

## УСЛОВИЕ РАЗВИТИЯ ВЫБРОСОВ УГЛЯ И ГАЗА И МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ВЫБРОСООПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

к.т.н. Стариков Г.П. (ИФГП НАН Украины)

*На підставі теоретичних і експериментальних досліджень уточнений механізм розвитку викидів вугілля і газу й обґрунтовані критерії для прогнозу ступеня викидонебезпечності вугільних пластів і класифікації типів ГДЯ.*

### DEVELOPMENT CONDITION OF COAL AND GAS BUSTS AND THEIR PRODICTIONS

Starikov G.P.

*On the framework of the theoretical and experimental investigations the coal and gas busts nature is established. The criteria of the coal and gas busts as well as the gaseous-dynamicsl phenomena classification are developed.*

Многообразные условия возникновения и форм проявления внезапных выбросов угля и газа в шахтах обуславливают необходимость комплексного подхода при разработке теории этих явлений, охватывает вопросы кинетики газовыделения из пористой структуры угля, проявление горного давления, физико-механических свойств углей и горных пород и закономерностей процессов разрушения системы «уголь-газ». К настоящему времени сформулирована энергетическая теория выбросов [1, 4, 13], которая детализирует основные источники выбросоопасности, но из нее фактически не следуют критерии для оценки степени выбросоопасности угольных пластов. Поэтому дальнейшее развитие вопросов теории внезапных выбросов, в особенности влияние скорости разгрузки горного массива на состояние трещиновато-пористой структуры угля и механизм разрушения и построение на этой основе критериев выбросоопасности, является вполне актуальным.

Таким образом, целью данных исследований является исследование влияния скорости разгрузки системы «уголь-газ» на механизм разрушения угля и разработка новых методов прогноза выбросоопасности и классификации типов ГДЯ.

Наиболее достоверным фактом оценки склонности угольных пластов к газодинамическим явлениям являются выбросы угля и газа при сотрясательном взрывании. Анализ выбросов угля и газа, происшедших за последние 15 лет при взрывных работах в режиме сотрясательного взрывания (табл. 1) показывают, что интенсивность выбросов в первую очередь зависит от природной метаносности, причем фактическое метановыделение превышает ее в среднем на 32%. В целом, это может быть связано как с неравномерным распределением метана в угольном пласте [1], так и с наличием в поровой структуре угля значительного количества закрытых пор [2, 3].

Таблица 1. Интенсивность и метаноемкость выбросов угля и газа при проведении пластовых подготовительных выработок в режиме сотряса-тельного взрывания.

N/N	Шахта, пласт	Категория опасности	Количество выбросов за 1993-2002 г.	Средняя инт-сть выбросов Р, т	Фактическая метаноемкость угля, м <sup>3</sup> /т	Природная метаноемкость угля, м <sup>3</sup> /т	Отношение
1	им. Скочинского пл. h <sub>6</sub>	особо опасный	123	273	38,0	30	1,27
2	им. Калинина пл. h <sub>10</sub>	особо опасный	95	486	32,8	25	1,31
3	им. 60 Сов. Ук-раины пл. h <sub>8</sub>	особо опасный	40	250	38,5	34	1,13
4	Глубокая пл. h <sub>8</sub> -h <sub>10</sub>	особо опасный	33	124	51,3	32	1,71
			197	159	49,4	30	1,83
5	Ш/У "Донбасс" пл. h <sub>8</sub>	особо опасный	112	343	58,7	35	1,67
6	им. Бажанова пл. m <sub>3</sub>	выбросооп.	15	274	30,2	25	1,21
7	им. Засядько, пл. l <sub>1</sub> пл. k8, пл. m <sub>3</sub>	выбросооп.	77	42,7	28,7	25	1,03
		выбросооп.	23	28,4	19,4	17,5	1,11
		выбросооп.	6	52,3	22,2	20	1,11
8	им. Гагарина пл. m <sub>3</sub>	выбросооп.	6	235	14,2	10	1,41
9	им. Поченкова пл. l <sub>1</sub>	выбросооп.	5	56,6	25,5	22,5	1,12
			747	P=153	Q <sub>в</sub> =33,8	Q <sub>п</sub> =25,5	1,32

Последнее предположение более достоверно, поскольку объем закрытых пор у выбросоопасных пластов превышает объем открытых пор в 2-3 раза и находится в пределах 0,19-0,258 см<sup>3</sup>/г. Естественно основной объем метана находится в закрытых порах, а наличие или отсутствие газодинамического явления будет определяться условиями трансформации закрытых пор в трещины и кинетикой десорбции метана.

Известно [3, 4], что любое технологическое воздействие на угольный массив вызывает в нем волну разгрузки. При этом условием раскрытия закрытых пор и соответственное выделение свободной энергии системы «уголь-газ» (выброс угля и газа) [3] будет зависеть от степени разгрузки – соотношения внешнего (P) и внутреннего (P<sub>0</sub>) напряжений в пласте; скорости волны разгрузки и вязкости системы «уголь-газ», величины пропорциональной изменению модуля сдвига во времени. При скорости разгрузки в пределах V = 1-2 МПа/с угольный массив, находящийся в предельном

состоянии разрушается, как правило, сдвигом, а при  $V > 10$  МПа/с – отрывом (рис.1) [5].

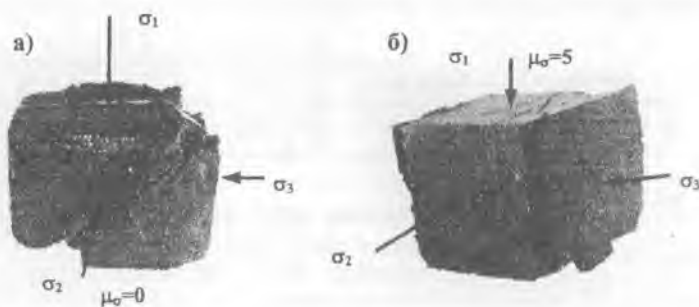


Рис.1. Общий вид и характер разрушения угольных образцов: а) разрушение сдвигом при  $V = 1-2$  МПа/с; б) разрушение отрывом при  $V > 10$  МПа/с.

Скорость разгрузки является необходимым условием, однако потеря устойчивости системы «уголь-газ» и развитие газодинамического явления произойдет только в том случае, когда напряжение на фронте волны разгрузки превысит критические необходимые для прорастания пор в трещины. Согласно [7] критический размер поры, выше которого развивается описанная неустойчивость, определяется условием:

$$L_{cr} = L_0 / \Delta P^2,$$

где  $L_0$  – некоторая постоянная размерности длины.

Интенсивность выброса угля и газа, таким образом, будет определяться количеством разрушенных закрытых пор. В идеальном случае максимальная интенсивность выброса будет наблюдаться, когда расстояние между прорастающими трещинами станет равным минимальному размеру закрытых пор (рис.2). Условием прекращения выброса угля и газа является снижение скорости волны разгрузки до уровня менее 2 МПа/с и соответственно смена механизма разрушения угля отрывом на механизм разрушения сдвигом.

Рассмотренные условия развития выбросов угля и газа дают возможность обосновать целый ряд новых способов прогноза выбросоопасности угольных пластов, в частности, способ категоризации угольных пластов по степени выбросоопасности, способ прогноза при вскрытии и способ отличия выбросов угля и газа от внезапных обрушений угля. Основными параметрами, которые могут характеризовать выбросоопасность пластов, являются количество метана ( $Q$ ) и влаги ( $W$ ) в объеме открытых и закрытых пор [8], а по аналогии с [3], соотношение внешних напряжений в пласте  $\sigma_{\text{н}}$  и прочности угля  $R_{\text{сж}}$  внутренней характеристики системы «уголь-газ»,

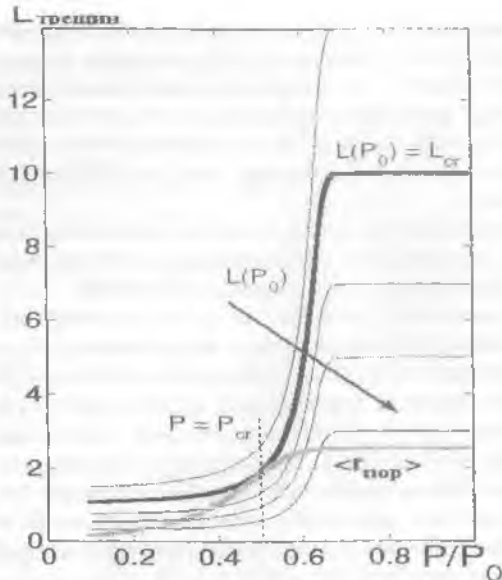


Рис.2. Зависимость  $L_{тр} = f\left(\frac{P}{P_0}\right)$ , характеризующая превращение пор в трещины.

а также градиента изменений напряжений (скорости и глубины разгрузки) в виде соотношения скорости подвигания забоя  $l_0$  к величине зоны предельно напряженного равновесия в призабойной зоне  $l_k$ . Критерий оценки степени (категории) выбросоопасности устанавливается на основе нахождения трех безразмерных параметров, характеризующих выбросоопасность по комплексу физических показателей:

$$B = f\left(\frac{Q-W}{W}, \frac{\sigma\gamma H}{R_{\text{вск}}}, \frac{l_0}{l_k}\right) \quad (1)$$

Таким образом, предложенный критерий основан на определении физических свойств и состояния массива, достаточно полно учитывающих основные факторы выбросоопасности. Отличительной особенностью критерия является также возможность количественной оценки степени выбросоопасности угольных пластов и забоев с дифференциацией по факторам газа и горного давления и учетом влияния технологии выемки [16].

В соответствии с критерием (1) для установления степени (категории) выбросоопасности пласта проводятся инструментальные измерения содержания физически связанной воды в отобранных пробах угля с помо-

шью спектрометра ЯМР [2-8], прочности угля в забое экспресс-методом с применением прочностномера П-1 [10], величины зоны разгрузки в призабойной части пласта – по динамике газовыделения из контрольных шпуров. Измерения проводятся через каждые два цикла подвигания очистного забоя на расстоянии 18-24 м (10-15 измерений) и на каждом цикле суточного подвигания подготовительного забоя на участке длиной 25-37 м (10-15 измерений).

Содержание метана в угле Q при максимальном давлении 10-12 МПа для каждого шахтопласта или конкретного участка пласта определяется один раз на протяжении всего участка наблюдений.

Зона разгрузки  $l_p$  впереди забоя пласта определяется по динамике начальной скорости газовыделения в соответствии с [9], при этом за величину  $l_p$  принимают расстояние от поверхности забоя до середины интервала, на котором замерена максимальная по длине шпура начальная скорость газовыделения в призабойной части угольного пласта. Как показали ранее выполненные исследования [10], расстояние от поверхности забоя до места максимальной концентрации напряжений  $l_k$  составляет  $1,2 l_p$ .

Результаты исследований и промышленных испытаний способа приведены в табл.2. На основании результатов, приведенных в таблице, построена зависимость (рис.3)  $(Q-W)W \cdot l_0/l_k = f(\sigma_{\gamma H}/\sigma_{сж}) \cdot l_0/l_k$  и определены количественные критерии, по которым выбросоопасные шахтопласты (участки) относятся к категории особо выбросоопасных и критерии для обратного перевода угрожаемых или выбросоопасных пластов в неопасные.

Угольный пласт (участок) относится к категории особо опасных при значении критерия выбросоопасности, равным

$$B_0 = \left( \frac{Q-W}{W} + 0,06 \frac{\sigma_{\gamma H}}{\sigma_{сж}} \right) \frac{l_0}{1,2l_k} - 0,75 \geq 0 \quad (2)$$

Угольный пласт (участок) может быть переведен из категории угрожаемых или выбросоопасных в неопасные при значении критерия выбросоопасности, равным

$$B_n = \left( \frac{Q-W}{W} + 0,025 \frac{\sigma_{\gamma H}}{\sigma_{сж}} \right) \frac{l_0}{1,2l_k} - 0,25 < 0$$

Полученный общий критерий выбросоопасности ( $B_0$ ) может быть применен для прогноза выбросоопасности при вскрытии угольных пластов. Как правило, вскрытие угольных пластов производится буровзрывным способом, при этом выполняется одно из основных условий, способствующих проявлению выбросоопасности [3] – наличие высокоскоростной разгрузки. При использовании критерия (2) учитывать параметр  $\frac{l_0}{1,2l_k}$ , характеризующий градиент изменения напряжений нет никакой необходи-

Таблица 2. Результаты экспериментальной проверки метода категорий выбросоопасности угольных пластов и участков.

№ п/п	Шахта, пласт, горизонт	Место измерения и подвигание забоя, м	Весовое содержание метана, Q, кг	Весовое содержание воды, W, кг	Прочность угля, $\sigma_{сж}$ , МПа	$\left(\frac{Q-W}{W}\right) \frac{I_0}{I_k}$	$\left(\frac{\sigma_{нп}}{\sigma_{сж}}\right) \frac{I_0}{I_k}$	$\frac{I_0}{I_k}$	Категория выбросоопасности по приказу
1	им.Скользящего - h <sub>6</sub> <sup>1</sup> - 1144	лава - 13,8	21,4	9,0	5,5	1,24	4,86	0,9	особоопасн.
2	им.Ленина - m <sub>3</sub> - 970	лава - 18,0	14,0	8,0	4,5	0,3	2,15	0,4	выброс.
3	Красный Октябрь - h <sub>11</sub> - 910	штрек - 36,0	20,0	10,0	6,0	0,9	3,4	0,9	особоопасн.
4	им.Калинина - K <sub>3</sub> - 960	лава - 29,0	14,0	8,6	4,2	0,4	3,14	0,57	выброс.
5	им.Румянцева - l <sub>7</sub> - 970	лава - 27,0	12,0	6,6	3,8	0,76	5,93	0,93	особоопасн.
6	им.Калинина - h <sub>10</sub> - 1015	о.штрек - 45,5	17,8	8,1	5,4	1,02	3,99	0,85	особоопасн.
7	им.Засядько - l <sub>1</sub> - 1021	о.штрек - 75,0	17,8	10,1	8,2	0,55	2,1	0,7	выброс.
8	Глубокая - h <sub>8</sub> - 810	ходок - 95,0	21,3	9,1	5,2	1,23	3,58	0,92	особоопасн.
9	им.Соц.Донбасс - h <sub>8</sub> - 1090	о.штрек - 33,5	25,0	10,0	6,2	1,28	3,7	0,85	особоопасн.
10	им.Соц.Донбасс - h <sub>9</sub> - 1090	о.штрек - 33,5	25,0	12,6	5,0	0,94	5,6	1,0	особоопасн.
11	им.Соц.Донбасс - h <sub>8</sub> - 1090	о.штрек - 33,5	25,0	11,0	5,9	0,95	3,5	0,74	особоопасн.
12	им.Соц.Донбасс - h <sub>8</sub> - 1090	о.штрек - 33,5	25,0	10,0	6,2	1,5	4,5	1,0	особоопасн.
13	им.Соц.Донбасс - h <sub>8</sub> - 1090	о.штрек - 33,5	25,0	13,5	4,3	1,45	6,5	1,0	выброс.
14	им.Румянцева - l <sub>5</sub> - 850	лава - 41,5	8,5	12,0	5,4	0,1	1,18	0,3	угрожаемый
15	Гагарина - m <sub>3</sub> - 830	лава - 42,0	8,5	12,2	5,5	0,1	1,45	0,3	выброс.
16	Юнком - m <sub>4</sub> - 826	лава - 30,6	12,1	9,0	5,3	0,11	3,88	0,34	невывброс.

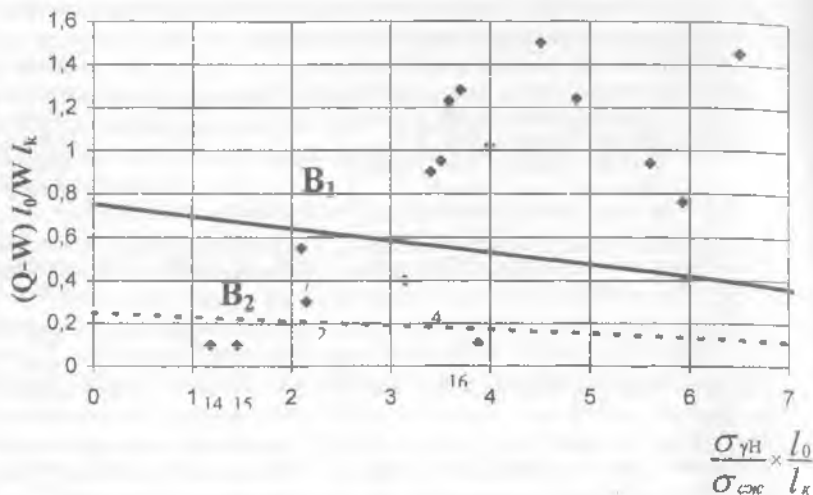


Рис.3. Зависимость  $\frac{Q-W}{W} \cdot \frac{l_0}{l_k} = f\left(\frac{\sigma_{\gamma H}}{\sigma_{сж}} \cdot \frac{l_0}{l_k}\right)$ , характеризующая степень выбросоопасности угольных пластов по физическим свойствам.

мости, поскольку это условие всегда выполняется. Таким образом, критерий, оценивающий степень выбросоопасности пласта учетом результатов работы [11] имеет вид:

$$B_{вк} = \frac{Q}{W} - \frac{(0,47 - 0,235 \cdot 10^{-3} H) \sigma_{\gamma H}}{\sigma_{сж}} - 2,5 \geq 0$$

где  $H$  – глубина ведения горных работ.

Экспериментальная проверка, выполненная при вскрытии более 97 угольных пластов различной степени выбросоопасности, подтвердила надежность разработанного критерия [15]. Ошибки первого рода отсутствовали, а количество ошибок второго рода не превышало 14%.

Еще одна проблема, которая осложняет отработку выбросоопасных угольных пластов это внезапные высыпания и внезапные выбросы угля и газа. Классификация ГДЯ, в зависимости от тяжести последствий, предусмотрена отраслевым нормативным документом [9] и связана, в первую очередь, с оценкой соответствия применяемой технологии ведения горных работ и комплекса мероприятий по предотвращению ГДЯ для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий разработки пласта.

Фактически направлено назначенные мероприятия по предупреждению ГДЯ, в зависимости от склонности пластов к внезапным обрушениям или выбросов, могут интенсифицировать прямо противоположные эффекты - противовыбросные мероприятия усиливают внезапные высыпания, а мероприятия по предотвращению высыпаний не снижают внезапные выбросы угля и газа. В настоящее время тип ГДЯ устанавливается экспертной комиссией по результатам обследования места состоявшегося явления, натурных измерений и расчетов в соответствии с [12]. Положенная в основу классификации типа ГДЯ методология носит статистический характер и для принятия окончательного решения необходим высокий профессиональный уровень членов экспертной комиссии. Исходя из существующего состояния проблемы, связанной с классификацией типа ГДЯ, выполнены лабораторные, шахтные исследования и приемочные испытания способа отличия внезапного высыпания угля от выброса для экспертной оценки типа ГДЯ. Физическая основа способа базируется на учете перестройки молекулярной структуры угля, которому присущи основные свойства полимеров. При разной степени интенсивности газодинамических явлений происходят соответствующие изменения в поровой структуре угля (уменьшается количество закрытых пор). Для установления типа ГДЯ ведется отбор проб угля в зоне ГДЯ и из ненарушенной части пласта, осуществляется их метанонасыщенность и запись на установке ядерного магнитного резонанса и в соответствии с [14] рассчитывается критерий:

$$B = \left( \frac{I_1^n}{I_2^n} - \frac{I_1^z}{I_2^z} \right) \left( \frac{I_1^z}{I_2^z} \right)^{-1}$$

где  $I_1^n, I_2^n$  - интенсивность узкой и широкой линий спектров угля из ненарушенной части пласта после газонасыщения, у.е.;

$I_1^z, I_2^z$  - интенсивность узкой и широкой линий спектра угля из выброшенного (высыпавшегося) угля после газонасыщения, у.е.

При значении  $B \geq 0,6$  газодинамическое явление относится к внезапному высыпанию. Интегральный показатель может обеспечить точный прогноз типа ГДЯ независимо от глубины ведения горных работ и марки угля.

Результаты натурных исследований определения типов ГДЯ, происшедших в различных горно-геологических условиях приведены в таблице 3. Анализ выполненных исследований показал, что физическая основа не вызывает сомнения, а отсутствие ошибок первого и второго рода свидетельствует о высокой достоверности способа классификации типов ГДЯ.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Установлено, что у выбросоопасных угольных пластов метан в поровом объеме находится в системе закрытых пор.



Таблица 3. Результаты исследования классификаций типов ГДЯ.

№/№	Шахта, пласт	Место ГДЯ	Результаты измерений				Тип ГДЯ по критерию В
			$\frac{I_1^H}{I_2^H}$	$\frac{I_1^E}{I_2^E}$	$\frac{I_1^H}{I_2^H} / \frac{I_1^E}{I_2^E}$	$B = \frac{\frac{I_1^H}{I_2^H} - \frac{I_1^E}{I_2^E}}{\frac{I_1^H}{I_2^H} / \frac{I_1^E}{I_2^E}}$	Тип ГДЯ по закл. комиссии
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Гаевого, м <sub>3</sub>	уступ № 3	3,5	2,9	1,2	0,2	обр./обр.
2	Кондратьев-ка, м <sub>5</sub>	щ. лава	3,7	1,8	2,05	1,05	выбр./выбр.
3	Кондратьев-ка, м <sub>5</sub>	щ. лава	3,6	1,9	1,9	0,9	выбр./выбр.
4	Кондратьев-ка, м <sub>5</sub>	щ. лава	3,0	2,6	1,15	0,15	обр./обр.
5	Румянцева, к <sub>4</sub> <sup>1</sup>	уступ № 1	3,9	3,6	1,13	0,13	обр./обр.
6	Ленина, м <sub>3</sub>	заб. о/ш.	4,6	2,0	2,3	1,3	выбр./выбр.
7	Калинина, м <sub>3</sub>	заб. в/ш.	3,6	1,5	2,4	1,4	выбр./выбр.
8	Калинина, м <sub>3</sub>	заб. в/ш.	2,8	1,3	2,1	1,1	выбр./выбр.
9	Калинина, м <sub>3</sub>	заб. в/ш.	1,9	0,8	2,3	1,3	выбр./выбр.
10	Калинина, м <sub>3</sub>	заб. в/ш.	3,4	1,6	2,15	1,15	выбр./выбр.
11	Калинина, м <sub>3</sub>	заб. в/ш.	2,0	0,9	2,2	1,2	выбр./выбр.
12	Калинина, м <sub>3</sub>	заб. в/ш.	1,6	0,8	2,15	1,15	выбр./выбр.
13	Калинина, м <sub>3</sub>	заб. вент. штр.	4,8	2,3	2,08	1,08	выбр./выбр.
14	Калинина, м <sub>3</sub>	заб. в/ш.	4,9	2,2	2,2	1,2	выбр./выбр.
15	Кондратьев-ка, к <sub>3</sub> <sup>11</sup>	уступ № 3	2,9	2,7	1,09	0,09	обр./обр.
16	Новая, к <sub>1</sub>	уступ № 3	2,9	2,7	1,08	0,08	обр./обр.
17	Новая, к <sub>1</sub>	уступ № 1	3,3	3,0	1,1	0,1	обр./обр.
18	Артема, м <sub>3</sub>	щ. лава	3,4	1,7	1,98	0,98	выбр./выбр.
19	Ольховат-ская, к <sub>7</sub> <sup>1</sup>	уступ № 5	3,4	3,1	1,11	0,11	обр./обр.

2. Установлено, что основным условием, определяющим развитие выбросов угля и газа, является скорость разгрузки горного массива, способствующая превращению закрытых пор в угле в трещины.

3. Научно обоснованы и апробированы критерии для категоризации угольных пластов по степени выбросоопасности, для прогноза при

вскрытии угольных пластов и для классификации типов ГДЯ (выбросы угля и газа и обрушение угля).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросян А.Э., Яновская М.Ф., Иванов Б.М., Крупеня В.Г. Исследование процессов возникновения внезапных выбросов угля и газа. М.: Наука.-1978.-112с.
2. Алексеев А.Д., Зайденварг В.Е., Синолицкий В.В., Ульянова Е.В., Радиофизика в угольной промышленности. Москва, Недра. 1992.-183с.
3. Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Филиппов А.Э. Численное моделирование выхода метана из угля с учетом волны разгрузки и раскрытие пористости при изменении напряжений. В сб. Проблемы гірничого тиску. Вып.9.-Донецк: ДонГУ.-2003.-С.120-151.
4. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика выбросов и горных ударов. - М.: Недра, 1983.-280с.
5. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В., Стариков Г.П. Изменение трещиновато-пористой структуры и проницаемости угля в условиях неравномерного объемного сжатия. Научн.сообщ. Москва: Ин-т горн.дела им.А.А.Скочинского, 1990.-С.19-23.
6. Стариков Г.П. Особенности деформирования и разрушения углей при объемном сжатии. Геотехнологии на рубеже XXI века.-Донецк, ДОГТУ.-2001, Т.1.-С.81-87.
7. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. Москва: Наука.-1986.-733с.
8. Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Малога М.Ф., Аносов О.С. Обработка выбросоопасных пластов водными растворами ПАВ. К.:Техніка, 1988. - 88с.
9. НАОП 1.1.30-5.06.89 «Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа». М.-1989.-189с.
- 10.Фейт Г.Н. Исследование влияния способа управления горным давлением на выбросоопасность призабойной зоны угольного пласта.//Научные сообщения//ИГД им.А.А.Скочинского.-М.-1983.-№47.-С.12-18.
- 11.Стариков Г.П. Методические основы определения степени выбросоопасности угольных пластов при вскрытии. Физика и техника высоких давлений. -1993.-т.1, №3.
- 12.Методические указания по расследованию и технической экспертизе газодинамических явлений на шахтах Донбасса (Макиевка-Донбасс, 1994, 49с.).
- 13.Ходот В.В. и др. Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. М.: Наука.-1973.-188с.
- 14.Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Ульянова Е.В. и др. Спосіб відрізнєння раптового обрушення (висипання) вугілля від викиду для експертної оцінки типу ГДЯ. Керівництво із застосування (КД. 12.01.05.070.2001).

15. Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Недодаев Н.В. и др. Прогноз выбросоопасности при вскрытии крутых и крутонаклонных пластов. Методические указания (КД 12.10.05.01-99).
16. Фейт Г.Н., Гайко Э.И., Стариков Г.П. Определение категории выбросоопасности угольных пластов по комплексу физических показателей. Научн.сообщ.- Москва: Ин-т горн.дела им.А.А.Скочинского, 1992. - С.79-83.