

## ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЫБРОСА УГЛЯ И ГАЗА

В. Соболев<sup>1\*</sup>, Д. Рудаков<sup>2</sup>, Л. Стефанович<sup>3</sup>, К. Ях<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, Национальный горный университет, Днепр, Украина

<sup>2</sup>Кафедра гидрогеологии и инженерной геологии, Национальный горный университет, Днепр, Украина

<sup>3</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины, Днепр, Украина

<sup>4</sup>Институт оптоэлектроники, Военно-техническая академия, Варшава, Польша

\*Ответственный автор: e-mail [velo1947@ukr.net](mailto:velo1947@ukr.net), тел. +380503426198

## PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELLING OF THE CONDITIONS OF COAL AND GAS OUTBURSTS

V. Sobolev<sup>1\*</sup>, D. Rudakov<sup>2</sup>, L. Stefanovych<sup>3</sup>, K. Jach<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Construction, Geotechnics and Geomechanics Department, National Mining University, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>Hydrogeology and Engineering Geology Department, National Mining University, Dnipro, Ukraine

<sup>3</sup>Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

<sup>4</sup>Institute of Optoelectronics, Military University of Technology, Warsaw, Poland

\*Corresponding author: e-mail [velo1947@ukr.net](mailto:velo1947@ukr.net) tel. +380503426198

### ABSTRACT

**Purpose.** Experimental study and theoretical modeling of conditions initiating destructive processes and development of gas generation in coals.

**Methods.** Analysis, generalization and statistical processing of experimental data and results of analytical studies followed by the identification of patterns, and numerical solution of equations in partial derivatives.

**Findings.** Experimental studies of changes in properties of mechanically activated samples of gas coal and fat coal in weak electric fields have been performed. The experimental results were compared with the characteristics of coals taken from the zones of different outburst hazard probability, which enabled to formulate new ideas about the causes of gas generation in coals. A mathematical model has been elaborated for gas outburst development taking into consideration the solid phase porosity changes due to the transition of coal organic mass to gas.

**Originality.** The treated samples with the broken microstructure demonstrated a significant increase (1.5 – 3 times) in the characteristic time of methane desorption and manifestation of electret properties identified by the value of the evoked potential and electrochemical activity, while qualitative and quantitative changes in the treated coal properties were identical to the natural analogues. It is for the first time that the developed mathematical model of gas flow during the outburst reproduces the changes in porosity and permeability of the rock caused by chemical reactions of gas generation by coal organic mass.

**Practical implications.** The improvement of the proposed outburst model can be used for predictive estimations of instantaneous outbursts taking into account the changes in thermodynamic and kinetic stability parameters of the “coal – gas” system.

**Keywords:** coal, destruction, gas generation, instantaneous outburst, gas flow, mathematical model

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних 18 десятилетий одной из наиболее актуальных научных и практических проблем горной науки являются выбросы угля и газа. История исследования газодинамических явлений (ГДЯ), возникающих при подземной добыче угля, свидетельствует о том, что наибольшую опасность среди известных явлений представляют внезапные выбросы угля и газа, поскольку являются непосред-

ственной причиной травматизма и гибели людей, наносят значительный материальный и экономический ущерб предприятию (Voloshin, Vaynshteyn, & Bryukhanov, 2008; Alekseyev, Starikov, & Chistokletov, 2010; Antoshchenko, Radchenko, Ashikhin, 2015;). Особо опасная ситуация может возникать после выброса за счет эмиссии газа из угольного массива – в зоне работ по восстановлению разрушенных выработок создается аварийная ситуация, обусловленная обра-

зованием взрывоопасной метановоздушной смеси (Jiang, Liang, Guo, & Huang, 2017).

Из научных положений одной из наиболее цитированных теорий – энергетической теории – следует, что внезапные выбросы обусловлены одновременным действием основных трех факторов, представленными традиционными параметрами: механическими напряжениями в пластах угля, физическими и химическими свойствами угля и сорбированным газом. В соответствие с этой теорией выбросоопасность является функцией выше перечисленных параметров. Недостатки: отсутствуют механизмы, которые бы объясняли происхождение больших количеств газа, не принимаются во внимание другие возможные факторы и параметры, низкая достоверность прогноза выбросов, мало удовлетворяющая практические потребности.

Исследования причин образования выбросоопасных зон в угольных пластах, механизмов инициирования и развития выбросов угля и газа направлено на решение проблемы прогноза вероятного проявления выбросов, создания способов снижения потенциала выбросоопасности и предотвращение, таким образом, проявления катастрофических процессов в технологической зоне. В этом направлении одной из важнейших первоочередных задач являются физико-химические исследования свойств каменных углей в зависимости от основных факторов внешнего воздействия – механических, тепловых, электрических и магнитных, в том числе, и комплексных, включающих сочетания любых из перечисленных видов.

Для получения информации о причинах изменения свойств исследуемых углей, необходимо наибольшее внимание уделять изучению свойств наноразмерных компонентов и прежде всего углеродным фазам. Именно свойства наноразмерных углеродных фаз, их реакция на действие внешних факторов, в том числе слабых физических полей является определяющими поведением макроразмерных объектов. Причиной такого положения может быть недооценка либо отрицание проявления химических и квантово-механических закономерностей, лежащих в основе механизма перехода органической массы угля в газ. До сих пор главный вопрос о механизме образования большого количества газа в процессах формирования опасных зон, состоящих из нестабильных потенциально выбросоопасных углей, остается дискуссионным.

История образования системы “уголь – газ”, насчитывающая многие десятки миллионов лет, может быть представлена как комплекс закономерных природных процессов, формирующих свойства и характеристики угля. Важными природными факторами, ответственными за формирование выбросоопасных углей являются:

1) физико-химические особенности кинетики образования угля при постоянном воздействии изменяющихся значений теплового, механического, электрического и магнитного полей, формирующих физические и химические свойства угля;

2) механохимическая активация микроstructures угля;

3) термо- и электростимулированная деструкция наноразмерных компонент микроstructures угля;

4) наноструктурные компоненты угля и их влияние в целом на свойства угля;

5) роль равнокомпонентного всестороннего сжатия для условия термодинамического равновесия и кинетической стабильности системы “уголь – газ”.

В исследованиях первого фактора традиционно игнорируется действие электрических и магнитных полей, считая их не представляющими практического интереса. Из перечисленных факторов хорошо изучен второй. В исследованиях третьего фактора мало накоплено результатов по электродеструкции. Четвертый фактор изучается на уровне микроstructures, но часто результаты интерпретируются как относящиеся к наноразмерной структуре. Отсюда не корректная интерпретация полученных результатов. В исследованиях пятого фактора доминируют направления, сформулированные в научных положениях энергетической гипотезы.

Таким образом, в соответствие с изложенными выше представлениями об актуальности исследования природы и решения проблемы внезапных выбросов угля и газа, нами избрано одно из мало изученных направлений в науке об углях – физика и химия электростимулированных углей.

Целью работы является экспериментальные исследования и теоретическое моделирование инициирования деструктивных и развития газогенерирующих процессов в каменных углях.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

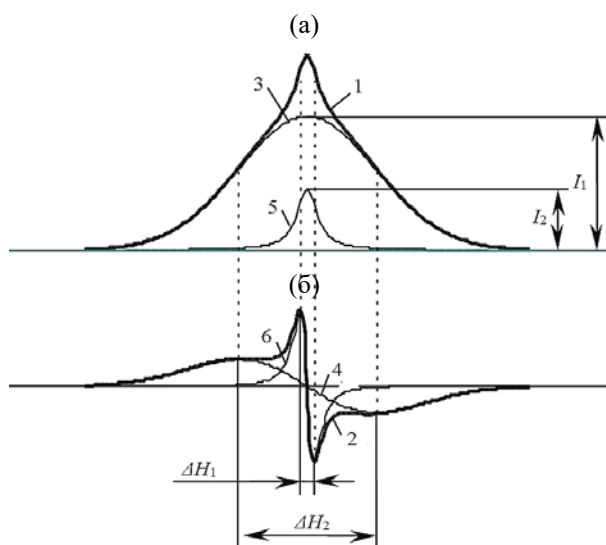
Для исследования возможной деструкции микроstructures угля, стимулированной электрическим полем слабой напряженности (10 – 300 В/см) и термической активацией в диапазоне температур 295 – 340 К, использованы пробы угля марки “Г” (“Шахта Центральная” ГП “Мирноградуголь”) и уголь марки “Ж” (ГП УК “Краснолиманская”). Методика проведения экспериментов и первые результаты электрической обработки образцов угля приведены в (Pivnyak, Sobolev, & Filippov, 2012). В экспериментах использовались измельченные (механоактивированные) угли фракции 160/125.

Регистрация спектров ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектров) угля проводилась по методике Института физики горных процессов НАН Украины (ИФГП). Использован радиоспектрометр ЯМР широких линий конструкции ИФГП. Напряженность поля постоянного магнита 4600 Э, однородность  $2 \cdot 10^{-6}$  Э/см, резонансная частота 19.5 МГц. Влажность обоих исходных образцов выше, чем обработанных электрическим полем. Вероятно, в связи с этим, площади узких линий спектра ЯМР  $^1\text{H}$  угля для этих образцов также больше. Соответствующие площади широких линий (от органики угля) в пределах ошибки эксперимента практически одинаковы (исследования проводились в ИФГП, результаты представлены д.т.н. Е.В. Ульяновой). Основные параметры сигнала ЯМР: площадь сигнала  $S$ , пропорциональная числу исследуемых ядер в единице объема вещества; широкая линия  $\Delta H$  – расстояние между максимумами ( $A/m$ ). Для сопоставления данных в Таблице 1 показаны обозначения, соответствующие спектру ЯМР  $^1\text{H}$ , показанному на Рисунке 1.

**Таблица 1. Характеристики углей, обработанных электрическим полем**

Уголь марки Г, обработанный при $T = 320$ К; влажность перед измерениями 2.14%								
Спектр №	$a$	$c$	$d$	$f$	$S_y$	$S_{ш}$	$S_y/S_{ш}$	$d/a$
1	1.53	6.71	0.734	0.403	0.905	12.83	0.070538	0.479739
2	1.48	6.52	0.717	0.357	0.786	12.068	0.065131	0.484459
3	1.58	6.62	0.723	0.349	0.775	13.076	0.059269	0.457595
Среднее	1.53	6.617	0.725	0.370	0.822	12.658	0.065000	0.474000
Уголь марки Г исходный; влажность перед измерениями 2.27%								
Спектр №	$a$	$c$	$d$	$f$	$S_y$	$S_{ш}$	$S_y/S_{ш}$	$d/a$
1	1.36	6.18	0.7422	0.563	1.265	10.521	0.120236	0.545588
2	1.63	6.21	0.704	0.401	0.864	12.600	0.068571	0.431902
3	1.77	6.65	0.748	0.452	1.032	14.713	0.070142	0.422599
Среднее	1.5877	6.347	0.731	0.472	1.054	12.635	0.083419	0.460618
Уголь марки Ж, обработанный при $T = 320$ К; влажность перед измерениями 0.86%								
Спектр №	$a$	$c$	$d$	$f$	$S_y$	$S_{ш}$	$S_y/S_{ш}$	$d/a$
1	1.61	6.20	0.459	0.363	0.511	12.495	0.040896	0.285093
2	1.68	6.23	0.437	0.384	0.514	13.100	0.039237	0.260119
3	1.50	6.66	0.380	0.426	0.495	12.487	0.039641	0.253333
Среднее	1.597	6.363	0.425	0.391	0.507	12.694	0.039940	0.266124
Уголь марки Ж исходный; влажность перед измерениями 1.09%								
Спектр №	$a$	$c$	$d$	$f$	$S_y$	$S_{ш}$	$S_y/S_{ш}$	$d/a$
1	1.42	6.08	0.329	0.705	0.696	10.810	0.064385	0.23169
2	1.50	5.85	0.295	0.593	0.529	10.991	0.04813	0.196667
3	1.54	6.40	0.329	0.707	0.698	12.331	0.056605	0.213636
Среднее	1.532	6.11	0.318	0.668	0.641	11.377	0.056342	0.207572

$a, d$  – амплитуды широкой и узкой линии спектра соответственно;  $c, f$  – их ширины;  $S_y, S_{ш}$  – их площади



**Рисунок 1. Линия поглощения спектра ЯМР твердого тела, содержащего флюид (а), и производная от линии поглощения (б): 1 – спектр поглощения; 2 – первая производная от спектра поглощения; 3, 4 – широкая составляющая спектра поглощения и его первой производной; 5, 6 – узкая составляющая спектра поглощения и его первой производной (в нашем случае  $a - I_1$ ;  $d - I_2$ ;  $c - \Delta H_1$ ;  $f - \Delta H_2$ )**

Для исследования параметров десорбции образцы высушивались при 363 К и насыщались метаном в течение 15 суток. После насыщения метаном образцы помещались в спектрометр ЯМР, где записывались спектры ЯМР  $^1\text{H}$  в процессе десорбции метана. Из полученных спектров определено изменение амплитуды (интенсивности) узких линий ЯМР, отвечающие изме-

нению содержания метана во времени, и определено характерное время десорбции  $\tau_{\text{дес}}$  (Рис. 2, Табл. 2). Условия записи спектров поддерживались одинаковыми.

**Таблица 2. Изменение времени десорбции метана  $\tau_{\text{дес}}$  из углей исходных и обработанных электрическим полем**

Уголь	Марка Г		Марка Ж	
	исходный	обработанный	исходный	обработанный
$\tau_{\text{дес}}$ , мин	25.9	79.5	39.1	68.0

Спектр ЯМР газонасыщенного угля (Рис. 1) состоит из узкой составляющей – лоренцева линия 5 и широкая составляющая спектра – гауссова линия 3, параметры которой содержат информацию о количестве водорода в структуре угля. Поскольку методом ЯМР  $^1\text{H}$  получаемые спектры широких линий представляют сумму производных от линий поглощения, то для интерполяции экспериментальных спектров ЯМР  $^1\text{H}$  используется суперпозиция первых производных лоренцевой и гауссовой составляющих линий (Ul'yanova, 2012).

Для обработанных образцов (образцы с нарушенной микроструктурой) наблюдается значительное увеличение характерного времени десорбции метана. Сравнивая ход десорбции из образцов исходного угля и обработанного электрическим полем, газонасыщенность уменьшается всего на несколько процентов, тогда как скорость выделения метана существенно возрастает. В работе (Ul'yanova, 2012) приведены аналогичные результаты исследований проб углей, отобранных с различных участков угольного пласта при сравнении углей из спокойных участков пласта с углями, взятыми на участках повреждения вблизи опасных зон, т.е. углей с нарушенной микроструктурой.

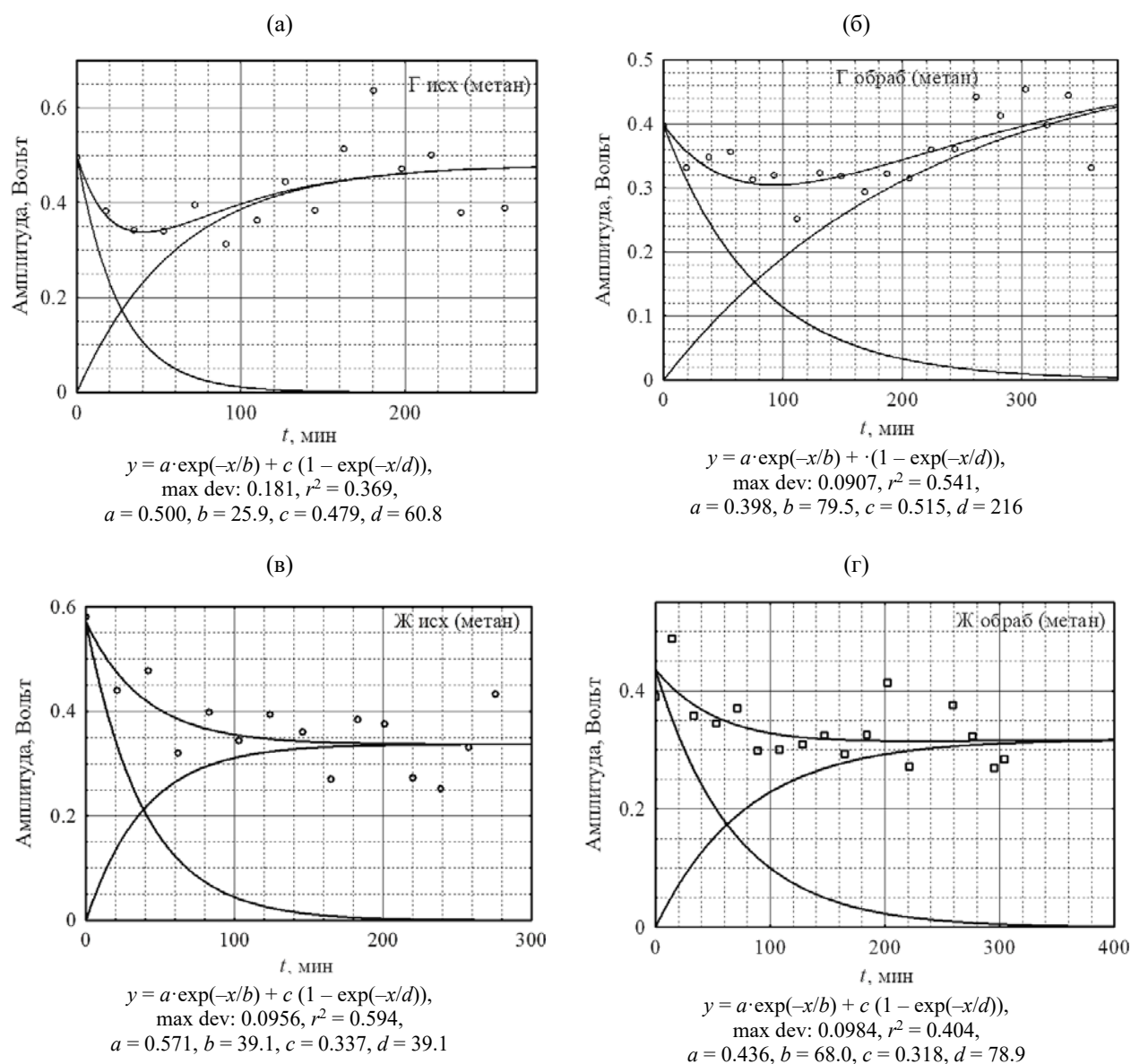


Рисунок 2. Изменение амплитуды узкой линии спектра ЯМР  $^1\text{H}$  газонасыщенного образца угля при десорбции метана (точки) и разложение полученной зависимости (кривые): (а) уголь марки  $\Gamma$  (исходный); (б) уголь марки  $\Gamma$  (обработанный); (в) уголь марки  $\mathcal{J}$  (исходный); (г) уголь марки  $\mathcal{J}$  (обработанный)

Здесь же приведены результаты десорбции метана из угля спокойных зон и из зоны действия ГДЯ. Скорость десорбции метана практически одинакова для всех образцов. Для выброшенных углей характерна малая интенсивность выделения газа. Малая газонасыщенность выброшенных углей, очевидно, связана с потерей коллекторских свойств.

На наш взгляд, причиной резкого затухания выделения газа является завершение химических процессов, обусловленных снижением избыточной энергии, запасенной микроструктурой угля в процессе физико-механических воздействий.

Проведены исследования гравиметрическим методом потери массы газонасыщенными образцами (десорбция метана) при температуре 363 К. На Рисунке 3 показаны полученные зависимости для двух образцов угля марки  $\mathcal{J}$ . Необработанный образец газонасыщенного угля через 100 с теряет 0.063 г, через 400 с потеря массы составляет 0.088 г. Потери

массы обработанного угля составляют 0.065 г и 0.075 г за 100 и 400 с соответственно. Таким образом, темп потери массы у исходного образца выше, чем у обработанного. Аналогичная картина характерна и для образцов угля марки  $\Gamma$ .

Использованные в экспериментах механоактивированные образцы угля имели повышенную химическую активность. Дополнительная обработка в электрическом поле с повышением температуры угля в пределах диапазона 293 – 320 К приводит к резкому возрастанию эффективности электрической обработки. Об этом свидетельствуют результаты анализа электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), инфракрасной (ИК) и ЯМР спектроскопии, рентгенометрических анализов, термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии, лазерного дифракционного анализа размеров частиц и др., полученные в (Pivnyak, Sobolev, & Filippov, 2012; Sobolev, Bilan, & Samovik, 2013).

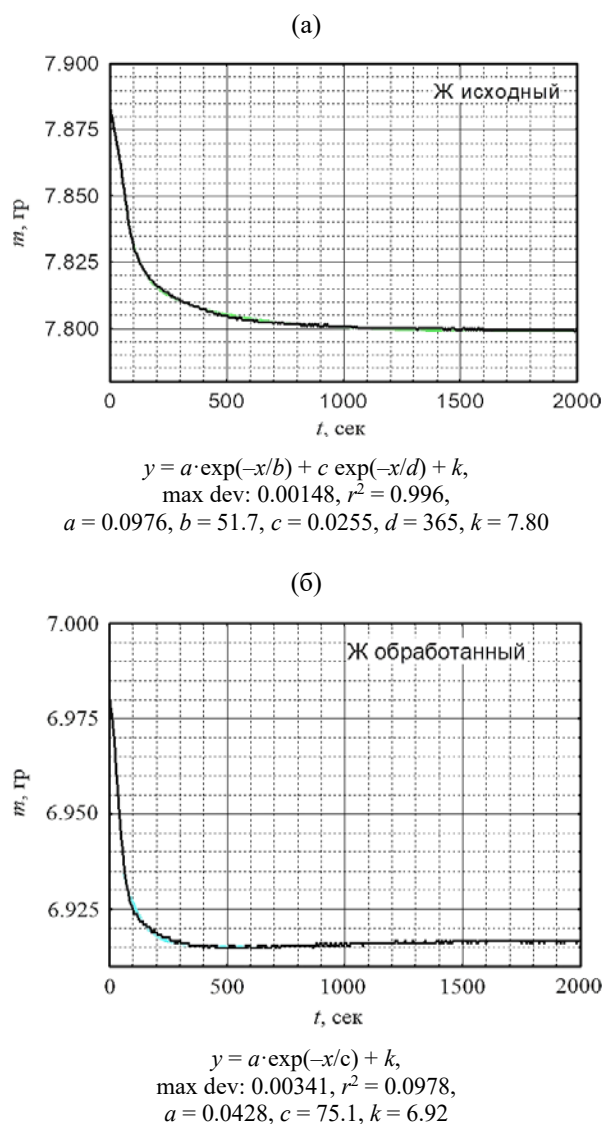


Рисунок 3. Потеря массы образцом угля марки Ж: (а) исходный; (б) обработанный при  $T = 363 \text{ K}$

Увеличение химической активности предварительно измельченного угля, при дополнительном воздействии электрического поля слабой напряженности, можно объяснить активизацией каталитических процессов – как следствием увеличения концентрации химически активных центров (нескомпенсированных электрических зарядов) на внутренних поверхностях пробы угля. Известно (Gubkin, 1978), что нескомпенсированные электрические заряды создают в окружающем электрете пространстве квазистатическое электрическое поле.

Для доказательства принадлежности угля к электретам в экспериментах использовался каменный уголь, имеющий следующие характеристики: содержание углерода 85.9%, водорода 5.4%, показатель отражения витринита  $R_0 \geq 1.03\%$ ,  $Y = 18 \text{ мм}$ ,  $W = 1.1\%$ , теплота сгорания  $Q^{daf} = 36.6 \text{ МДж/кг}$ ,  $V^{daf} = 32.1\%$ . Образцы готовились из угля, измельченного до фракций 160/125 мкм. Среднее значение массы каждого образца  $\sim 1.24 \text{ г}$ . Максимальная температура нагрева при электрофизических обработках не превышала 370 К. Эксперименты проводились по мето-

дике, описанной в (Sobolev, Bilan, & Samovik, 2013). Разность потенциалов задавалась источником питания и составляла 290 В, напряженность электрического поля  $\sim 30 - 305 \text{ В/см}$ , время обработки каждого образца  $\sim 4 \text{ час}$ .

В результате пропускания тока образцы угля приобретали разность потенциалов  $U_{В.П.}$ , которая обнаруживалась после выключения поляризирующего тока. Вызванный потенциал  $U_{В.П.}$  определяли по компенсационной методике (Gubkin, 1978), величина которого (электретная разность потенциалов) спадает во времени по закону:

$$U_{В.П.} = U_{В.П.0} \cdot \exp(-\lambda \cdot \tau), \quad (1)$$

где:

$U_{В.П.0}$  – разность вызванных потенциалов в момент времени  $\tau = 0$ ;

$\lambda$  – постоянная распада поля вызванной поляризации (Sessler, 1980).

Способность породы создавать  $U_{В.П.}$  характеризуется вызванной электрохимической активностью:

$$A_B = \frac{U_{В.П.}}{U_{ПП}}, \quad (2)$$

где:

$U_{ПП}$  – разность потенциалов, приложенная к образцу угля.

Так вызванная электрохимическая активность ( $A_B$ ) для выброшенного угля марки Ж (шахта им. А.Ф. Засядько) составляет  $8.8 \cdot 10^{-6}$ , из невыбросоопасной зоны  $\sim 10^{-2}$  (Zaytsev, Malova, & Panchenko, 1992). Значение относительного спада электретной разности потенциалов  $\Delta U_{В.П.}$  характеризует устойчивость поляризованного состояния угля и определяется из следующего выражения:

$$\Delta U_{В.П.} = \left( \frac{U' - U''}{U'} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где:

$U'$  – значение  $U_{В.П.}$ , измеренное через 1 минуту;

$U''$  – значение  $U_{В.П.}$ , измеренное через 10 минут после процесса поляризации.

По экспериментальным точкам строились зависимости  $U_{В.П.}$  от времени спада вызванных потенциалов (Рис. 4), из которых следует, что данные угли относятся к материалам с метастабильной электрической поляризацией.

Наименьшее значение разности потенциалов ( $U_{В.П.}$ ) приобретает выброшенный уголь, причем этот параметр более чем в тысячу раз меньше значения  $U_{В.П.}$  для невыбросоопасного угля этой же марки. В углях после выброса значения вызываемой поляризации значительно меньше, чем до выброса. В каменных углях марки Ж (Zaytsev, Malova, & Panchenko, 1992) максимальное значение вызванной поляризации  $U_{В.П.}$  соответствует выбросоопасным состояниям, а минимальное – выброшенным углям, у которых потенциальные возможности реализации активных твердофазных химических реакций оказываются практически исчерпанными.

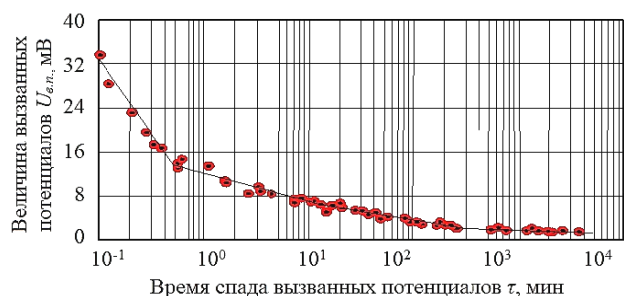


Рисунок 4. Зависимость спада вызванного потенциала от времени: по экспериментальным данным, полученным на трех идентично обработанных образцах угля марки Г

В Таблице 3 представлены значения устойчивости поляризованного состояния ( $\Delta U_{В.П.}$ ), вызванной электрохимической активности ( $Aв$ ) и других характеристик медленной релаксации поляризации углей (электретной разности потенциалов), предварительно обработанных в электрическом поле.

Таблица 3. Характеристики релаксационной поляризации каменных углей

Уголь марки Ж	Начальное значение вызванного потенциала $U_{В.П.}$ , мВ	$\Delta U_{В.П.}$ , %	$Aв$	Время спада вызванного потенциала $\tau$ , мин (до некоторого значения $U_1$ )
после выброса не опасный	22	76 – 83	$8.8 \cdot 10^{-6}$	2040 мин (до $U_1 = 0.8$ мВ)
	2700	17 – 20	$8.6 \cdot 10^{-3}$	1815 мин (до $U_1 = 0.63$ мВ)

Измерения параметров проводились при комнатной температуре в условиях естественной влажности атмосферы и прекращались после нескольких суток релаксации, причем ни в одном из опытов не были достигнуты значения  $U_{В.П.}$ , которые бы приблизились к нулю. Время релаксации электретного состояния составляло для различных углей от  $8 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^6$  с, что в сравнении с максвелловским временем релаксации ( $\sim 30$  с) на много порядков больше. Установленные значения спада приобретенного потенциала удовлетворительно коррелируют с концентрацией парамагнитных центров, сформированных в углях марки Ж.

Концентрация дефектов увеличивается в результате механического измельчения углей и при обработке в электрическом поле – и в первом, и во втором случае растет концентрация ПМЦ, что подтверждают данные ЭПР. Однако следует заметить, что электрическая обработка угля при комнатной температуре увеличения концентрации ПМЦ практически не дает. Следует заметить, что дефекты структуры угля могут быть перспективными аккумуляторами электрической энергии. С увеличением температуры обработки концентрация ПМЦ относительно исходного механоактивированного угля увеличивается в 2 – 5 раз. Сравнение данных, приведенных в работе (Zaytsev, Malova, & Panchenki, 1992) показывает существенно более продолжительные времена релаксации электретного заряда, установленные в наших экспериментах.

Процесс газогенерации электростимулированных углей может развиваться по нескольким причинам, приведенным ниже:

- разрывом наиболее слабых химических связей в углеродных и углеводородных цепочках;
- полным разрушением цепочек в случае, если в них количество атомов ниже критического предела устойчивости цепочки;
- образованием углеводородных молекул с неспаренными электронами с последующим образованием стабильных молекул газа;
- десорбция хемосорбированных молекул в результате возбуждения их связи с внутренними поверхностями проходящими токами;
- в случае разрыва связей графена образуется нестабильная цепочка, которая распадается с образованием атомарного углерода с последующей их связью с кислородом и водородом.

Высокая скорость химических реакций может быть обусловлена участием поверхностных активных центров как катализаторов.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА ПРИ ВНЕЗАПНОМ ВЫБРОСЕ

Представленная ниже математическая модель внезапного выброса газа и породы построена с учетом численной модели этого процесса (Chernay & Sobolev, 2009), описывающей фильтрацию газа в породе, пористость которой изменяется под растущим давлением газа в напряженно-деформированном породном массиве.

Нестационарная фильтрация газа моделируется вдоль линии, перпендикулярной к поверхности выработки на основе уравнений неразрывности и закона Дарси. Рассматривается плоское течение газа, когда зона интенсивного газовыделения формируется вблизи поверхности выработки в форме полосы, параллельной поверхности выработки (Рис. 5). В такой формулировке принимается, что геометрические особенности поверхности несущественны для описания процесса.

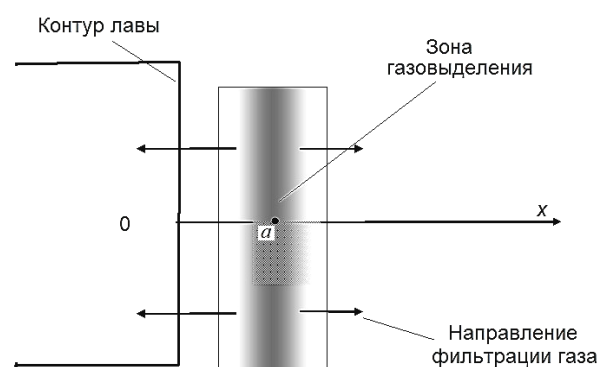


Рисунок 5. Схема выделения газа у выработки в углепородном массиве

В общем случае одномерное уравнение фильтрации газа (Ocheretna & Lukáš, 2013; Rajagopal & Srinivasan, 2014) может быть записано в виде:

$$\frac{\partial(m(x,t)P)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\kappa(m)}{\mu(P)} P \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{q(x,t)}{B}, \quad (4)$$

где:

$\rho$  – плотность газа;  
 $m$  – пористость пород;  
 $P$  – давление газа в порах;  
 $X$  – пространственная координата;  
 $\kappa$  – проницаемость породы (угля);  
 $\mu$  – динамическая вязкость газа;

$q(x, t)$  – интенсивность выделения газа в углеводородных породах при выбросе.

Эффектом Клинкенберга, проявляющимся при невысоких давлениях газа, можно пренебречь при значении давления газа до нескольких десятков атмосфер при выбросе.

Для динамической вязкости газа учитывается ее рост от давления, аппроксимированы в интервале температур 18 – 50°C и давлении 1 – 60 атм линейной зависимостью:

$$\mu = \mu_0 + 1.95 \cdot 10^{-8} (P - P_a), \quad (5)$$

где:

$\mu_0$  – вязкость газа при атмосферном давлении  $P_a$ .

Функциональная связь между плотностью и давлением, с учетом сжимаемости в первом приближении описывается уравнением изотермы:

$$\rho = B \cdot P, \quad (6)$$

где:

$B$  – константа; для метана, который преимущественно выделяется при выбросе при нормальном атмосферном давлении и при 40°C можно принять  $B = 0.64 \cdot 10^{-5} \text{ c}^2/\text{m}^2$ .

В общем случае пористость зависит от давления газа и перехода угля в газ при химической реакции. Оценки изменения пористости в зависимости от напряженно-деформированного состояния показывают, что по сравнению с минимальным значением пористости  $m = 0.05$  это составит 0.3%, что позволяет в дальнейшем моделировании считать пористость не зависящей от давления газа.

Оценим изменение пористости вследствие химической реакции с переходом твердой фазы в газ непосредственно перед выбросом. Принимается, что в реакцию вступает тонкий слой угля  $l_s$  в активном поровом пространстве, толщина которого составляет 1 – 3 Å. Удельная поверхность угля  $S_s$  относительно массы оценивается в  $3 \cdot 10^8 \text{ м}^2/\text{т}$ , а относительно объема –  $S_V = \rho_c \cdot S_s = 4.2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}$ . Тогда увеличение пористости за счет перехода угля в газ в случае, если реакция происходит в части пор  $a_p$  ( $a_p$  оценивается в 0.5 – 1.0), можно определить по формуле:

$$\Delta m_c = a_p l_s S_V. \quad (7)$$

Принимая минимальные значения для  $l_s = 1 \text{ Å}$  и  $a_p = 0.5$ , получим 0.021, что для минимального значения пористости  $m = 0.05$  на 42% больше. Следовательно, увеличение пористости вследствие перехода угля в газ следует обязательно учитывать в модели. При этом считается, что изменение пористости происходит синхронно с выделением газа. Интенсивность выделения газа при выбросах моделируется функцией  $q$  в уравнении (4). Предполагая, что интенсивность

выделения одновременно меняется во времени в пределах всей зоны газовой выделения, можно записать:

$$q(x, t) = q_1(x)q_2(t). \quad (8)$$

Считается, что интенсивность выделения газа распределена неравномерно в зоне, расположенной недалеко от контура выработки (Рис. 1). Для одномерного течения газа можно принять, что интенсивность выделения газа распределена по закону Гаусса на полосе с максимумом выделения, который находится на расстоянии  $x_{max}$  от контура выработки:

$$q_1(x) = \frac{M_g}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_{max})^2}{2\sigma_g^2}\right), \quad (9)$$

где:

$M_g$  – общая масса газа, выделяющегося при выбросе;  
 $\sigma_g$  – среднее отклонение функции распределения, которое характеризует концентрирование угольного материала на полосе.

Длительность выделения газа  $\tau_g$ , по данным натуральных наблюдений (Antoshchenko, Radchenko, & Ashikhmin, 2015), обычно составляет несколько секунд, быстро возрастая до максимума, после чего относительно медленно падая. Такой характер выделения газа предлагается аппроксимировать зависимостью вида:

$$q_2(t) = b \cdot t \cdot \exp(-\beta t), \quad (10)$$

где:

$\beta$  – параметр кинетики выделения газа;  
 $b$  – параметр интенсивности выброса, определяемые таким образом, что должно выполняться условие полного выделения массы газа  $M_g$  в полуограниченной области фильтрации газа  $0 \leq x \leq +\infty$  за промежуток времени:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q(x, t) d\xi d\tau = M_g. \quad (11)$$

Соотношение:

$$M_g = \Delta m_c \rho_c, \quad (12)$$

определяет связь между массой выделяемого газа  $M_g$  и пористостью  $m$ :

$$m = m_0 + \Delta m_c. \quad (13)$$

Итак, пористость меняется во времени и в пространстве с учетом зависимостей (9), (10), (12), (13) синхронно с нестационарным выделением газа, вязкость газа – в зависимости от давления по формуле (5), а проницаемость – от пористости, которая вычисляется по формуле Козени-Кармана.

В начальный момент времени перед развитием выброса в порах породного массива задается пластовое давление:

$$P(r, t) = P_s, \quad (14)$$

а на контуре выработки – атмосферное давление:

$$P(r, t) = P_a. \quad (15)$$

Для решения сформулированной краевой задачи (4), (14), (15) ее необходимо дополнить критериями разрушения (Chernay & Sobolev, 2009). Гидродинамический разрыв материала возможен только в том случае, когда в некотором сечении выполняется как силовой критерий, так и энергетический.

Сущность силового критерия заключается в том, что разрушение материала наступает лишь в случае, если на любой поверхности растягивающие напряжения превышают соответствующие показатели прочности:

$$\sigma_s(\xi) = \frac{F(\xi)}{S_0} = [P(\xi) - P(0)]m \geq \sigma_b, \quad (16)$$

где:

- $\sigma_s$  – величина растягивающих напряжений;
- $\sigma_b$  – предел прочности материала на растяжение;
- $S_0$  – площадь сечения;
- $\xi$  – координата.

Сущность энергетического критерия заключается в том, что во время обратной фильтрации силы гидродинамического давления в порах выполняют работу по перемещению флюида, часть которой расходуется на растяжение остова пористой среды. Выражение для энергетического критерия разрушения имеет вид:

$$-m \int_0^{\tau} \frac{\kappa}{\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) P dt \geq 2g_s, \quad (17)$$

где:

$\tau$  – момент времени, для которого проверяется критерий;

$g_s$  – удельная энергия образования новой поверхности.

Краевая задача (4), (14), (15) является нелинейной, поэтому целесообразным способом ее решения является численный метод конечных разностей. Расчеты проводились с использованием стандартных средств численного интегрирования уравнений в частных производных в системе компьютерной математики Maple. Шаг сетки был взят 0.02 м, шаг во времени варьировался автоматически для достижения достаточной точности расчетов.

Вследствие существенной нелинейности задачи ее аналитического решения не существует, поэтому достоверность моделирования оценивалась на основе физических критериев и сопоставлением результатов с данными наблюдений за основными параметрами при выбросе газа и породы. Параметры модели, принятые при расчете, составили:  $m = 0.05$ ,  $\kappa = 10^{-12} \text{ м}^2$ , температура  $T = 30^\circ\text{C}$ , начальное пластовое давление  $P_s = 20 \text{ атм}$ , параметры выброса газа  $M_g = 94.08 \text{ кг}$ ,  $\beta = 1 \text{ с}^{-1}$ ,  $b = 1$ ,  $\sigma_g = 0.1 \text{ м}$ ,  $x_{max} = 0.5 \text{ м}$ .

Анализ распределений давления газа в порах на удалении от кромки в разные моменты времени (Рис. 6) и изменения давления во времени на различном удалении от кромки (Рис. 7) позволяет выделить следующие этапы развития выброса, продолжительность которых зависит от массы газа:

- 1) быстрый рост до момента времени 1 – 2 с;
- 2) стабилизацию давления с образованием зоны почти одинакового повышенного давления на уровне 29 – 35 атм;
- 3) постепенное падение по всей области вследствие дренирующего эффекта границы – поверхности забоя выработки.

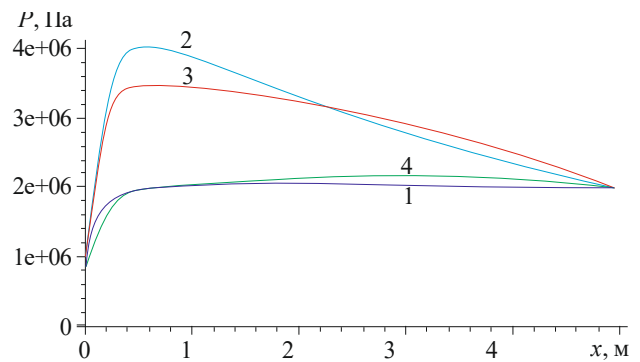


Рисунок 6. Изменение давления вдоль профиля, перпендикулярного к контуру выработки, в моменты времени: 1 – 0.01 с; 2 – 1 с; 3 – 2 с; 4 – 4 с

Следует отметить выравнивание давления в центральной зоне, обусловленное увеличением пористости и проницаемости.

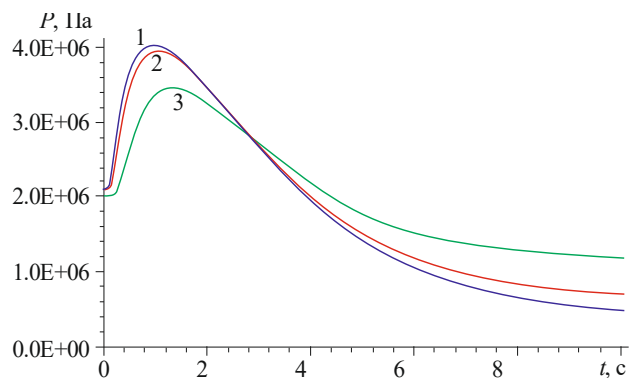


Рисунок 7. Изменение во времени давления газа на различном удалении  $\Delta x$  от контура выработки: 1 – 0.5 м; 2 – 1 м; 3 – 2 м

Перепад давлений в призабойной зоне (Рис. 6) быстро достигает 30 – 40 атм, поэтому силовой критерий (16) выполняется уже через 0.3 с. Градиент давления в этой зоне достигает 50 атм/м, поэтому при проницаемости порядка  $10^{-12} \text{ м}^2$ , вязкости –  $10^{-5} \text{ Па с}$ , давления в несколько десятков атмосфер, критерий (17) начинает выполняться уже через 0.05 – 0.1 с. Таким образом, по совокупности двух критериев следует ожидать выброс газа и породы через 0.3 с в данном случае.

#### 4. ВЫВОДЫ

В образцах механоактивированного угля с нарушенной микроструктурой после дополнительной обработки в слабом электрическом поле наблюдается значительное превышение (в 1.5 – 3 раза) характерного времени десорбции метана и уменьшение скорости его выделения. Установлено проявление электретных свойств по величине вызванного потенциала и электрохимической активности. Качественные и количественные изменения свойств в обработанных углях идентичны соответствующим природным образцам угля, отобранными из зон с разной вероятностью выбросоопасности.

Наиболее вероятные источники дополнительного газа, заполняющего “фильтрационную сеть” и вызы-



вающего выброс: десорбция (возбуждение связей проходящим током, упругой волной) хемосорбированного газа (около 8 – 10%) на внутренних поверхностях пор; разрушение цепочечных структур и перехода компонентов в газ; разрушение графенов, графанов и т.д. с образованием неустойчивых цепочек и выделением газа. Выделяющаяся избыточная энергия существенно снижает термодинамический барьер химических реакций ОМУ → газ.

На основе этой гипотезы была разработана математическая модель течения газа во время выброса с учетом изменений пористости и проницаемости, обусловленных химическими реакциями переходя угля в газ. В результате моделирования воспроизведено образование зоны избыточного давления в области интенсивного выделения газа. Для типичных значений газодинамических параметров и массы газа, выделяемого во время выбросов, модель прогнозирует изменения давления, которые хорошо коррелируются со значениями, наблюдаемыми в шахтах при газодинамических явлениях.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Данная работа выполнена при поддержке и финансировании Министерством образования и науки Украины проекта ГП-491 “Исследование наноструктуры ископаемых углей как источника метана угольных месторождений”. Авторы благодарят доктора технических наук Е.В. Ульянову за помощь в проведении физических исследований углей, обработанных слабыми электрическими полями.

## REFERENCES

- Alekseyev, A.D., Starikov, G.P., & Chistokletov, V.N. (2010). *Prognozirovaniye neustoychivosti sistemy ugol'-gaz*. Donetsk: Noulidzh.
- Antoshchenko, N.I., Radchenko, A.G., & Ashikhmin, V.D. (2015). *Osobennosti proyavleniya vybrosoopasnosti ugley v ryadu metamorfizma*. *Zbirnyk Naukovykh Prats' DonDTU*, (1), 14-21.
- Chernay, A.V., & Sobolev, V.V. (2009). *Matematicheskaya model' vybrosa uglya i gaza*. In *Forum Hirnykiv* (pp. 199-208). Dnipropetrovsk: Natsionalnyi Hirnychiy Universytet.
- Gubkin, A.N. (1978). *Elektrety*. Moskva: Nauka.
- Jiang, X., Liang, Y., Guo, D., & Huang, Z. (2017). Prediction Model for Coal-Gas Outburst Using the Genetic Projection Pursuit Method. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 16(3), 271. <https://doi.org/10.1504/ijogct.2017.10007446>
- Ocheretna, L., & Lukáš, D. (2013). Computer Simulation of a Fluid Flow through the Declined Porous Structure. *Advanced Materials Research*, (746), 271-276. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.746.271>
- Pivnyak, G.G., Sobolev, V.V., & Filippov, A.O. (2012). Phase Transformations in Bituminous Coals under the Influence of Weak Electric and Magnetic Fields. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 43-49.
- Rajagopal, K.R., & Srinivasan, S. (2014). Flow of Fluids Through Porous Media due to High Pressure Gradients: Part 2 – Unsteady Flows. *Journal of Porous Media*, 17(9), 751-762. <https://doi.org/10.1615/jpormedia.v17.i9.10>
- Sessler, G.M. (1980). Electrets, Topics in Applied Physics. *Physik in Unserer Zeit*, 11(4), 128-128. <https://doi.org/10.1002/piuz.19800110416>
- Sobolev, V., Bilan, N., & Samovik, D. (2013). Magnetic Stimulation of Transformations in Coal. *Mining of Mineral Deposits*, 221-225. <https://doi.org/10.1201/b16354-41>
- Ul'yanova, Ye.V. (2012). *Strukturnyye i kompozitsionnyye perestroyki v iskopayemykh uglyakh*. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing.
- Voloshin, N.Ye., Vaynshteyn, L.A., & Bryukhanov, A.M. (2008). *Vybrosy uglya, porody v shakhtakh Donbassa v 1906 – 2007 godah*. Donetsk: SPD Dmitrenko.
- Zaytsev, P.P., Malova, G.V., & Panchenko, Ye.M. (1992). Elektricheskiye svoystva vybrosoopasnykh kamennykh ugley i prognozirovaniye vybrosa uglya i gaza. *Khimiya Tverdogo Topliva*, (5), 88-92.

## ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Экспериментальные исследования и теоретическое моделирование условий инициирования деструктивных и развития газогенерирующих процессов в каменных углях.

**Методика.** Анализ, обобщение и статистическая обработка экспериментальных показателей и результатов аналитических исследований с последующим выделением закономерностей, численное решение уравнений в частных производных.

**Результаты.** Выполнены экспериментальные исследования изменения свойств механоактивированных образцов угля марок Г и Ж в слабых электрических полях. Экспериментальные результаты сопоставлены с характеристиками углей, отобранных из зон с разной вероятностью выбросоопасности, на основе чего сформулированы новые представления о причинах газогенерации в углях. Разработана математическая модель развития выброса газа при изменении пористости твердой фазы вследствие перехода органической массы угля в газ.

**Научная новизна.** Установлено, что для обработанных образцов с нарушенной микроструктурой наблюдается значительное увеличение (в 1.5 – 3 раза) характерного времени десорбции метана и проявление электретных свойств по величине вызванного потенциала и электрохимической активности, при этом, качественные и количественные изменения свойств в обработанных углях идентичны природным аналогам. Разработанная математическая модель течения газа во время выброса впервые отражает изменения пористости и проницаемости породы, обусловленные химическими реакциями генерации газа органической массой угля.

**Практическая значимость.** Совершенствование предложенной модели выброса может быть использовано в прогнозных оценках внезапных выбросов с учетом изменения параметров термодинамической и кинетической устойчивости системы “уголь – газ”.

**Ключевые слова:** уголь, деструкция, газогенерация, внезапный выброс, течение газа, математическая модель

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Експериментальні дослідження та теоретичне моделювання умов ініціювання деструктивних і розвитку газогенеруючих процесів у кам'яному вугіллі.

**Методика.** Аналіз, узагальнення та статистична обробка експериментальних показників і результатів аналітичних досліджень з подальшим виділенням закономірностей, чисельне рішення рівнянь у частинних похідних.

**Результати.** Виконано експериментальні дослідження зміни властивостей механоактивованих зразків вугілля марок Г і Ж у слабких електричних полях. Експериментальні результати зіставлені з характеристиками вугілля, відібраних із зон з різною ймовірністю небезпеки викиду, на основі чого сформульовані нові уявлення про причини газогенерації у вугіллі. Розроблено математичну модель розвитку викиду газу при зміні пористості твердої фази внаслідок переходу органічної маси вугілля в газ.

**Наукова новизна.** Встановлено, що для оброблених зразків з порушеною мікроструктурою спостерігається значне збільшення (у 1.5 – 3 рази) характерного часу десорбції метану і прояв електричних властивостей за величиною викликаного потенціалу та електрохімічної активності; при цьому якісні та кількісні зміни властивостей в обробленому вугіллі ідентичні природним аналогам. Розроблена математична модель течії газу під час викиду вперше відображає зміни пористості й проникності породи, які зумовлені хімічними реакціями генерації газу органічною масою вугілля.

**Практична значимість.** Удосконалення запропонованої моделі викиду може бути використано у прогностичних оцінках раптових викидів з урахуванням зміни параметрів термодинамічної і кінетичної стійкості системи “вугілля – газ”.

*Ключові слова:* вугілля, деструкція, газогенерація, раптовий викид, течія газу, математична модель

## ARTICLE INFO

Received: 11 June 2017

Accepted: 8 September 2017

Available online: 30 September 2017

## ABOUT AUTHORS

Valerii Sobolev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Construction, Geotechnics and Geomechanics Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 7/1301, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: [velo1947@ukr.net](mailto:velo1947@ukr.net)

Dmytro Rudakov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Hydrogeology and Engineering Geology Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 1/54, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: [rudakovdv21@gmail.com](mailto:rudakovdv21@gmail.com)

Leonid Stefanovych, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Principal Researcher of the Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: [listef25911@rambler.ru](mailto:listef25911@rambler.ru)

Karol Jach, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Institute of Optoelectronics, Military University of Technology, 2 Kaliskiego St, 01-489, Warsaw, Poland. E-mail: [karoljach@aster.pl](mailto:karoljach@aster.pl)