

УДК 622.831.325.2

КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ОТРАБОТКИ ПЛАСТОВ ДЕСОРБОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Галемский П. В.

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Виконані експериментальні дослідження інтенсивності десорбції газу із зразків викидонебезпечного вугільного пласта. Визначені вимоги до методики вимірювань, десорбометру та розроблено спосіб контролю його герметичності за результатами вимірювань. Запропонована статистично обґрунтована методика контролю ефективності захисної дії.

Experimental studies of intensity of desorption of gas from coal in order to control the degree of degassing after extraction off the protective coal seam were conducted. Requirements for the measuring technique and desorbometer determined. A method of control of desorbometer's airtightness as a result of measurements was developed. Method of controlling the degree of degassing when developing protective seam statistically sound was proposed.

Нормативные методы расчета зон защиты [1] предусматривают возможность расширения их границ по результатам проведения оценки эффективности защитного действия. При этом возникает ряд технологических затруднений для получения достоверных экспериментальных данных.

Десорбометрический интегральный метод [2] один из двух применяемых для оценки и контроля эффективности. Он заключается в измерении роста давления выделяющегося газа из пробы угля в замкнутом объеме прибора без её дополнительных лабораторных исследований. Апробация этого метода осуществлялась в

условиях Донецко-Макеевского района Донбасса, и результаты ее опубликованы в работах [3-5]. Но используемые в этом методе приборы имеют конструктивные недостатки, влияющие на результаты измерений, приемы их статистической обработки требуют существенных корректировок.

Поэтому целью работы являлось создание новой десорбционной методики для получения представительных данных по контролю эффективности защитного действия. При этом возникла необходимость в решении следующих задач:

1) определить источники грубых ошибок при определении показателя интенсивности выделения газа из пробы угля в замкнутый объем десорбметра;

2) провести экспериментальные работы по определению десорбционных характеристик угля на участках пласта в зоне эффективной защиты, а также при её отсутствии;

3) установить эмпирическую зависимость роста давления в закрытом десорбметре;

4) разработать методику контроля герметичности прибора;

5) выбрать надежный показатель интенсивности десорбции с учетом фактора времени, и на его основе обосновать методику контроля эффективности защитного действия опережающей отработки пластов.

1. Поиск источников грубых ошибок при измерении интенсивности выделения газа из пробы угля в замкнутом объеме.

С помощью прибора ДШ-1 конструкции МакНИИ нет возможности контролировать влияние термодинамических параметров на динамику десорбции газа из образца угля. Поэтому задача рассматривалась только с точки зрения системы идеального газа в герметичном свободном объеме прибора, который описывается уравнением состояния идеального газа-метана:

$$\nu = \frac{pV}{RT}, \quad (1)$$

где p – давление, Па;

ν – количество вещества, моль.

V – незаполненный пробой угля свободный объем прибора, куда десорбируется газ, м³;

T – температура газа, К;

$R = 8,31$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль×К).

В процессе работы с десорбиметром отбирается проба угля с объемом V_V и абсолютной погрешностью ΔV_V). Рост давления газа p , выделяющегося из угля в свободный объем десорбиметра, фиксируется по манометру с абсолютной погрешностью Δp .

Показатель интенсивности десорбции ΔP по методике МакНИИ – это прирост давления за 40 секунд выделения газа из пробы угля в герметичный объем прибора. В этом случае установить источники грубых ошибок при определении показателя ΔP можно по относительной погрешности количества десорбированного газа.

Тогда с учетом абсолютных погрешностей измерений закон состояния идеального газа (1) можно записать в следующем виде:

$$(v_{40} \pm \Delta v_{40}) - (v_{10} \pm \Delta v_{10}) = \frac{((p_{40} \pm \Delta p_{40}) - (p_{10} \pm \Delta p_{10}))(V \pm \Delta V)}{(T \pm \Delta T)R} \quad (2)$$

где p_{10} – давление через 10 с после герметизации прибора, Па;

p_{40} – то же давление через 40 с, Па;

v_{10} – количество газа, выделившегося из угля в свободный объем десорбиметра через 10 с после его герметизации, моль;

v_{40} – то же через 40 с, моль.

В случае накопления положительных абсолютных погрешностей, разделив обе части (2) на $v_{40} - v_{10}$ согласно (1), после преобразования, получим выражение:

$$\delta_{v_{40} - v_{10}} = \frac{(\delta_{p_{40} - p_{10}} + 1)(\delta_V + 1)}{(\delta_T + 1)} - 1 \quad (3)$$

где δ_v , δ_p , δ_T , δ_V – относительные погрешности определения количества вещества, измерений давления, температуры, объема пробы угля.

При правильном выборе средств измерений $\delta_{p_{40} - p_{10}}$, δ_T не могут быть источниками грубых ошибок в (3). В то же время в ре-

зультате значительных колебаний объема пробы в серии экспериментов появляется неустранимая систематическая ошибка показателя интенсивности десорбции, которая приводит к несопоставимости полученных результатов. Тогда, пренебрегая абсолютной ошибкой колебаний объема прибора ΔV_{II} , учитывая, что $V_{II} - V_y$ всегда положительная величина, относительная погрешность свободного объема десорбметра может быть определена следующим образом:

$$\delta_v = \left| \frac{\Delta(V_{II} - V_y)}{V_{II} - V_y} \right| = \frac{\Delta V_{II} + \Delta V_y}{V_{II} - V_y} = \frac{V_y \delta_{V_y}}{V_{II} - V_y}, \quad (4)$$

где δ_{V_y} – относительная погрешность отбора пробы угля.

В случае рекомендуемого МакНИИ заполнения прибора пробой угля «под крышку» ΔV_y уменьшается, оставаясь значимой, знаменатель $V_{II} - V_y$ в (4) стремится к нулю и это приводит к большим значениям δ_v . В результате точные измерения давления характеризуют не физический процесс десорбции в замкнутом объеме, а влияние на выделение газа из угля величин ΔV_y , V_y и V_{II} . Поэтому объемы десорбметра (V_{II}) и пробы (V_y) угля должны оставаться постоянным во всех сериях экспериментов. Так, например, при $V_{II} = 33 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ (33 см^3) и $V_y = 6,5 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ ($6,5 \text{ см}^3$) для обеспечения $\delta_v = 1 \%$ по (4) необходимо отбирать пробу с относительной погрешностью $\delta_{V_y} = 4 \%$.

2. Экспериментальные работы по измерению интенсивности десорбции проводились по методике [2] на шахте им. А. Ф. Засядько в 4-й западной лаве пл. l_4 (защищенная зона) и в монтажном ходке лавы (незащищенная зона), рисунок 1. Для уменьшения погрешности объема пробы её отбор производился в конце каждого метра бурения с помощью мерного цилиндра. Горно-геологические характеристики объекта исследований приведены в таблице 1. Результаты измерений представлены на рисунке 2 (с учетом контроля герметичности десорбметра).

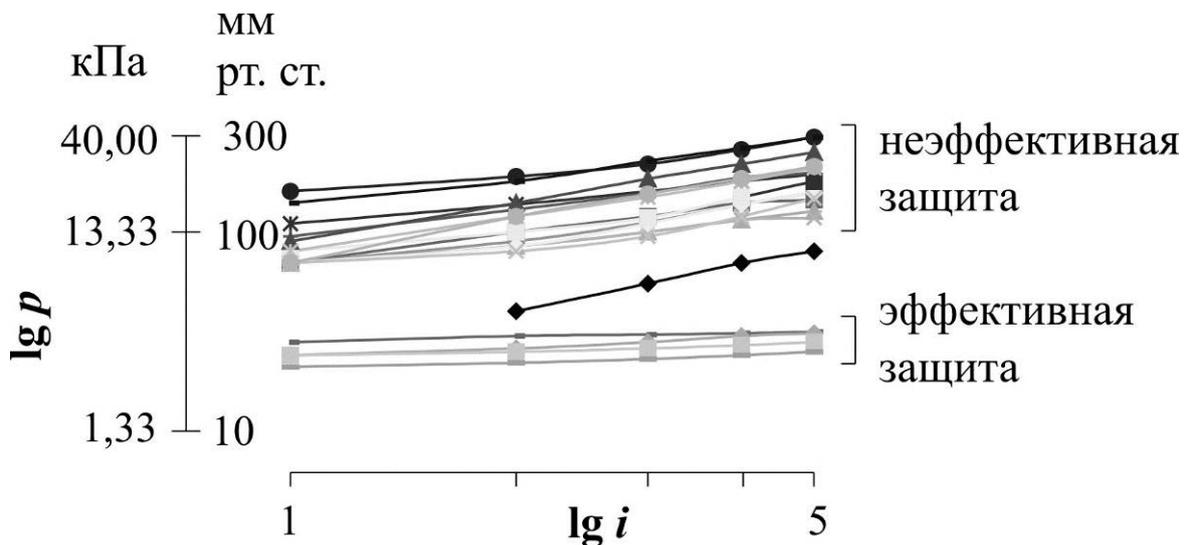


Рис. 2. Результаты измерений роста давления в замкнутом объеме десорбометра в логарифмических координатах (условная шкала времени – порядковые номера отсчетов давления)

3. Эмпирическая зависимость роста давления в замкнутом объеме.

По результатам обработки экспериментальных данных рост давления в закрытом объеме десорбометра характеризуется функцией

$$p_i = A i^\beta, \quad (5)$$

где p_i – давление газа,
 i – условное время эксперимента, соответствующее порядковому номеру отсчета p_i .

В системе координат $(\lg p; \lg t)$ функция $p(i)$ – это прямая с тангенсом угла наклона β , отсекающая на оси p отрезок A при $i = 1$ (см. рис. 2). Анализ нелинейной зависимости (5) был сведен к процедуре применения линейной регрессионной модели типа

$$\lg p = b_0 + b_1 \cdot \lg i, \quad (6)$$

где $A = 10^{b_0}$, $\beta = b_1$.

Для полученных экспериментальных данных (44 серии наблюдений за ростом давления по 4-е измерения в каждой) в таблице 2 приведены статистические оценки соответствующих коэффициентов корреляции (R) и детерминации (R^2), которые

указывают на значимую линейную связь между $\lg p$ и $\lg i$, и на правильность выбора зависимости (5). Одновременно с этим был выполнен нелинейный регрессионный анализ подтверждающий справедливость общего вида эмпирической функции роста давления (5).

Таблица 2

Статистические оценки коэффициента корреляции R и детерминации R^2 для регрессионной модели (5)

Статистические оценки	Незащищенная зона (монтажный ходок)		Защищенная зона (лава)	
	R	R^2	R	R^2
Среднее значение выборки	0,993	0,987	0,973	0,947
Стандартное отклонение	0,011	0,022	0,023	0,044
Объем выборки	39	39	5	5
Минимальное значение выборки	0,942	0,888	0,933	0,870
Максимальное значение выборки	0,99(9)	0,99(9)	0,990	0,980
Нижний квартиль (25 % значений выборки)	0,993	0,985	0,978	0,957
Верхний квартиль (75 % значений выборки)	0,999	0,998	0,986	0,971

Различия стандарта отклонений коэффициента корреляции в двух зонах можно объяснить низким давлением в свободном объеме прибора (< 32 мм рт. ст.) и ошибкой измерения величины p в первой трети шкалы манометра. В то же время, при низком значении стандартного отклонения R^2 причиной минимумов коэффициентов корреляции является негерметичность прибора, что было установлено в лаборатории по потере давления из-за утечек воздуха из закрытого десорбометра, погруженного в кювету с горячей водой.

4. Методика контролю герметичності десорбметра.

Получение достоверных данных для контроля эффективности опережающей отработки защитных пластов возможно только при отсутствии грубых ошибок измерения давления, вызванных негерметичностью десорбметра, т.к. это приводит к резким падениям давления, не соответствующим зависимости (5), как показано на рисунке 3. Поэтому коэффициент корреляции может служить оценкой надежности результатов измерений с использованием критического значения, определяемого по уровню значимости с учетом точности и объема измерений.

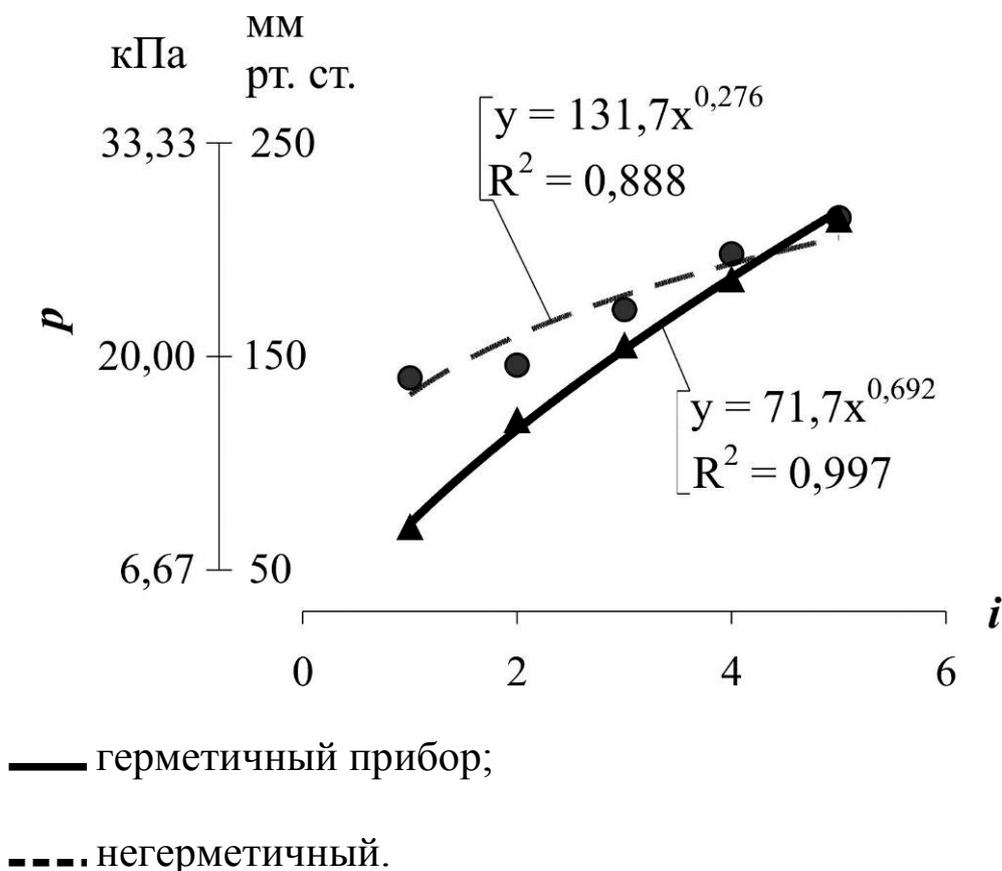


Рис. 3. Результаты измерений роста давления p в шпуре № 2, пробуренного в монтажном ходке 4-й западной лавы пласта l_4 , ПК 20 + 6 м ($y = 131,7x^{0,276}$ – эмпирический закон роста давления в замкнутом объеме, $R^2 = 0,888$ – коэффициент детерминации)

Коэффициент корреляции Пирсона вычисляется по формуле

$$r_{p/t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg t_i - \bar{t}_{\lg})(\lg p_i - \bar{p}_{\lg})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\lg t_i - \bar{t}_{\lg})^2 \sum_{i=1}^n (\lg p_i - \bar{p}_{\lg})^2}}, \quad (7)$$

где $\lg p_i$ – логарифм отсчета давления p_i ;
 $\lg t_i$ – логарифм отсчета времени t_i ($t_i > 0$);
 \bar{p}_{\lg} и \bar{t}_{\lg} – средние значения $\lg p_i$ и $\lg t_i$, определяемые по выражениям

$$\bar{p}_{\lg} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg p_i}{n}, \quad \bar{t}_{\lg} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg t_i}{n}, \quad (8)$$

где $n = 4$ – число измерений;
 $i = 1 \dots 4$ – порядковый номер измерения.

Оценку достоверности (7) производят с помощью t -критерия Стьюдента. Наблюдаемое значение вычисляют по формуле

$$t_{\text{наблюд}} = r_{p/t} \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{p/t}^2}}. \quad (9)$$

Полученное значение сравнивают с табличным значением $t(\alpha; n)$. Коэффициент корреляции можно считать достоверным с уровнем значимости α при выполнении условия:

$$t_{\text{наблюд}} > t(\alpha; n). \quad (10)$$

Решив неравенство (10) с учетом (9) получим критерий достоверности для регрессионной модели (5)

$$r_{p/t}^2 > \frac{t^2(\alpha; n)}{n-2+t^2(\alpha; n)}. \quad (11)$$

Для значений $t(0,95;4) = 3,18$ $r_{p/t} > 0,914$. В практических расчетах величина $r_{p/t}$ будет зависеть от точности и количества измерений, а также уровня значимости α , т.е. для каждого конкретного типа прибора и методики определения показателя интенсивности десорбции необходимо будет устанавливать $r_{p/t}$. Следует учесть, что при малом количестве измерений давления при единичном определении ΔP уменьшается достоверность ре-

зультатов. Поэтому для обеспечения значимости контроля герметичности на уровне 0,95 при 4 отсчетах давления по [6] необходимо принять в качестве критерия достоверности коэффициенты корреляции для защищенной зоны $r_{p/t} \geq 0,95$ (из-за измерения низкого давления на дегазированном участке пласта с большей ошибкой в первой трети шкалы манометра) и $r_{p/t} \geq 0,98$ для всех других зон.

Разработанный метод контроля герметичности прибора во время измерения был внесен в руководство по эксплуатации десорбметра конструкции МакНИИ.

5. Показатель интенсивности десорбции газа из пробы угля с учетом фактора времени. Методика контроля эффективности защитного действия опережающей отработки пластов.

Защитное действие считается эффективным, если характеризующие его показатели имеют следующее соотношение:

$$P'_i < \Delta P_K = k \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \quad (12)$$

где $\Delta P_i = p_{40} - p_{10}$ – единичные определения прогностического параметра, как разность давлений выделившегося газа в свободный объем десорбметра через 10 и 40 секунд после герметизации прибора для проб, отобранных на незащищенных участках пласта, Па;

$\Delta P'_i$ – тот же параметр, но определенный на участках с контролируемой эффективностью защитного действия, Па;

k – коэффициент условий разработки, изменяющийся от 0,3 до 0,6, устанавливается опытным путем.

По результатам обработки данных (табл. 3) видно, что при любом значении k выполняется условие (12), т.е. критерий и методика в целом может быть применима в данных условиях.

К недостаткам методики МакНИИ следует отнести: зависимость показателя ΔP от времени, затраченного на бурение контрольного интервала и загрузки пробы в десорбметр до его герметизации; для установления коэффициента k требуется проведения большой серии экспериментальных работ на каждом шахтопласте; отсутствие вероятностной оценки надежности критерия в условии (12). Если продолжить серию измерений по методике [2],

многократно повторяя измерения ΔP для одной и той же пробы, то второе измерение будет примерно в два раза меньше первого, а через 10 минут свободной десорбции ΔP будет отличаться от первоначально измеренного на порядок за счет дегазации пробы и уменьшения роста давления выделяющегося газа в замкнутом объеме.

Таблица 3
 Результаты обработки измерений интенсивности десорбции (ΔP)
 на шахте им. А.Ф. Засядько, пласт l_4

Наименование показателей	Значения в геомеханических зонах:	
	защищенной	незащищенной
средние значения ΔP при подработке на разных участках, кПа (мм рт. ст.)	0,61 (4,6)	13,40 (100,5)
количество измерений	4	15
среднеквадратическое отклонение групп измерений, кПа (мм рт. ст.)	0,21 (1,6)	5,11 (38,3)

В качестве характеристики интенсивности десорбции газа из буровой мелочи можно использовать показатель степени β в аппроксимирующей функции (5). В результате обработки экспериментальных данных установлено, что β остается стабильной в течение 15 – 20 минут, следовательно, зависит от времени отбора и герметизации пробы менее чем ΔP .

Буровую угольную мелочь отбирают с помощью мензурки с фиксированным объемом, помещают в прибор и берут не менее четырех отсчетов давления через 10, 20, 30 и 40 с после герметизации пробы. Время заменяется условными значениями $t_i/10$ с, т.е. на 1, 2, 3, 4. Полученные данные аппроксимируют методом наименьших квадратов функцией вида (5).

Значения интенсивности десорбции группируются в две выборки из участков зон: 1) контролируемой и 2) эффективной надработки (подработки). Сравнение средних параметров интенсивности десорбции в этих зонах проводится с использованием ста-

тистик Стьюдента и Фишера-Снедекора. Надрработка или подработка считаются неэффективными, если обе статистики показали существенное различие интенсивности десорбции в контролируемой зоне по сравнению с участком полной эффективной защиты.

Например, полученные данные разделены на две выборки для соответствующих геомеханических зон (см. рис. 2). В результате статистической обработки данных были получены наблюдаемые значения критериев (табл. 4). Критическое значение критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ составляет $t_{кр}(17; 0,05) = 2,11$ ([7]), Фишера-Снедекора при $\alpha = 0,05$ равняется $F_{кр}(14; 3; 0,05) = 8,71$ ([7]). Таким образом $t_{набл} = 5,4 > t_{кр}$, $F_{набл} = 17 > F_{кр}$, что свидетельствует о значимом различии параметров интенсивности десорбции газа в разных зонах и отсутствии защиты на участке проведения экспериментальных работ в монтажном ходе 4-й западной лавы (табл. 4).

ВЫВОДЫ

Для получения достоверных экспериментальных данных по контроль эффективности защитного действия опережающей отработки пластов десорбметр должен соответствовать следующим требованиям:

– величины объемов прибора V_{II} и исследуемой пробы угля V_V с учетом её относительной погрешности δ_{V_V} должны быть выбраны постоянными во всех сериях экспериментов по (4) для обеспечения $\delta_V \leq 5$;

– конструкция прибора должна минимизировать теплообмен пробы угля с окружающей средой, так как десорбция это эндотермический процесс, и обеспечивать герметичность во время измерений.

Для повышения точности результатов контроля эффективности защитного действия подработки или надрработки необходимо увеличить количество измерений давления до 6-10 отсчетов.

Таблица 4

Сравнение величины показателя интенсивности десорбции β на защищенных и незащищенных участках пласта l_4 шахты им. А. Ф. Засядько

Наименование показателей	Величина показателя	
	Среднее значения показателя β , мм рт. ст.	в защищенной зоне
	в незащищенной зоне	0,565
Наблюдаемый критерий Стьюдента $t_{набл}$	5,44	
Степень свободы df	17	
Вероятность p	0,00	
Критический критерий Стьюдента $t_{кр}$	2,11	
Количество определений β	в защищенной зоне	4
	в незащищенной зоне	15
Среднеквадратическая погрешность β , Па	в защищенной зоне	5,2
	в незащищенной зоне	21,7
Среднеквадратическая погрешность β , мм рт. ст.	в защищенной зоне	0,039
	в незащищенной зоне	0,163
Наблюдаемый критерий Фишера – Снедекора $F_{набл}$	17	
Вероятность ошибки принятого решения p	0,04	
Критический критерий Фишера – Снедекора $F_{кр}$	8,71	

Требуются дополнительные исследования влияния термодинамических параметров на скорость десорбции *in situ*.

Разработанный способ контроля эффективности влияния опережающей отработки защитного пласта с использованием показателя десорбции β выполняется оперативно и без дополнительных лабораторных испытаний проб угля. В то же время оценка эффективности под- или надработки должна проводиться методами с надежно установленными критериями выбороопасности, как, например, с измерением величины газоносности угля на контролируемом участке или статистическим способ определения эффективности защитного действия опережающей надработки выбороопасных пластов по [5].

СПИСОК ССЫЛОК

1. СОУ 10.1.00174088.011-2005. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. – Прийнято та надано чинності: наказ № 145 Мінвуглепрому від 30.12.2005 р. – Вид. офіц. – К.: Мінвуглепром України, 2005. – 225 с.
2. СОУ-П 10.00174088.016:20009. Правила визначення ефективності випереджального захисту пластів, схильних до газодинамічних явищ. – Прийнято та надано чинності: наказ № 217 Мінвуглепрому від 01.06.2009 р. – Вид. офіц. – К.: Мінвуглепром України, 2009. – 37 с.
3. Бойко Я. Н. Разработка шахтного десорбметра ДШ-1 / Я. Н. Бойко, О. Ц. Сирота, В. П. Белоусов // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – 1996. – С. 227 – 235.
4. Бойко Я. Н. Оценка выбросоопасности по сорбционным показателям угольного пласта / Я. Н. Бойко, Г. И. Колчин, Н. Л. Мусатова, Д. П. Гуня // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: XVI международная научная школа им. Академика С. А. Христиановича, 18-24 сентября 2006 г.: тез. докл. – Алушта, – 2006. – С. 23 – 27.
5. Евдокимова В. П. Статистический способ определения эффективности защитного действия опережающей надработки выбросоопасных пластов / В. П. Евдокимова, В. П. Коптиков, И. А. Южанин. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 443 с.
6. Блохин А.В. Теория эксперимента [Электронный ресурс]: курс лекций. Часть 2. / Минск: Научно-методический центр “Электронная книга БГУ”, 2003. Режим доступа: [www/URL: http://anubis.bsu.by//publications/elresources/Chemistry/blohin2.pdf](http://anubis.bsu.by//publications/elresources/Chemistry/blohin2.pdf) - 25.05.2009 г. – Электрон. версия печ. публикации, 2002. – PDF формат, версия 1.4. – Систем. требования: Adobe Acrobat 5.0 и выше.
7. Большев Л. Н. Таблица математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смринов – М.: Наука, 1983. – 416 с.