (2010), *Vnezapnye vydavlivaniya uglya: monografiya* [Sudden extrusion of coal: monograph], Noulidzh, Donetsk, UA.
2. Bolshinsky, M.I., Lysikov, B.A. and Kaplyuhin, A.A. (2003), *Gazodinamicheskiye yavleniya v shakhtakh* [Gas-dynamic phenomena in mines], Sevastopol, Veber, 284 p.
3. Kravchenko, A.V (2011), «Geomechanical substantiation criteria forecast sudden extrusions of coal taking into account physical characteristics of the host rocks», *Physical and technical problems of mining*, vol. 14., pp. 86-92.
4. Starikov, G.P., Gladkaya, E.V., Zavrazhin, V.V. and Kravchenko, A.V. (2007), «The mechanism of destruction of sandstone based of the phase state of quartz and hydrogen component», *Physical and technical problems of mining*, vol. 10., pp. 13-18.
5. Starikov, G.P., Gladkaya, E.V., Zavrazhin, V.V. and Kravchenko, A.V. (2008), «Prognosis anomalous zones in the sandstone to change the phase state and the amount of hydrogen-containing quartz component», *Materials XVIII International Scientific School "Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings."*, Tavria National University, Simferopol, UA, pp. 302 - 304.
6. Medina J.C., Butala S.J., Bartholomew C.H. and Lee M.L. (2000), *Fuel*, no. 79, p. 89.
7. The method of group account of arguments (MGCA), available at: <http://mgua.irtc.org.ua>
8. *Proceedings of International Workshop on Inductive Modelling (IWIM 2007)* (2007), Czech Technical University, Prague, CH.

Об авторе

Гладкая Елена Викторовна, кандидат технических наук, и.о. заведующего отдела управления состоянием горного массива, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепрпетровск, Украина, gladkaya_ev@mail.ru.

About the authors

Gladkaya Elena Viktorovna, Candidate of technical Science (Ph.D.), performing duties of chief of Department of control the state massif, Institute of Physics of Mining Processes the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU IPhMP), Dnepropetrovsk, Ukraine, gladkaya_ev@mail.ru.

Анотація У статті наведено результати досліджень впливу фізичних властивостей піско-вика основної покрівлі $l_1Sl_2^1$ на привибійну частину вугільного пласта l_1 при проведенні гірничих робіт на ПАТ «Шахта ім. О.Ф. Засядька». У результаті експериментальних досліджень фізичних властивостей пісковику було встановлено, що в області раптових видавлювань вугілля спостерігається зменшення кількості компонент, які містять водень ($\Delta W < 4\%$) у пісковику. Також аналіз результатів досліджень показав, що зміна кількості компонент, які містять водень ΔW у пісковику обумовлено як відносною зміною загального вмісту заліза у ньому, так і окремих його сполук, визначених методом Месбауерівської спектроскопії. Отримані експериментальні дані порівнювалися з результатами геологічних та маркшейдерських зйомок, фіксуючих фактичний стан покрівлі та вугільного масиву пласта l_1 . На основі закономірностей впливу сполук заліза на кількість компонент, які містять водень у пісковику, обґрунтовано і запропоновано критерій для прогнозу раптових видавлювання вугілля.

Ключові слова: раптові видавлювання вугілля, пісковик, основна покрівля, сполуки заліза, компоненти, які містять водень.

Abstract. The article deals with the results of research of influence of the physical properties of the main roof sandstone $l_1Sl_2^1$ of coal seam l_1 bottomhole during the mining operations in the PJSC "Zasyadko coal mine". As a result of experimental research of physical properties of sandstone it has been found that reducing the amount of water-based component ($\Delta W < 4\%$) in the sandstone is observed in the sudden extrusions coal field. Also analysis of the results showed that the change in the amount of hydrogen-containing component ΔW in sandstone is due both to the relative change of the total iron content in it, and its individual compounds defined by Mossbauer spectroscopy. The experimental data were compared with the results of geological and mine surveys, fixing the actual condition of the main overlying and the solid coal seam l_1 . On the basis of influence patterns of the iron compounds to the amount of hydrogen-containing component in the sandstone, a criterion for the prediction of sudden coal extrusions was grounded and proposed.

Keywords: sudden extrusion of coal, sandstone, the main overlying, iron compounds, hydrogen-containing components.

Стаття поступила в редакцію 5.03.2016

Рекомендовано к печати д-ром геол. наук Л.И. Пимоненко