

УДК 622. 831.322:635

## ГИПОТЕЗА ПРОЯВЛЕНИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ УГЛЕЙ В РЯДУ МЕТАМОРФИЗМА

**Анциферов А. В., Радченко А. Г., Гетманец Л. В., Ялпуга Е. А.**

*(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)*

**Радченко А. А.**

*(Донбасская НАСА, г. Макеевка, Украина)*

*Наведено результати статистичного аналізу прояву викидонебезпечності вугілля Донбасу в ряді метаморфізму, наведена фізична сутність змін, які відбуваються у вугіллях різних стадій метаморфізму*

*The results of statistical analysis for manifestations of coal and gas outbursts at coal seams of Donbass are given. Physics of transformations in coals of different ranks is described.*

В результате многостадийного влияния геологических и тектонических факторов процесс углефикации сопровождался скачкообразными переходами в свойствах углей. Следствием этих происходящих сложных нелинейных процессов является наличие углей разного марочного состава. Марки углей существенно отличаются структурно-химическими и физико-механическими свойствами. В многочисленной литературе по горному делу отсутствуют системный анализ и обобщения, которые достаточно объективно описывали бы основные закономерности и особенности проявления выбросоопасности углей в ряду метаморфизма. Это связано с недостаточным изучением влияния надмолекулярной организации угольного вещества на изменения структурно-химических и физико-механических свойств углей, так как изменение указанных свойств определяет проявление выбросоопасности углей в ряду их метаморфизма. Поэтому целями настоящей работы являются:

1) разработка и проверка основных положений рабочей гипотезы о сложном характере проявления выбросоопасности углей в ряду метаморфизма;

2) установление основных закономерностей и особенностей проявления выбросоопасности углей в ряду метаморфизма;

3) раскрытие физической сущности нелинейной, волнообразной природы проявления выбросоопасности углей в ряду метаморфизма на региональном уровне (на макроуровне) с учетом особенностей изменений в молекулярной и надмолекулярной организации угольного вещества (на микроуровне), в структурно-химических и физико-механических свойствах углей (на мезоуровне).

Многие исследователи считают, что проявление выбросоопасности углей в ряду метаморфизма характеризуется параболической зависимостью [1 – 3]. Анализ данных в работе [4] показал, что изменение количества летучих продуктов, выделившихся на разных этапах углефикации, носит волнообразный, затухающий колебательный характер. На этой кривой имеются четыре максимума, соответствующие последовательным стадиям углефикации, на которых наблюдается переход от бурых к каменным углям, приобретение и потеря углями спекающихся свойств [4]. Анализ многочисленной литературы по горному делу, а также данных в работе [4] позволил возможность разработать новую рабочую гипотезу проявления выбросоопасности углей в ряду метаморфизма, основные положения которой сводятся к следующему: проявление выбросоопасности углей в ряду метаморфизма не характеризуется параболической зависимостью (как утверждают многие исследователи), а имеет более сложный, волнообразный характер.

Для проверки основных положений рабочей гипотезы был выполнен системный анализ литературы по данному направлению. В настоящей статье ниже приводится только краткий обзор отдельных основных анализируемых работ. В работе [1] установлена статистическая зависимость выбросоопасности шахтопластов от весового выхода летучих веществ ( $V^{\text{daf}}$ , в процентах):

$$P_{i_{\text{шх}}} = 0,052 V^{\text{daf}} - 0,0014( V^{\text{daf}} )^2 - 0,145. \quad (1)$$

Согласно исследованиям [1] статистическая вероятность встречи выбросоопасного шахтопласта в Донбассе  $P_{i_{\text{шх}}}$ , изменяется по параболическому закону, достигая максимума при  $V^{\text{daf}} \approx 19\%$ . В дальнейшем, в работах [1 – 3], статистическая вероятность встречи выбросоопасного шахтопласта в Донбассе  $P_{i_{\text{шх}}}$  без доказательств стала ошибочно трактоваться как статистическая вероятность (частота) возникновения внезапного выброса угля и газа в ряду метаморфизма  $P_{i_{\text{вб}}}$ . Считаем, что такой методический подход является не вполне корректным.

Согласно исследованиям [5], шахтопласты делятся на угрожаемые, выбросоопасные и особо выбросоопасные, поэтому при одних и тех же значениях  $V^{\text{daf}}$  угольный пласт может иметь различную степень выбросоопасности.

Также, согласно [6], количество выбросоопасных пластов в ряду метаморфизма распределено сравнительно равномерно и имеет четыре максимума при следующих значениях:  $V^{\text{daf}} = 9; 15; 23; 29\%$ .

В работе [7] указывается, что природная метаноемкость пластов ( $X_{\text{пр}}$ ) и максимальная плотность внезапных выбросов угля и газа ( $R$ ) наблюдаются при  $V^{\text{daf}}$  от 9 % до 10 %.

Петросян А.Э. и Иванов Б.М. в работе [8] указывают, что вероятная частота внезапных выбросов угля и газа в ряду метаморфизма ( $P_{i_{\text{вб}}}$ ) характеризуется кривой с двумя максимумами:

$V^{\text{daf}}$  от 27 % до 22 %;

$V^{\text{daf}}$  от 9 % до 7 %.

Анализ данных в работе ВостНИИ [9] показал, что распределение числа внезапных выбросов угля и газа на шахтах Донбасса по данным [9] на 01.01.1979 г. имеет бимодальное распределение с двумя максимумами:

1)  $C^{\text{daf}}$  от 88 % до 89,5%, т. е.  $V^{\text{daf}}$  от 20 % до 22 %;

2)  $C^{\text{daf}}$  от 91 % до 92 %, т.е.  $V^{\text{daf}}$  от 15 % до 17 %.

Ткач В. Я. в начале своей работы [2] приводит данные, согласно которым статистическая вероятность возникновения вне-

запных выбросов угля и газа изменяется по параболическому закону с максимумом при  $V^{daf}$  от 18 % до 9 % (марки углей ОС, Т).

В этой же работе приведены данные о выбросах угля и газа, произошедших за период 1946 – 1972 гг. на шахтах Донбасса (см. табл. 1).

Таблица 1

Выбросы, произошедшие за период 1946 – 1972 г.г., по данным [2] (внезапные выбросы и выбросы, вызванные сотрясательным взрыванием)

Марка угля	$V^{daf}$ , %	$N_{\text{выб. шах}}$	Количество выбросов, п, ед	Частота выбросов $\nu$
Г	37 – 35	8	24	3,0
Ж	35 – 27	59	292	5,0
К	27 – 18	63	661	10,0
ОС	18 – 13	50	561	11,0
Т	13 – 9	51	420	8,0
ПА	< 9	31	505	16,0
А	< 9	27	135*	5,0

\* – без выбросов, вызванных сотрясательным взрыванием

Анализ данных таблицы 1 показал, что частота ( $\nu$ ) в ряду метаморфизма характеризуется бимодальным распределением с двумя максимумами (11,0 и 16,0) и явно не является параболической зависимостью, как указано в работах [1 – 3]. Таким образом, в работе [2] имеются явные принципиальные противоречия. В данном случае считаем, что бимодальное распределение частоты выбросов, согласно [2], является более достоверным и объективным.

В работе [1] авторы приводят статистическую зависимость вероятности встречи выбросоопасного шахтопласта  $P_{i \text{ шах}}$  от весового выхода летучих веществ  $V^{daf}$ . Указанная зависимость рассчитывалась как отношение числа выбросоопасных шахтопластов к общему числу шахтопластов, характеризующихся одинаковыми значениями  $V^{daf}$ . Эта зависимость имеет форму параболы, максимум которой приходится на диапазон  $V^{daf}$  от 18 % до 19 %. Далее,

в работе [1, табл. 17], приведены исходные данные о количестве внезапных выбросов угля и газа  $N_{в}$  и добыче угля  $D$  (в млн т) в Донбассе по группам метаморфизма углей за период 1975 – 1986 гг. По данным таблицы 17 работы [1], были рассчитаны для каждой группы метаморфизма углей плотности выбросов  $\Pi_{\text{выб}}$  по следующей формуле:

$$\Pi_{\text{выб}} = N_{в} / D, \text{ ед./млн т.} \quad (2)$$

Результаты анализа работы [1] приведены в таблице 2.

Таблица 2

Плотность внезапных выбросов на шахтах Донбасса за период 1975 – 1986 гг.

Показатели	$V^{\text{daf}}, \%$						Всего
	29,0	29,0 – 25,1	25–18	18,0– 13,1	13,0– 9,1	9,0	
Добыча, $D$ , млн т	76,83	29,12	53,35	51,45	27,15	60,58	298,5
Количество выбросов, $N_{в}$ , ед.	38	10	77	57	172	63	417
Плотность выбросов, $\Pi_{\text{выб}}$ , ед./млн т	0,49	0,34	1,44	1,11	6,34	1,04	–

Из таблицы 2 следует, что функция распределения плотности выбросов ( $\Pi_{\text{выб}}$ ) в ряду метаморфизма углей изменяется волнообразно и имеет два выраженных максимума:

- 1)  $\Pi_{\text{выб}} = 1,44$  при  $V^{\text{daf}}$  от 25,0 % до 18,1 %;
- 2)  $\Pi_{\text{выб}} = 6,34$  при  $V^{\text{daf}}$  от 13,0 % до 9,1 %.

Анализ данных в работе [1] позволил получить фактическую картину распределения выбросоопасности углей в ряду метаморфизма за период 1975 – 1986 гг.

В работе [10] приведены данные о внезапных выбросах угля и газа, произошедших в подготовительных выработках на шахтах

Донбасса за период с 1951 по 1996 гг. Всего было проанализировано 586 выбросов, из них 504 выброса на выбросоопасных пластах и 82 на особо выбросоопасных пластах. Анализ работы [10] показал, что распределение количества внезапных выбросов угля и газа в ряду метаморфизма для подготовительных выработок имеет два максимума:

- а) на выбросоопасных пластах:
  - $V^{\text{daf}}$  от 25 % до 21 %;
  - $V^{\text{daf}}$  от 17 % до 13 %;
- б) на особо выбросоопасных пластах:
  - $V^{\text{daf}}$  от 29 % до 25 %;
  - $V^{\text{daf}}$  от 21 % до 17 %.

Таким образом, в результате выполненного анализа литературы, установлено, что распределение внезапных выбросов угля и газа в ряду метаморфизма имеет не параболический, а более сложный, волнообразный, бимодальный характер. Следует подчеркнуть, что в ранее анализируемых работах статистические выборки имели следующие ограничения:

- а) по количеству выбросов;
- б) по периоду анализируемых лет.

Учитывая ограниченность статистических выборок выше-рассмотренных работ, с целью уточнения основных закономерностей проявления выбросоопасности углей в ряду метаморфизма, был выполнен статистический анализ внезапных выбросов угля и газа за период 1946 – 2006 гг. по данным работы [11], основные результаты анализа приведены в таблице 3.

Всего было проанализировано 2442 внезапных выброса угля и газа. Из таблицы 3 следует, что на пластах пологого падения наблюдается три максимума в проявлении выбросоопасности  $N_{\text{в}} - 161, 655, 214$ . На пластах наклонного и крутого падений наблюдается два максимума в проявлении выбросоопасности  $N_{\text{в}} - 164, 335$ . Суммарное количество выбросов, зафиксированных на пластах пологого, наклонного и крутого падений, в ряду углефикации изменялось также волнообразно и имеет три максимума в проявлении выбросоопасности:

- 1)  $N_{\text{общ}} = 325$  при  $V^{\text{daf}} > 29,0$  %;
- 2)  $N_{\text{общ}} = 990$  при  $V^{\text{daf}}$  от 18,0 % до 13,1 %;

3)  $N_{\text{общ}} = 289$  при  $V^{\text{daf}} \leq 9,0 \%$ .

Таблица 3

Количество внезапных выбросов по группам метаморфизма за период 1946–2006 гг.

Залегание пластов	$V^{\text{daf}}, \%$						Всего
	>29	29,0 - 25,1	25,0- 18,1	18,0- 13,1	13,0- 9,1	9,0	
Пологое	161	30	172	655	20	214	1252
Крутое и наклонное	164	62	332	335	222	75	1190
Пологое, крутое и наклонное	325	92	504	990	242	289	2442

Таким образом, на пластах пологого, наклонного и крутого падений наблюдается сложный, волнообразный, мультимодальный характер изменения числа внезапных выбросов в ряду метаморфизма (рисунок 1а, кривая 3), где показаны три максимума в проявлении выбросоопасности на пластах пологого, наклонного и крутого падений:

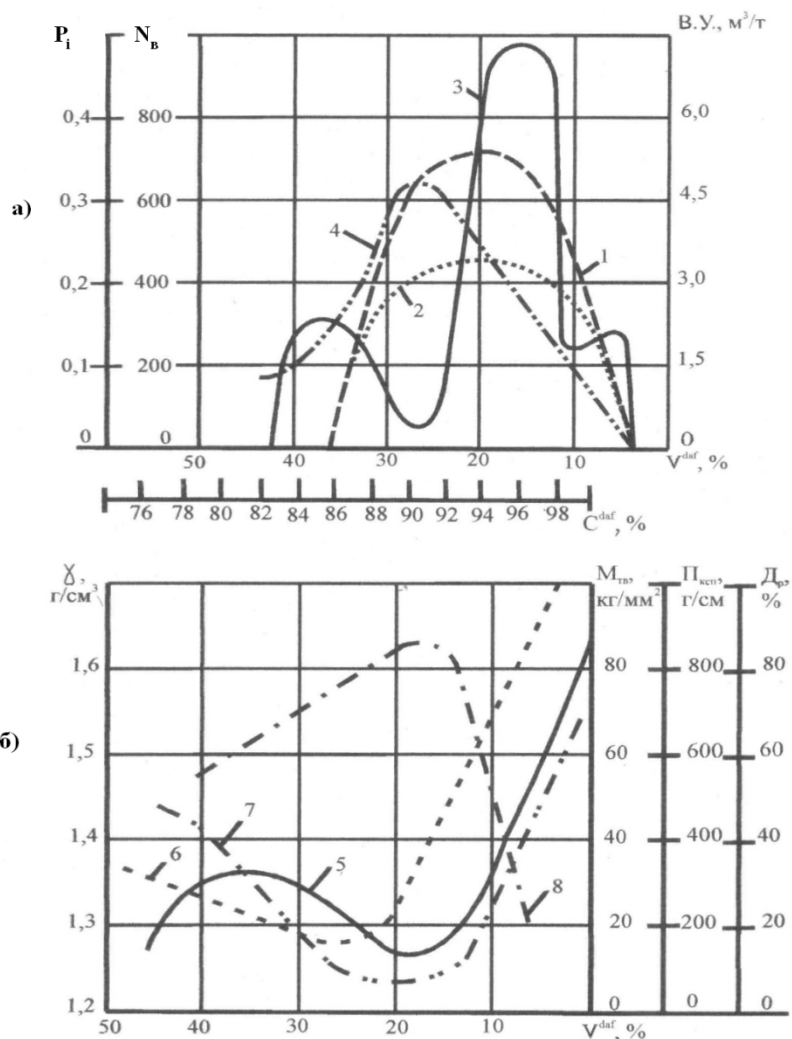
- а) 1-й максимум находится в области  $V^{\text{daf}}$  от 38 % до 32 %;
- б) 2-й максимум расположен в области  $V^{\text{daf}}$  от 18 % до 13%;
- в) 3-й максимум находится области  $V^{\text{daf}}$  от 8 % до 5 %.

Анализ работ [4, 12] показал, что на микроуровне наблюдается волнообразное изменение объема молекулярных пор  $V_{\text{м.п}}$  и радиуса молекулярных пор  $r$ , нм. углей в ряду их метаморфизма. В углях средней стадии метаморфизма (коксующиеся угли) резко сокращается число связей между макромолекулами, снижается энергия связи между ароматическими ядрами. Это вызывает создание жидкокристаллической структуры углей и приводит к снижению констант упругости, росту пластичности и сжимаемости углей. Изменения модуля Юнга, числа твердости по Шору, сжимаемости углей от степени их метаморфизма имеют волнообразный характер [13, 14]. Минимальные значения модуля Юнга и числа твердости по Шору, а также максимальные значения сжи-

маемости углей от степени их метаморфизма находятся в диапазоне  $C^{daf}$  от 89 % до 91 %. На мезоуровне наблюдается волнообразное изменение микротвердости углей  $M_{ТВ}$  и их природной газоносности  $X_{пр}$ , [1, 4, 13].

Согласно [4], максимальные значения объема молекулярных пор  $V_{м.п}$  находятся в диапазоне  $V^{daf}$  от 28 % до 23 %, а в диапазоне  $V^{daf}$  от 18 % до 13% наблюдаются минимальные значения объема молекулярных пор  $V_{м.п}$ , радиуса молекулярных пор  $r$ , нм и объема микропор  $V_{микро}$ . Необходимо отметить, что угли марки ОС ( $V^{daf}$  от 18,0 % до 13,1 %) имеют минимальный объем переходных пор. Низкие значения суммарной пористости углей  $\sum_{пор}$  и высокие значения  $X_{пр}$  являются причиной высоких значений удельной природной газоносности  $X_{уд.пр}$ , которая вычисляется по формуле:  $X_{уд.пр} = X_{пр} / \sum_{пор}$ . Таким образом, в диапазоне  $V^{daf}$  от 18,0 % до 13,1 %, наблюдаются высокие значения удельной природной газоносности  $X_{уд.пр}$  и зафиксировано наибольшее количество внезапных выбросов угля и газа ( $N_{общ} = 990$ ). Изменения на мезоуровне обуславливают закономерности и особенности проявления выбросов угля и газа на макроуровне, т. е. на региональном уровне. Угли средней стадии метаморфизма характеризуются повышенной выбросоопасностью, так как имеют минимальные значения: механической прочности по копру, энергии активации диффузии метана из угля, энергии активации разрушения углей, коэффициента теплопроводности, а также имеют высокие значения: измельчаемости, дробимости, сорбционной набухаемости, природной газоносности, давления газов в пласте, удельного электрического сопротивления. Следовательно, структурно-химические преобразования, происходящие на микроуровне в ряду метаморфизма, вызывают изменения физико-механических и газодинамических свойств углей на мезоуровне. Изменения на мезоуровне обуславливают закономерности и особенности проявления выбросов угля и газа в ряду метаморфизма, т.е. на региональном уровне.





- 1 – статистическая вероятность встречи выбросоопасного шахтопласта в Донбассе согласно [3,4];
- 2 – статистическая вероятность встречи выбросоопасного шахтопласта, рассчитанная нами –  $P_{i-2}$ ;
- 3 – распределение числа внезапных выбросов угля и газа в Донбассе  $N_b$ , ед. по нашим данным;
- 4 – содержание высших углеводородов  $V.Y.$ , м<sup>3</sup>/т (по Косенко Б. М.);
- 5 – микротвердость углей  $M_t$ , кг/мм<sup>2</sup> (по Аммосову И.И. и Мусял С. А., Иванову Г.А.);
- 6 – удельный вес -  $\gamma$ , г/см<sup>3</sup>,
- 7 – механическая прочность по копру  $\Pi_{kop}$ , г /см (по Двужильной Н.М.);
- 8 – дробимость, (измельчаемость) углей  $D_p$ , % (по Русчеву)

Рис. 1. Выбросоопасность и свойства углей в ряду метаморфизма

В заключение необходимо отметить существенные успехи в Российской Федерации в изучении свойств углей в ряду метаморфизма [15]. Обширные термобарогеохимические исследования в этом направлении выполнены в Южном федеральном университете. В работе [15] приведены сведения о количестве летучих продуктов  $Q_{\text{лп}}$ , в процентах, выделившихся на разных этапах углефикации, в процентах, на органическое вещество конца торфяной стадии ( $C^{\text{daf}} = 58,97\%$ ). Из работы [15] следует, что функция  $Q_{\text{лп}}, \% = f(C^{\text{daf}}), \%$  имеет волнообразный, затухающий колебательный характер с четырьмя убывающими максимумами в диапазонах:

- 1)  $C^{\text{daf}}$  от 76 % до 77 %;
- 2)  $C^{\text{daf}}$  от 86 % до 89 %;
- 3)  $C^{\text{daf}}$  от 90,5 % до 92,5 %;
- 4)  $C^{\text{daf}}$  от 94 % до 96 %.

Следует отметить, что 3-й максимум ( $C^{\text{daf}}$  от 90,5 % до 92,5 %) функции  $Q_{\text{лп}}, \% = f(C^{\text{daf}}), \%$  совпадает со вторым наиболее значимым максимумом выбросов (рис. 1а, кривая 3).

### **Выводы.**

1. Ранее высказанное предположение о том, что проявление выбросоопасности углей в ряду метаморфизма характеризуется параболической зависимостью, оказалось ошибочным и не соответствует действительности.

2. Данные статистического анализа внезапных выбросов угля и газа, произошедших за период 1946 – 2006 гг., полностью подтвердили основные положения, высказанной рабочей гипотезы, о сложном, волнообразном, характере проявления выбросоопасности углей в ряду метаморфизма. Приведены доказательства того, что сложные, волнообразные структурно-химические преобразования, происходящие на микро-уровне в органической массе углей в процессе их метаморфизма, вызывают волнообразные, нелинейные изменения физико-механических и газодинамических свойств углей на мезоуровне. Нелинейные, квазипериодические изменения физико-механических и газодинамических свойств углей на мезоуровне обуславливают волнообразный, мультимодальный характер проявления внезапных выбросов угля

и газа в ряду метаморфизма на макроуровне, т. е. на региональном уровне.

3. Установлено, что максимальное количество внезапных выбросов происходит в диапазоне  $V^{daf}$  от 18 % до 13 %, рассмотрены параметры, которые определяют повышенную выбросоопасность углей данной стадии метаморфизма.

4. Установлено, что минимальные значения проявления внезапных выбросов в ряду метаморфизма углей находятся в диапазоне значений  $V^{daf}$  от 30 % до 23 % и им соответствуют минимальные значения:

а) суммарной пористости углей  $\sum_{пор}$ , %; показателя сорбционной активности микропор углей  $S_a$ , % ; диэлектрической проницаемости углей  $\epsilon$ ;

б) пониженные значения толщины пластического слоя  $u$ , мм;

в) максимальные значения содержания высших углеводородов, процентах.

## СПИСОК ССЫЛОК

1. Региональный прогноз выбросоопасности угольных пластов Донецкого бассейна / О. А. Колесов, В. И. Николин, Г. Н. Степанович, В. Я. Ткач // Уголь Украины. – 1971. – № 5.- С. 42-44.
2. Ткач, В. Я. Методы прогноза выбросоопасности шахтных пластов / В. Я. Ткач // Техніка. – 1980. – 190 С.
3. Забигайло, В. Е. Влияние катагенеза горных пород и метаморфизма углей на их выбросоопасность / В. Е. Забигайло, В. И. Николин. – К.: Наукова думка, 1990. – 168 с.
4. Саранчук, В. И. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля / В. И. Саранчук, А. Т. Айруни, К. Е. Ковалев; отв. ред. В. А. Сапунов – К.: Наукова думка, 1988. – 192 с.
5. Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям: СОУ 10.1.00174088.011 – 2005. – К.: Минуглепром Украины, 2005. – 225 с.
6. Евдокимова, В. П. Статистический способ определения эффективности защитного действия опережающей надработки вы-

- бросоопасных пластов / В. П. Евдокимова, В. П. Коптиков, И. А. Южанин. – Донецк: «Вебер» (Донецкое отделение), 2007. – 443 с.
7. Степанович, Г. Я. Прогноз и предупреждение внезапных выбросов угля и газа: обзор / Г. Я. Степанович, В. И. Николин, А. Т. Айруни. – М.: ЦНИЭИ уголь, 1976. – 53 с.
  8. Петросян, А. Э. Причины возникновения внезапных выбросов угля и газа / А. Э. Петросян, Б. М. Иванов. – В кн. Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М.: Недра, 1978. – С. 3-61.
  9. Чернов, О. И. Прогноз внезапных выбросов угля и газа / О. И. Чернов, В. Н. Пузырев. – М.: Недра, 1979. – 296 с.
  10. Агафонов, А. В. Влияние горно-геологических факторов на проявление выбросоопасности угольных пластов / А. В. Агафонов, И. И. Балинченко, Э. И. Тимофеев // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сб. науч. тр. – Макеевка: Донбасс, 1996. – С. 55-61.
  11. Выбросы угля, породы в шахтах Донбасса в 1906 – 2007 гг.: справочник / Волошин Н. Е., Вайнштейн Л. А., Брюханов А. М. и др. – Донецк: СПД Дмитренко, 2008. – 920 с.
  12. Айруни, А. Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах / А. Т. Айруни. – М.: Наука, 1987. – 310 с.
  13. Агроскин, А. А. Физика угля / А. А. Агроскин. – М.: Недра, 1965. – 352 с.
  14. Нестеренко Л. Л. Основы химии и физики горючих ископаемых / Л. Л. Нестеренко, Ю. В. Бирюков, В. А. Лебедев. – К.: Вища школа, 1987. – 359 с.
  15. Гамов, М. И. Флюиды в углях / М. И. Гамов. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2013. – 67 с.