

**Министерство образования и науки Украины
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



**В.И. КОРОЛЬ
А.В. СКОБЕНКО**

**АКУСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПРОГНОЗА
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

МОНОГРАФИЯ

**Днепропетровск
НГУ
2013**

УДК 622.817.4
ББК 33.1
К68

Рекомендовано вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 6 від 2 липня 2013).

Рецензенти:

С.П. Мінець – доктор технічних наук, професор кафедри будівництва і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет»;

О.О. Сдвижкова – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет».

Король В.І.

К68 Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах: моногр. / В.И. Король, А.В. Скобенко. – Д.: Национальный горный университет, 2013. – 181 с.

ISBN 978-966-350-422-3

Представлена обработка статистического материала относительно газодинамических явлений (ГДЯ), которые происходили на угольных шахтах Донбасса за последние 25 лет. Установлена закономерность проявлений ГДЯ от глубины разработки и интенсивности отработки угольных пластов. Проведен анализ особенности распространения акустических волн в структурно неоднородной среде, обосновано два дополнительных критерия выбороопасности, которые позволили повысить вероятность точного прогноза.

Материал монографии может быть использован в учебном процессе при изучении дисциплины «Механика горных пород» по вопросам газодинамических проявлений горного давления, а также для усовершенствования методов прогноза газодинамических явлений специалистами научно-исследовательских и проектных организаций (ГВУЗ «НГУ», ИГТМ, МакНИИ, Днепрогипрошахт, Донгипрошахт и др.).

УДК 622.817.4
ББК 33.1

© В.І. Король, О.В. Скобенко, 2013
© Державний ВНЗ «НГУ», 2013

ISBN 978-966-350-422-3

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. Исследований газодинамических явлений в угольных шахтах	6
1.1. Современное состояние угольной промышленности Украины	6
1.2. Исторический аспект проблемы газодинамических явлений в угольных шахтах	15
1.3. Влияние глубины и интенсивности отработки угольных пластов на количество газодинамических явлений	30
РАЗДЕЛ 2. Теории возникновения и развития газодинамических явлений	34
2.1. Теории, описывающие механизм развития газодинамических явлений	34
2.2. Природные факторы и причины возникновения газодинамических явлений	39
2.3. Напряженно-деформированное состояние выбросоопасных угольных пластов, как основной фактор выбросоопасности	55
2.4. Критерии и методы оценки и прогноза выбросоопасности	64
РАЗДЕЛ 3. Анализ процессов прохождения акустических волн через структурно неоднородный породный массив в окрестности горной выработки	84
3.1. Взаимосвязь параметров акустического сигнала с уровнем напряжений в углепородном массиве	86
3.2. Акустический контроль состояния участка массива впереди выработки	102
3.3. Исследование области массива впереди забоя как "геомеханической лазерной системы"	106

РАЗДЕЛ 4. Шахтные исследования акустической системы	
контроля газодинамических явлений АК-1М.....	111
4.1. Повышение надежности прогноза ГДЯ на основе статистических моделей.....	111
4.2. Требования к аппаратуре АК-1М и методика проведения шахтных экспериментов	120
4.3. Прогноз ГДЯ на ГП «Угольная компания «Шахта Краснолиманская».....	128
4.3.1. Геологические особенности шахтного поля	128
4.3.2. Прогноз ГДЯ в вентиляционном и конвейерном штреках западной лавы засбросовой части пл. l_3	132
4.4. Прогноз ГДЯ на ГП «Шахта им. А.А. Скочинского».....	138
4.4.1. Горно-геологические условия.....	138
4.4.2. Прогноз газодинамических явлений.....	142
4.5. Прогноз ГДЯ на шахте «Красноармейская-Западная № 1».....	144
4.5.1. Горно-геологические и горно-технические условия добычи угля на шахте «Красноармейская-Западная № 1».....	144
4.5.2. Прогноз выбросоопасных ситуаций.....	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	158

ВВЕДЕНИЕ

Угольная промышленность Украины является одной из базовых отраслей экономики, обеспечивающая сырьем энергетику, коксохимию и коммунальное хозяйство страны. Принимается во внимание тот факт, что запасов угля значительно больше, чем нефти и газа, повышение эффективности процессов его добычи, снижение себестоимости и повышение конкурентоспособности является важной народнохозяйственной задачей.

Одной из больших проблем, связанных с добычей угля, является повышенный травматизм, связанный с целым рядом причин, основными из которых являются следующие: сложные горно-геологические условия отработки угольных пластов, большая глубина и интенсификация ведения горных работ, недостаточная изученность поведения такой сложной геомеханической системы, какой является высоконапряженный, газонасыщенный углепородный массив, ослабленный системой подземных выработок. Особенно опасными в этом отношении являются так называемые газодинамические явления, реализующиеся в горных выработках в виде внезапных выбросов угля породы и газа. Развитие подобных проявлений горного давления приводит к длительной остановке технологических процессов и, как следствие, к большим материальным и финансовым потерям, а нередко и к гибели трудящихся.

Одним из способов борьбы с газодинамическими явлениями есть разработки эффективных способов их прогноза с тем, чтобы своевременно произвести соответствующие технологические операции, снимающие опасность возникновения чрезвычайных ситуаций. Таким образом, совершенствование способа прогноза ГДЯ является сложной научной и технической задачей, имеющей важное социальное и народнохозяйственное значение. Решению этой части проблемы газодинамических явлений в угольных шахтах и посвящается настоящая монография.

РАЗДЕЛ 1

ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

1.1. Современное состояние угольной промышленности Украины

Угольная промышленность Украины является одной из базовых отраслей народного хозяйства, которая поставляет свою продукцию для нужд электроэнергетики (почти 38% от общего объема поставок), коксохимического производства (22%), населения (11%), коммунально-бытовых (3%) и других потребителей (26%). Для Украины добыча угля имеет приоритетное значение – его доля в общем топливно-энергетическом балансе страны составляет около 25% (в пересчете на условное топливо).

В структуре запасов органического топлива в Украине доля угля составляет 95,4 %, нефти – 2 %, природного газа – 2,6 %. Учитывая ограниченные запасы нефти и природного газа и большие объемы экспорта этих минеральных ресурсов, уголь для Украины является не только фундаментом экономической стабильности, но и залогом политической независимости.

Балансовые запасы угля в стране составляют 8703,5 млн. т, промышленные – 6500,8 млн. т, на долю которых приходится 46, на долю коксующихся – 54 %. При годовом потреблении угля в 100 млн. т только промышленных запасов хватит на 65 лет. При этом общие разведанные запасы угля в Украине в 18 раз больше и составляют 117 млрд. т. Таким образом, уголь в Украине представляет собой перспективный стратегический ресурс, способный удовлетворить все потребности государства в углеводородном топливе.

В течение последних 15 лет подавляющее число шахт находится в затяжном экономическом кризисе (рис. 1.1) и в короткие сроки при любых вариантах реформирования отрасли его преодолеть невозможно из-за высокой инерционности, капиталоемкости и длительных сроков, необходимых для освоения средств на расширенное воспроизводство [1].

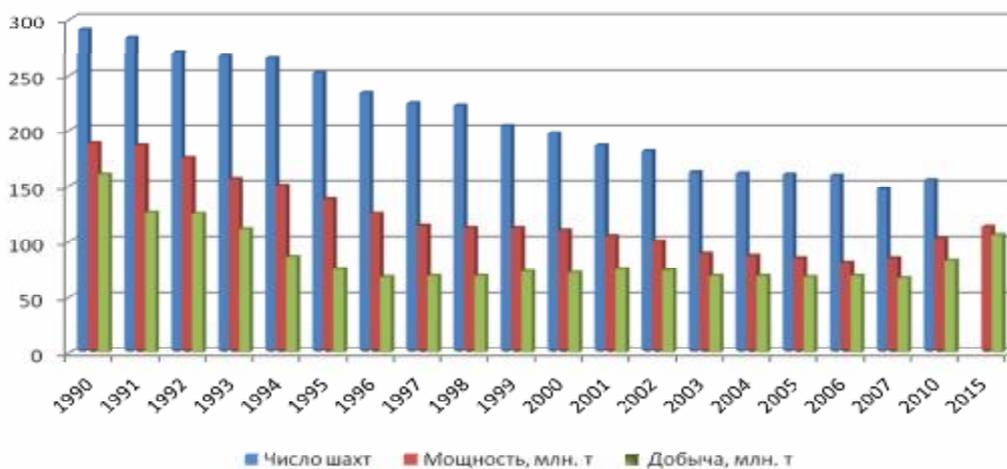


Рис. 1.1. Динамика изменения производственного потенциала шахт Украины, включая прогноз на 2015 г

В настоящее время потребность Украины в угле (см. рис. 1.1) составляет 110-120 млн. тонн [2]. «Энергетической стратегией на период до 2030 года» предусматривается увеличение потребления угля до 130 млн.т – почти в 2 раза больше добычи 2005 года (65,9 млн. т). Наибольший прирост этого показателя (+ 21,1 %) будет наблюдаться в 2021-2030 г.г. [3].

Для эффективного развития угольной отрасли программой правительства намечены к реализации следующие направления:

1. Повышение роли угольной промышленности в обеспечении энергетической безопасности государства и содействие развитию металлургического комплекса.
2. Реформирование отношений собственности предприятий угольной промышленности и создание эффективной системы ее управления.
3. Создание цивилизованного рынка угольной продукции.
4. Финансовое оздоровление предприятий угольной промышленности.
5. Решение социальных и экологических проблем, создание условий для безопасного труда.

Для достижения стратегической цели долгосрочная государственная политика развития угольной промышленности предусматривает три этапа, кото-

рые разделяются на ближнюю (2006-2010 гг.), среднесрочную (2011-2015 гг.) и дальнюю (2016-2030 гг.) перспективы [4-6].

На первом этапе ключевым аспектом должно было быть комплексное решение проблемы развития шахтного фонда, что предусматривало его воспроизводство на современной технико-технологической основе и дальнейшее разгосударствление. Объем добычи угля по базовому сценарию прогнозировалось увеличить в 2010 г. до 90,9 млн.т, а производственные мощности – до 105,8 млн. т в год.

Для предотвращения дальнейшего спада производственных мощностей угольных шахт Кабинетом Министров Украины было принято решение в ближайшее время ввести в эксплуатацию новые шахты «Червоноградская № 3», «Краснолиманская-Глубокая», «Новосветловская» общей проектной мощностью – 10,2 млн. тонн угля в год при суммарных промышленных запасах – 500 млн. тонн. Следует учитывать, что на создание производственных мощностей на новых горных отводах требуется не только значительное время (5-7 и более лет), но и несравненно большие затраты. Поэтому поддержать необходимый потенциал в этот период можно лишь реформируя уже имеющиеся предприятия [1, 2].

К сожалению, из-за недостаточного финансирования угольной промышленности на первом этапе он выполнен в неполном объеме.

На втором этапе прогнозируется в 2015 г. достичь объема угледобычи на уровне 110,3 млн. т при наличии производственных мощностей 122,5 млн. т в год. Это позволит удовлетворить спрос отечественных потребителей на энергетический уголь и повысить уровень обеспечения коксующимся до 82,6%.

Третий этап рассматривается как долгосрочная перспектива. С учетом положительной динамики объем добычи угля планируется увеличить до 130 млн. т. Учитывая возрастание потребления угля тепловой электроэнергетикой в 2030 г. по сравнению с 2015 г. на 39%, потребность национальной экономики в энергетическом угле будет обеспечена на 97,1 %, а в коксующемся – на 72,6 %.

Производственные мощности на конец рассматриваемого периода должны вырасти до 144,4 млн. т в год с коэффициентом использования 90%. Это требует реконструкции действующих предприятий с приростом мощностей, а также строительства новых шахт на разведанных участках месторождений с благоприятными горно-геологическими условиями, которое начнется после 2010 г.

Важным направлением в стабилизации топливно-энергетического баланса Украины может стать использование бурого угля, и не только в теплоэнергетике, но и как альтернативный источник углеводородного сырья для получения ценных химических продуктов [7-10]. По оценкам специалистов, в ближайшей перспективе уголь будет компенсировать снижение добычи нефти и газа, и являться дополнительным источником получения ценных химических продуктов.

Украина имеет значительные запасы бурых углей, сапропитов, торфа, горючих сланцев, хотя в настоящее время в топливном балансе страны почти исключительно задействован только каменный уголь.

По общим оценкам запасы полубитуминозного и бурого угля в недрах Украины – составляют 18 млрд. т. Сосредоточены они, в основном, в Днепропетровском бассейне, а также в Прикарпатье и Закарпатье [7].

Бурые угли наиболее пригодны для получения жидкого топлива в больших объемах. Если нефть будет дорожать в дальнейшем такими же темпами, как и сейчас, то уже через 5-6 лет производство жидких топлив из углей может стать рентабельным. По оценке авторов работы [7], в Украине переработка бурых углей будет рентабельна при цене газа \$200-250 за 1000 м³. При недостатке собственных ресурсов нефти и газа комплексная переработка углей значительно снизит их импорт. В [7] подчеркивается необходимость разработки программы добычи и рационального использования всех видов твердых горючих ископаемых на основе их комплексной переработки по современным технологиям.

Угольные шахты в Украине отличаются высоким уровнем травматизма. Каждый миллион тонн добытого угля сегодня достаётся стране ценой более,

чем в две шахтерские жизни, как видно на рис. 1.2. Такая ситуация складывается сегодня даже при сокращении объемов добычи угля и количества лав, уменьшении нагрузки на очистные забои по газовому фактору.

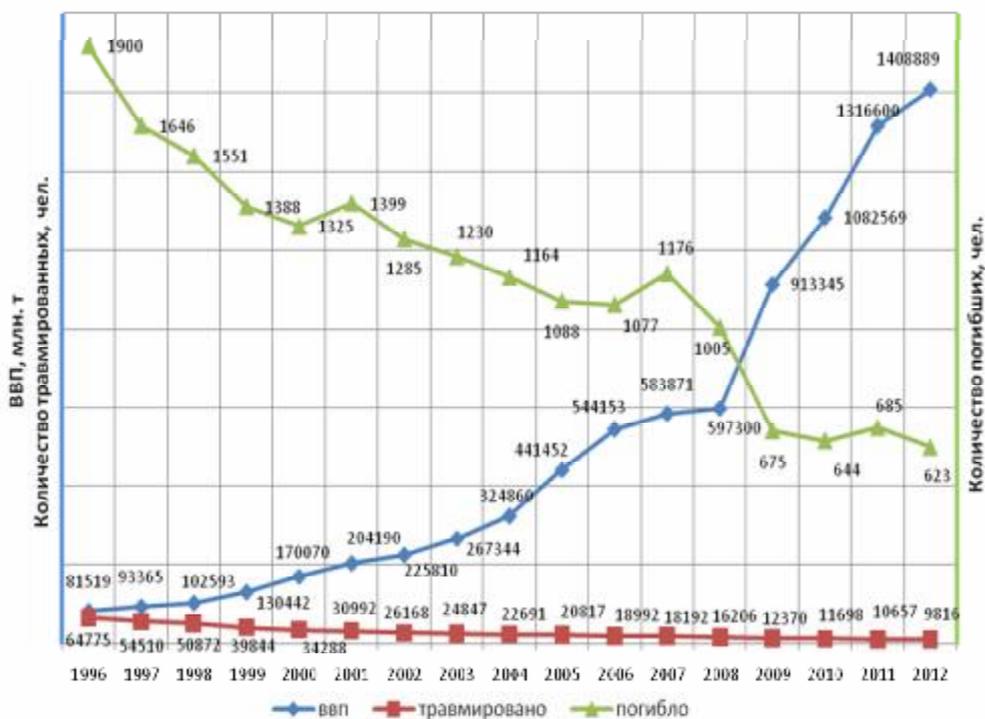


Рис. 1.2. Динамика валового внутреннего продукта и производственного травматизма

Из года в год больше всего горняков гибнет от обрушения угля и кровли рис. 1.3 (24 % от всех подземных) при эксплуатации подземного транспорта (18 %), выбросов угля и газа (14 %), при эксплуатации машин и механизмов (10 %), взрывов газа (8 %), умерло от сердечно-сосудистых заболеваний (18 %).

Причины, лежащие в основе такой ситуации можно разделить на объективные и субъективные. Объективные причины состоят в следующем:

- самые сложные в мире горно-геологические и горнотехнические условия разработки угольных пластов;
- большая глубина ведения горных работ;
- изношенность основных фондов достигла более 70 %; более половины шахт работают без реконструкции свыше 50 лет, имеют сложные протяженные вентиляционные сети и многоступенчатый подземный транспорт.

Так, в настоящее время средняя глубина ведения горных работ на шахтах Донбасса превысила 750 м, и ежегодно этот уровень снижается ещё на 10-15 м.

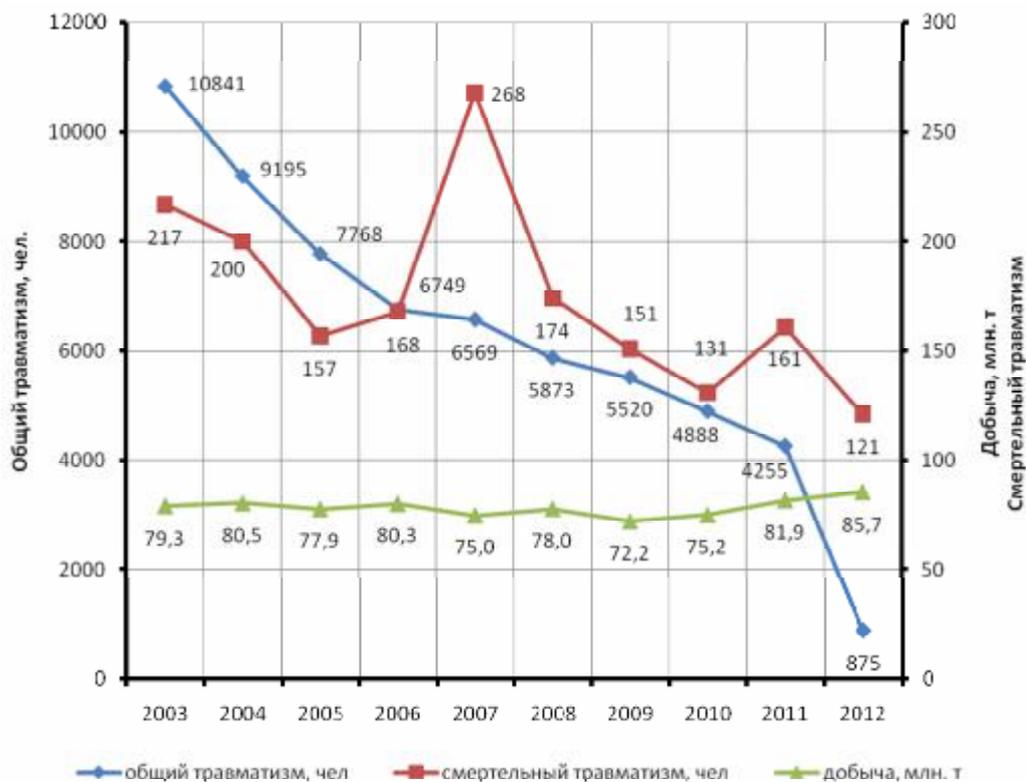


Рис. 1.3. Общий и смертельный травматизм в угольной промышленности Украины

Шахты, добывающие большую часть угля в отрасли, ведут горные работы на отметках 950-1000 м. Более 20 шахт ведут горные работы на глубинах 1000-1300 м. Ведение горных работ на больших глубинах в предельно напряженном горном массиве, наличие горно-геологических нарушений приводит к возникновению целого ряда проблем, осложняющих условия разработки. Связаны они, как правило, с интенсивным газовыделением, внезапными выбросами угля, пород и газа, самовозгоранием угля, суфлярами, внезапными обрушениями, внезапным отжимом угля и другими явлениями.

Субъективные причины связаны со следующими факторами:

-
- низкая эффективность функционирования на шахтах системы управления охраной труда и нарядной системы, отсутствие рычагов экономического стимулирования безопасной работы горняков;
 - большая текучесть кадров, частая смена руководства шахт и участков, несвоевременное и некачественное их обучение;
 - неудовлетворительный уровень производственной и трудовой дисциплины работников, низкая культура производства, отсутствие надлежащего контроля со стороны должностных лиц за соблюдением паспортов крепления и технологических паспортов ведения работ согласно требованиям нормативных актов по промышленной безопасности.

Весь комплекс этих вопросов и влияет на уровень промышленной безопасности в угольной отрасли. На сегодняшний день при общей тенденции снижения травматизма за последние 10 лет он остается один из самых высоких. Каждый пятый погибший в Украине, к сожалению, шахтер.

Одним из наиболее катастрофических проявлений горного давления в угольных шахтах, приводящих к гибели горняков, являются газодинамические и динамические явления. Очень часто они сопровождаются взрывами метано-воздушной смеси и угольной пыли. Украинские, российские, китайские шахты являются наиболее опасными в этом отношении. Безопасная их эксплуатация, сопровождающаяся комплексным использованием недр, является крупной научно-технической проблемой.

Так, к началу 2013 г. горные работы на пластах, склонных к газодинамическим явлениям, велись на 57 шахтах, из них на 18 шахтах разрабатывались только опасные, на 23 – опасные и угрожаемые и на 16 – только угрожаемые по ГДЯ пласты. Причем, на 69 шахтопласте, опасном по ГДЯ (внезапным выбросам угля и газа, внезапным выдавливаниям угля и внезапным обрушениям), в течение 2012 года проводились 85 очистных и 164 подготовительных выработки, а на 77 угрожаемых – 97 очистных и 238 подготовительных выработки. Всего на 146, склонных к ГДЯ шахтопластах, в работе находились 182 очистные и 402 подготовительных и нарезных выработок.

На опасных по ГДЯ шахтопластах в 2012 г. добыто 11,7 млн. т угля и пройдено 39,3 км подготовительных и нарезных (монтажных) выработок, а на угрожаемых шахтопластах – 15,0 млн. т угля и 65,5 км выработок. Всего на склонных к ГДЯ шахтопластах Украинского Донбасса за этот период добыто 27,2 млн. т угля и пройдено 104,8 км подготовительных выработок.

В сравнении с началом анализируемого периода (2003-2012 гг.) в 2012 г. произошло некоторое сокращение объемов ведения горных работ на пластах, склонных к ГДЯ: количества шахт на 5 %; шахтопластов, склонных к ГДЯ, на 19 %, из них опасных на 21 %, угрожаемых на 18 %;

Сведения о газодинамических явлениях, произошедших на шахтах Донбасса за этот период, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Сведения о газодинамических явлениях, произошедших
в период 2000-2012 г.г.

Годы	Внезапные выбросы, выдавливания и обрушения угля	Выбросы угля и газа при БВР в режиме СВ	Выбросы при дистанции	Выбросы при вскрытии пластов	Выбросы породы при БВР в режиме СВ	Всего ГДЯ
2000	10	71	18	-	14	113
2001	11	68	20	1	26	126
2002	11	94	17	-	7	129
2003	5	54	14	1	15	89
2004	3	34	17	1	16	71
2005	4	27	6	-	12	49
2006	4	30	1	-	24	59
2007	6	29	-	-	26	62
2008	4	32	-	-	14	50
2009	4	35	-	-	5	44
2010	5	40	2	-	8	56
2011	1	21	-	-	7	29
2012	1	34	-	-	10	45

Из табл. 1.1 следует, что за последнее десятилетие общее число газодинамических явлений на шахтах Донбасса уменьшилось почти в 3 раза. Это обу-

словлено указанным сокращением за последние годы количества шахт, разрабатываемых на них выбросоопасных шахтопластов и числа очистных и подготовительных забоев.

В целом, в 2012 г. на шахтах Украинского Донбасса было зарегистрировано 51 ГДЯ, и лишь 1 внезапное выдавливание угля (шахта Комсомолец Донбасса), при которых не было травмировано ни одного человека. В январе 2013 года на шахте Комсомолец Донбасса произошел внезапный выброс при выемке угля комбайном в тупиковом забое, при котором смертельно травмировано три человека; на Шахтоуправлении Покровское при аналогичной аварии погиб один человек; в апреле 2013 года на шахте Чайкино ГП «Макеевуголь» также при внезапном выбросе угля и газа в тупиковом забое смертельно травмировано три человека. Отсюда следует, что несмотря на устойчивое снижение за последние 10 лет числа газодинамических явлений, доля смертельного травматизма по-прежнему высока.

Так, из 69 ГДЯ, произошедших за рассматриваемый период в очистных и подготовительных выработках при ручном и механизированном воздействии на угольный забой (кроме дистанционного управления машинами и механизмами), в 32 случаях (46,4 %) произошло смертельное травмирование работающих.

На рис. 1.4. представлено распределение по годам числа газодинамических явлений со смертельным травматизмом и относительного числа смертельно травмированных шахтеров на 1 млн. т добытого угля с выбросоопасных пластов.

Из представленных на рисунке данных следует, что в последний период времени характеризуется ростом, в среднем, в 1,6 раза относительного травматизма шахтеров по сравнению с положительной тенденцией снижения его с 2001 г. по 2006 г. Данная негативная картина обусловлена крупными авариями на угледобывающих предприятиях с большим числом пострадавших.

Отдельной частью этой проблемы безопасности в угольных шахтах является современный и надежный прогноз газодинамических явлений (ГДЯ) и раз-

работка технологий безопасности отработки выбросоопасных угольных пластов.

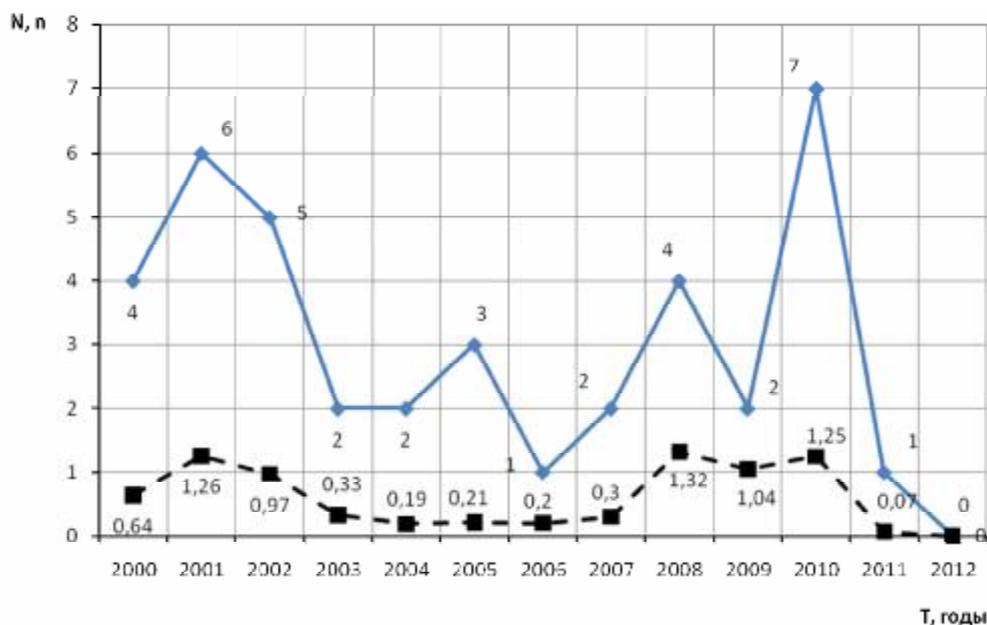


Рис. 1.4. Изменение числа ГДЯ (N) со смертельным травматизмом (1) и относительного числа смертельно травмированных работающих (n) на 1 млн.т добычи угля (2) по годам (T)

1.2. Исторический аспект проблемы газодинамических явлений в угольных шахтах

Выбросы твердых полезных ископаемых и вмещающих их пород были и остаются одним из самых опасных явлений, имеющие место при ведении горных работ для жизни подземных рабочих.

Ниже рассмотрены наиболее мощные газодинамические явления, произошедшие на угольных шахтах. Анализ последствий реализации ГДЯ помогает понять причины, лежащие в основе этих исследований

Сила их проявлений может быть такой, что это ведет к полной ликвидации предприятия. Таким, например, является внезапный выброс угля и газа, произошедший 3.12.59 г на шахте «Ключи 1-3» Егоршинского месторождения (Урал). Он произошел при пресечении квершлагом угольного пласта № 11, мощностью 16 м на глубине 370 м от поверхности. В момент выброса была опрокинута вентиляционная струя в шахте. В результате этого у устья ствола в

надшахтном здании образовалась повышенная концентрация метана, что, в конечном счете, привело к нескольким взрывам в нем газа. Рассматриваемый выброс угля и газа на шахте «Ключи 1-3» повлек за собой столь катастрофические последствия, что шахту пришлось закрыть [11]. Такая же катастрофа с подобными тяжелыми последствиями произошла и в Украине в 2008 г. на шахте им. Карла Маркса ПО «Орджоникидзеуголь».

Первый официально зарегистрированный внезапный выброс угля и газа произошел в 1834 г на шахте «Исаак» в бассейне Луары во Франции. В Бельгии появление внезапных выбросов относится к 1847 г [12, 13]. К концу 19 века число выбросов в одном только бассейне Гар (Южная Африка) превзошло 2000; выбросы были зафиксированы в Германии (бассейн Рура и Нижней Силезии), Англии (Южный Уэльс), Венгрии и Канаде. В технической литературе данная проблема стала рассматриваться в 80-х годах 19-го столетия, после сильного внезапного выброса 10 апреля 1979 г. на шахте «Агрипп» № 2 (Бельгия). Печальную известность эта авария приобрела тем, что в результате выброса 420 т угля, 2000 м³ метана погиб 121 человек. Выброс на шахте «Агрипп» привлек внимание мировой инженерной и научной общественности, и послужил толчком для начала фундаментальных исследований в области этих природных явлений [12].

Первый внезапный выброс угля и газа, зарегистрированный в Донбассе, произошел 9.09.06 г в шахте «Новая Смолянка» на горизонте 706 м при вскрытии пласта h₇ «Смоляниновский» квершлагом, проводимого с помощью буровзрывных работ. Этот выброс был описан в книге пионера горноспасательного дела России Н.Н. Черницына (Рудничный газ. Условия его выделения, его свойства и меры борьбы.- Петроград, 1917 г), вышедшей из печати за несколько дней до трагической гибели автора во время горноспасательных работ на шахте №1 (г. Горловка) [14].

До настоящего времени на угольных шахтах Украины зарегистрировано более 11 тысяч выбросов. При этом, следует отметить, что только за период 1951-2005 гг на шахтах Донецкой и Луганской областей зарегистрировано 7230

выбросов угля и газа, из которых внезапных 7230 (22%), при сотрясательном взрывании 4927 (68%) и при дистанционном управлении машинами и механизмами 713 (10 %) [11, 14]. О большой опасности выбросов угля и породы для угледобывающих предприятий свидетельствует статистика гибели горнорабочих в шахтах Донбасса. Так, например, за период с 1971 года по 1980 год на шахтах Донбасса при выбросах угля погибло 259 человек [11]. Если к условно мощным газодинамическим явлениям относить выбросы угля, породы и газа с интенсивностью более 1 тыс. т., то таких явлений на угольных шахтах Донбасса зарегистрировано 44, среди которых 35 выбросов угля и газа и 9 – породы и газа [11]. При этом, необходимо иметь в виду, что довоенная статистика неполная в связи с тем, что архивы по выбросам были частично уничтожены, а затем по возможности восстановлены.

Самый крупный выброс угля и газа в мировой практике при подземной разработке угольных пластов подземным произошел в Донбассе на шахте им. Ю.А. Гагарина ПО «Артемуголь» при вскрытии квершлагом угольного пласта 1_3 «Мазурка» на горизонте 710 м. При этом было выброшено 14 тыс. т угля и выделилось по различным данным от 7500 до 250 тыс. м^3 метана [11, 15]. Шахта вела эксплуатационные работы на горизонте 591 м и одновременно подготавливала новый горизонт 710 м. Вскрытие пластов осуществлялось двумя параллельными квершлагами: главным и вспомогательным при расстоянии между ними 25 м. Вблизи места пересечения пласта 1_3 на гор. 710 м был расположен ряд тектонических нарушений. Ближайшее встреченное нарушение пройдено в 45 м от пласта - одна из апофиз Чегарского надвига с горизонтальной амплитудой смещения 3 м. Давление газа в угольном массиве пласта Мазурка, измеренное на гор. 710 м при вскрытии его забоем главного квершлага, составляло 5 МПа. Главный квершлаг с сечением в проходке $16,9 \text{ м}^2$ был остановлен на расстоянии 5 м от пласта по нормали для предварительного снижения давления газа путем увлажнения угольного массива в зоне вскрытия. Давление газа снизить до величины менее 1 МПа не удалось, поэтому вскрытие пласта прово-

дили с применением дополнительных мероприятий, в частности, применения двухрядной металлической каркасной крепи и компенсационной скважиной.

Пласт I_3 был вскрыт из главного квершлага с применением сотрясательного взрывания, производимого с поверхности шахты. Мощность пласта в месте этого выброса угля равнялась 1,03 м, угол падения - 67° . В момент проведения сотрясательного взрывания произошел выброс угля и газа в результате которого главный и вспомогательный квершлаг горизонты 710 м были заполнены измельченным углем на расстояние, соответственно 550 и 330 м (рис. 1.5).

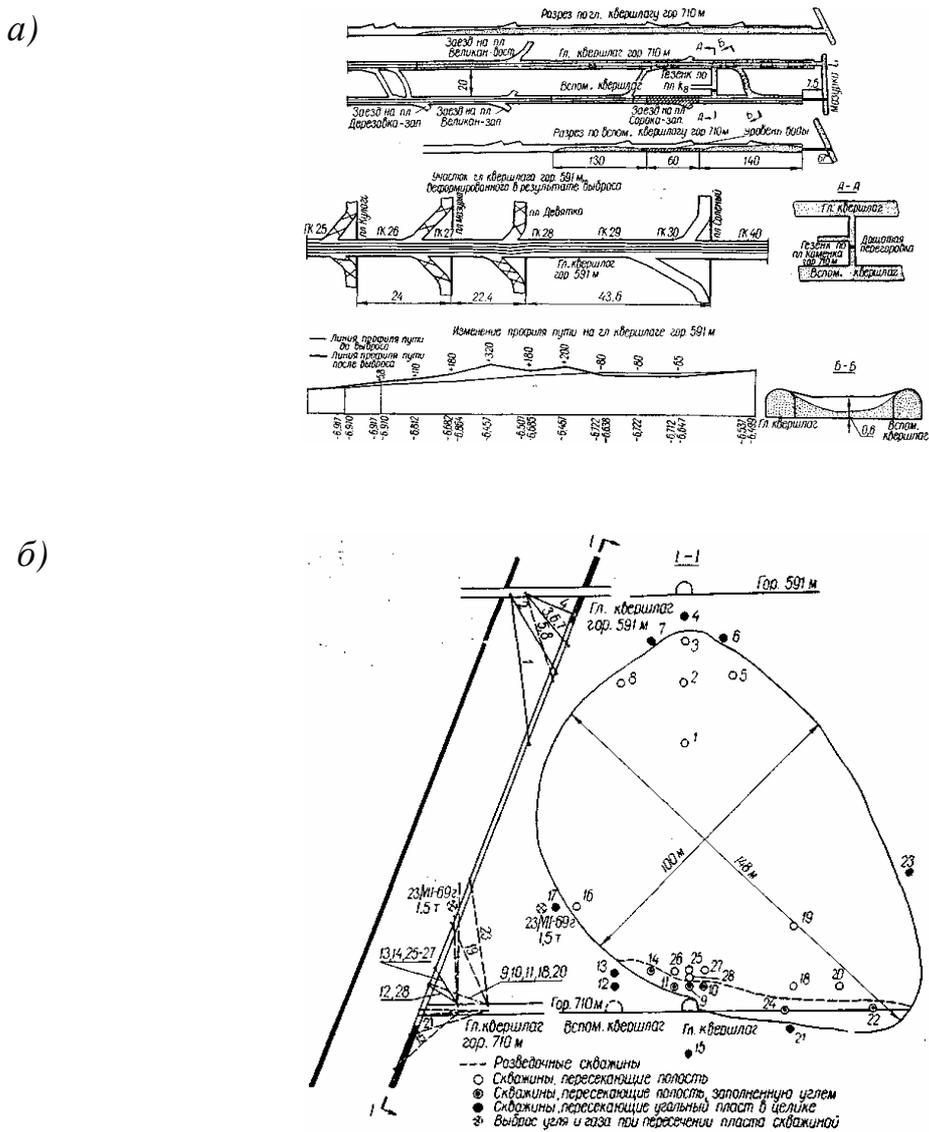


Рис. 1.5. Последствия внезапного выброса угля на шахте им. Ю.А. Гагарина ПО “Артемуголь” на пласте I_3 “Мазурка”: а) последствия; б) полость выброса

Выброшенный уголь в основном представлял собой штыб, покрытый бархатистой пылью, местами бурого оттенка. Там же находились куски непрочно-го угля, которые легко разрушались, а также куски породы и бетонной крепи. Над насыпным углем было свободное пространство размером 0,3-0,7 м [15].

Наиболее крупный выброс угля и газа на пологих пластах с тяжелыми последствиями произошел 26.06.80 г на шахте им. А.А. Скочинского в 3-й восточной лаве центральной панели пласта h_6^1 “Смоляниновский”. Лавы в которой произошел выброс, отработывала пласт h_6^1 на глубине 1056 м, была длиной 188 м, оборудована механизированным комплексом К1МКС со стругом 1УСБ 67. Вслед за лавой проводились конвейерный и вентиляционный штреки площадью сечения $17,6 \text{ м}^2$ и $13,8 \text{ м}^2$. Конвейерный штрек охраняется бутовой полосой шириной 28 м, ниже которой выкладывается чураковая стенка, вентиляционный — бутовой полосой шириной 30 м. На концевых участках лавы имеются две ниши длиной до 8 м и глубиной до 4 м. Уголь в нишах вынимался сотрясательным взрыванием. В момент аварии лавы находилась от разрезной печи на расстоянии, примерно равном двум длинам очистного забоя. Выброс развивался по двум направлениям с образованием двух самостоятельных полостей. При выбросе было разрушено 2,2 тыс. т угля и выделилось 130 тыс. м^3 метана. При этом было засыпано углем $2/3$ лавы и 14 м вентиляционного штрека. Под углем оказалось 7 человек горнорабочих, все они погибли. Еще пострадало четыре человека [11, 16].

Пласт h_6^1 относится к особовыбросоопасным и склонен к самовозгоранию, мощностью 1,2- 1,8 м и углом падения $8-10^\circ$, имел сложное строение. Верхняя пачка — уголь блестящий (мощность 0,05-0,1 м), затем размещался прослой углистого сланца (0,05 — 0,14 м) и нижняя пачка — уголь блестящий (1,15-1,56 м). Крепость угля $f=1-1,5$, природная газоносность пласта составляла 22-23 $\text{м}^3/\text{т}$ г. м., выход летучих веществ 30%; давление газа в пласте 11,6 МПа. Непосредственная кровля — глинистый сланец (2-2.6 м), основная — песчаный сланец (8-13 м), выше - песчаник выбросоопасный (6 м), песчаный сланец

(2,5 м), песчаник (4,2 м); почва — песчаный сланец (0,55 м), основная — крепкий выбросоопасный песчаник (40-60 м).

Осмотр места аварии (рис. 1.6) показал, что в 93 м от конвейерного штрека начинался откос выброшенной угольной пыли и мелочи, которыми засыпано также выработанное пространство.

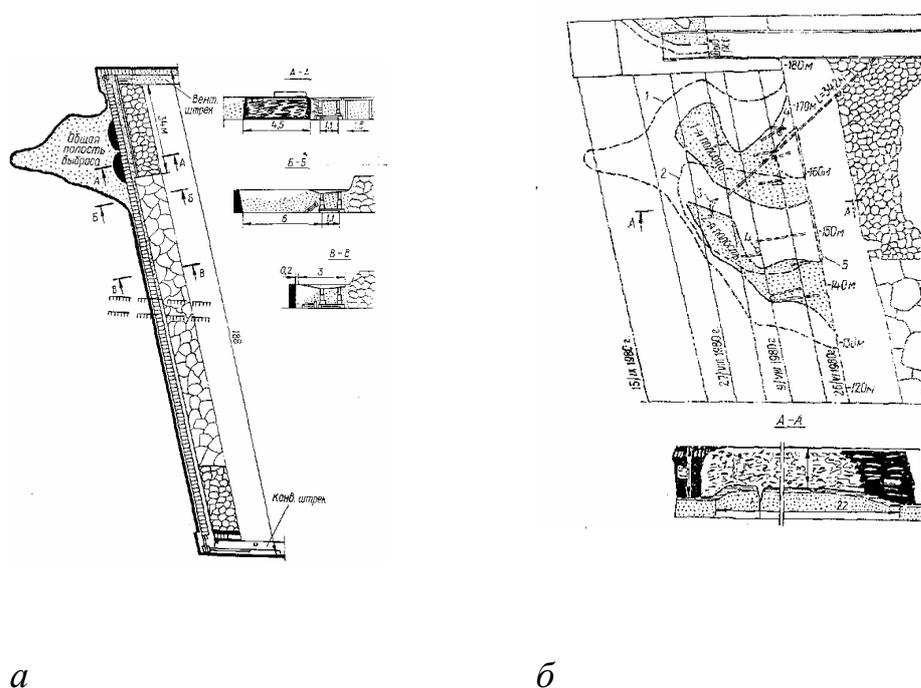


Рис. 1.6. Внезапный выброс угля и газа, произошедший на шахте им. А.А. Скочинского: а - общий вид; б - полость внезапного выброса угля и газа;

1 - контур угольного массива, разрушенного выбросом; 2 - контур поднятия почвы; 3 - газовыделяющая трещина в почве; 4 - очаг пожара; 5 - выдвинутый массив угля

Полость выброса напротив 128-й секции (136 м) уходила по простиранию пласта на глубину свыше 30 м. Было выдавлено два целика угля максимальной шириной 4-5 м и длиной 25 м в рабочее пространство лавы на 1 м. Выдавленный уголь сохранил строение пласта, был дегазирован и уплотнен, однако верхняя пачка была разрушена выбросом. Конвейер лавы, начиная со 134-й секции, отодвинут и опрокинут, решетки развернуты вертикально и вдавлены под перекрытие секции. Отдельные стойки крепи наклонены или посажены “нажестко”. Струг находится на 142-й секции. В интервале 139-155-й секций

имелся вывал пород кровли до 0,4 м, шириной 0,3-1 м. На участке 82-89-й секций наблюдалась зона геологического нарушения, представленная четырьмя тектоническими трещинами в породах кровли. По всей длине призабойного пространства лавы наблюдалось пучение пород почвы пласта на 0,05 м. На конвейерном штреке, отмечена деформация элементов арочной крепи, а также пучение почвы. На рамках крепления вентиляционного штрека наблюдалась просадка крепи на 4-5 см.

Опрос свидетелей и осмотр лавы после ее расчистки показали, что выброс произошел через 3-5 мин после остановки струга в момент передвижки крепи в районе вывала пород кровли, причем струг по выемке угля всего работал 2,5- 3 ч при скорости подвигания очистного забоя в этой части лавы 0,4-0,5 м/ч. Забой верхней ниши опережал забой нижней ниши на 33 м.

В процессе перехода полости установлено, что общая площадь разрушенного выбросом угольного массива составляла около 1100 м², при этом разрушенный массив имел сложную конфигурацию и состоял из двух самостоятельных полостей выбросов, разделенных целиком углем, который был раздавлен, но в основном сохранил свою структуру за исключением верхней пачки, которая была разрушена. Первая полость выброса площадью 217 м² имела два выхода в лаву, разделенных выдвинутым и раздавленным массивом угля; площадь второй полости - 166 м²; общая площадь угольного пласта, разрушенного вокруг полостей 728 м².

В очистном забое произошли деформации почвы, выразившиеся в ее поднятии на 15- 20 см на площади 314 м² в центре выброса. В середине поднятого массива почвы имелась рваная трещина длиной до 2 м и шириной 30 см, края которой покрыты налетом цвета ржавчины, из которой выделялся метан. Через 2 месяца после аварии концентрация метана в районе устья была более 6% [16].

При проведении подготовительных выработок наиболее мощный из зарегистрированных в Донбассе выбросов угля и газа, произошел на шахте №3 ш/у "Александровская" ПО "Орджоникидзеуголь". Внезапный выброс произо-

шел 26.10.74 г при проведении откаточного штрека по пласту m_3 “Тонкий” на горизонте 440 м в момент завершения работ по выемке угля отбойным молотком, при этом было разрушено 2700 т угля, а расчетное количество выделившегося метана составило около 30 тыс. m^3 . Выброшенным углем штрек был засыпан на 152 м, из которых 72 м на полное сечение. Полость образованная произошедшим выбросом находилась ниже подошвы штрека, а выброшенный в штрек уголь в количестве 1200 т представлял собой тонкоизмельченную массу с наличием кусков угля и породы различной крупности [17]. При этом пласт m_3 разрабатывался под защитой угольного пропластка m_4^0 средней мощностью 0,27 м, которая оказалась, наряду с влиянием опорного целика на пласте m_5 , неэффективной.

Крупнейший выброс угля и газа произошел 23.05.08 г. при проведении выработок на шахте ГП «УК «Краснолиманская». Этот выброс угля и газа произошел при прохождении вентиляционного ходка 2-й западной лавы пласта l_3 . Угольный пласт l_3 полезной мощностью в пределах шахтного поля 1,22-2,5 м, марка угля “Г”, причем пласт до аварии относился к категории угрожаемых по внезапным выбросам угля и газа. На участке, где произошла авария, имели место Грачевский и Глубокоярский сбросы, а также густая сеть тектонических нарушений и зон мелкоамплитудной нарушенности. Выработка проходила комбайном КСП-32 на глубине 790 м. При расследовании аварии было установлено, что в процессе газодинамического явления было разрушено более 2,5 тыс. m^3 горной массы (в том числе угля -2 тыс. m^3) и выделилось в течение первых суток 55 тыс. m^3 метана. При этом разрушенная горная масса располагалась на расстоянии порядка 220 м от забоя.

Во второй половине 20-го века на строящихся и находящихся в эксплуатации глубоких шахтах Донбасса при прохождении полевых выработок начали происходить выбросы пород. Впервые они были зафиксированы на глубине 750- 800 м от поверхности, причем только некоторые из них носили характер типичного выброса, т.е. с отбросом породы от забоя и расположением ее под углом меньшим естественного откоса, а также образованием

полости в породном массиве. Остальные же явления, происшедшие главным образом при проходке стволов шахт, проявлялись в виде внезапного разрушения и поднятия пород в забоях [11, 18-21].

Необходимо отметить, что, как правило, выбросам породы предшествовали предупредительные признаки в виде гула в породном массиве, выбрасывания породной мелочи при бурении шпуров или скважин. Однако следует иметь в виду, что эти признаки однозначно можно считать лишь ориентировочными, а не абсолютными. Не исключены также при ведении горных работ «запоздалые» выбросы, которые реализуются через несколько минут или даже часов после отбойки части горного массива взрыванием. Так, например, на шахте № 4 – 21 ПО «Донецкуголь» в 17-м квершлагае выброс породы небольшой интенсивности произошел через 15 минут после взрывания шпуров [11].

Интенсивность выбросов песчаников в Донбассе бывает самая различная от нескольких килограммов до нескольких десятков и даже тысяч тонн. Например, выброс песчаника, произошедший в 1962 году во 2-м южном квершлагае шахты «Щегловская-Глубокая» (им. Поченкова) ПО «Донецкуголь», имел мощность 2 тыс. тонн. При осмотре выработки после выброса было установлено, что квершлаг на протяжении 10 м был засыпан измельченной выбросом породой на полное сечение, а дальше порода на протяжении 27 м расположилась откосом. Постоянная крепь рамы из двутавровых балок № 22 у забоя выработки к моменту выброса забетонированные до половины выработки, оказалась полностью разрушенной.

Проведенный анализ показал, что выброшенная из массива порода представляет собой мелкие кусочки в виде пластинок, а иногда в виде гранулированного шлака и песка вперемешку с пластинками размером 3-5 см и толщиной до 3 мм. Среди породной мелочи встречаются куски размером до 50 см и более, причем располагаются они обычно в начале породного откоса. Установлено, что эти куски образовались в результате разрушения призабойной части породного массива, которая была наиболее разгруженной от

напряжений пород перед выбросом. Типичный же гранулометрический состав породы после выброса, определенный для проб весом 1000 кг, представлен в табл. 1.2.[11].

Таблица 1.2

Гранулометрический состав фракций породы при выбросе

Гранулометрический состав % фракций породы, мм											
0	40	30	22	15	8,5	6	4	2,5	1,5	0,75	0,5
22,6	119,0	82,5	134,9	168,5	111,6	85,0	85,5	41,6	50,5	19,0	79,2

Самым крупным выбросом песчаника в мировой практике проходки горных выработок является выброс, который произошел в скиповом стволе шахты «Сланы» (Чехия) при его проходке с помощью БВР на глубине 865 м от поверхности. При этом выбросе песчаника вертикальный ствол, имеющий диаметр 9,9 м вчерне был полностью засыпан породой до отметки 790 м, т.е. на 66 м. По ориентировочным подсчетам всего было выброшено в ствол 11-12 тыс. тонн измельченного песчаника и по таким же расчетам около 10000 м³ углекислого газа (СО₂) [12, 13].

Рассматривая крупные явления нельзя не упомянуть о выбросе калийной соли, который произошел 7.07.53 г. на шахте Менценграбен район Верра (бывшая ГДР). Рабочие при отбойке калийной соли взрывом находились на поверхности шахты. Во время взрыва ВВ из горного массива было выброшено 100000 т калийной соли и несколько сотен тысяч кубометров газа (СО₂) [13]. Так как в подземных выработках не могло поместиться такое количество газа, он с шумом вытекал из обоих шахтных стволов глубиной 520 м примерно в течение 25 мин. Разрушения выработок были катастрофическими к распространению даже на соседнюю шахту. На шахте Менценграбен была полностью нарушена вентиляция шахты и на 90% разрушено оборудование нового ствола, выведены из строя кабель и тросы. В самой выработке были выведены из строя 40 вагонеток, несколько километров рельсовых путей и кабеля, две системы

бесконтактного провода, 3 электровоза, несколько вентиляторов и другие вентиляционные сооружения.

При рассмотрении крупных газодинамических явлений необходимо остановиться и на горных ударах. Горные удары являются другим, несколько менее распространенным, но более мощным и позднее зафиксированным в историческом плане, динамическим явлением. Первые имеющиеся у нас сведения об этом явлении были получены с оловянных рудников Англии еще в первой половине 18 века [12]. Для общего представления об этом явлении приведем такие данные, что на некоторых соляных шахтах разрушениями охватывалась площадь до 1-3 млн. м². Так, 24.05.40 г на шахте «Крюгерсхаль» при горном ударе, проявившемся на площади около 600 тыс. м² было завалено 42 человека. При горном ударе в 1942 г. на шахте «Фритц Хейнрих» погибло 45 рабочих и так далее [22]. На территории СНГ по данному вопросу был наиболее исследован Кизеловский каменноугольный бассейн (Пермская обл., Россия). Так, в период 1954-1955 г на шахтах только этого бассейна происходило до 60-70 горных ударов в год. Как правило, горный удар сопровождался резким звуком, воздушной волной и сотрясением массива. Это сотрясение обычно ощущалось на земной поверхности на расстоянии до 3-10 км. В Кизеле сотрясения горного массива проявлялись, как землетрясение с силой 3-5 баллов, в районе до 5-10 км от очага удара [22]. В последнее время горные удары были отмечены во многих месторождениях разных стран мира. Горный удар по Петухову И.М. – это есть хрупкое разрушение предельно напряженной части пласта угля (породы), прилегающей к горной выработке, возникающее в условиях, когда скорость изменения напряженного состояния в этой части превышает предельную скорость релаксации напряжений в ней. По принципу действия горные удары институтом ВНИМИ (проф. Петухов И.М. и др.) условно разделены на четыре группы: стреляние, толчек, микроудар, собственно горный удар. При этом, существенным отличием физики горного удара, стреляния, пучения и отжима от выбросов является то, что они могут происходить в негазоносных средах за счет реализации энергии горного массива [21]. В принципе при реализации горного

удара на сильногазоносных пластах последний вполне может перерасти в другое газодинамическое явление, в частности в выброс или некоторое промежуточное между ними явление.

Проведенный анализ характеристик крупных газодинамических явлений, произошедших в шахтах, показал, что при их реализации наиболее характерным для них признаком являлась высокая газоносность угольного пласта, возможность притока газа из вмещающих пород, особенно из выбросоопасных песчаников, расположенных в почве или кровли пласта. Это связано с разрядкой напряжений в мощных упругих газонасыщенных породах. При ведении горных работ возникают концентрации напряжений во вмещающих пласт породах, обусловленных горно-геологическими нарушениями, а также дополнительными напряжениями от оставленных целиков, зон ПГД от ранее проведенных выработок и других факторов. Все эти причины создают благоприятные условия для реализации газодинамического явления. В рассматриваемых условиях непосредственным импульсом для развития выброса могло быть сотрясающее взрывание или другое технологическое воздействие. Такое воздействие перераспределяет напряжения в массиве, приводит к динамическому восстановлению деформаций во вмещающих пласт породах и этим вызывает дополнительный удар в напряженных породах, который способствует началу и увеличению масштабов разрушения.

Необходимо отметить, что пласт l_5 в поле шахты «Краснолиманская» являлся угрожаемым, в других местах он также не относился, до известных аварий, к особоопасному. Тем не менее, на нем произошли наиболее крупные выбросы угля и газа. Однако в нем, как в последствии, оказалось, было сконцентрировано огромное количество газа, несмотря на относительно невысокую природную газоносность и опасность пласта.

При этом, несмотря на то, что современные технологические решения по прогнозированию, предотвращению и оценке эффективности борьбы с газодинамическими явлениями достаточно детально изложены в новых Правилах безопасного ведения работ [23], проблема остается достаточно злободневной.

Кроме того, следует иметь в виду, что многие серьезные катастрофы, произошли в последнее время на шахтах, оснащенных современных высокопроизводительной угледобывающей техникой, соответствующей мировому уровню, т.е. в высокопроизводительных забоях. Поэтому, вполне очевидно, учитывая современные экономические требования к угледобыче, следует ожидать существенного роста аварийности при увеличении объемов добычи угля на действующих шахтах. И, к сожалению, в дальнейшем смысловая цепочка оценки проявления опасности, связанной с газом в шахтах будет реализовываться по следующему алгоритму – газодинамические явления с интенсивным газопроявлением – взрыв газа или без такового. Далее идет попытка выявления факторов пояснения “данной случайности” – как проявившейся объективной в конкретной аварии закономерности.

Столь печальный вывод базируется на вполне понятной необходимости выявления и использования новых закономерностей поведения системы «газ-уголь». К сожалению, новым моделям и закономерностям уделяется ничтожно малое внимание, а все основные существующие технологические решения базируются, в основном, на макроуровневой теоретической модели академика А.А. Скочинского, которую, в настоящее время, необходимо корректировать с учетом вновь установленных закономерностей в микросорбционном пространстве угля. Кроме того, учитывая, что рядом институтов ведутся достаточно серьезные исследования в данном направлении, то вполне можно ожидать появления новых подходов и теорий газодинамического состояния углегазового массива. Одна из таких гипотез, разработанных в последнее время, изложена в методологической фундаментальной работе [24]. В ней также приведены теоретические модели, описывающие сорбционные процессы в угольном веществе, обоснован наиболее важный в газодинамике углепородного массива вопрос – всегда ли газонепроницаем уголь, произведен расчет условий, при которых возможна многократная активизация десорбции метана в угле и др. Однако еще много вопросов остается не рассмотренными, но над которыми работают исследователи. То есть, можно надеяться, что в результате обобщения новых дан-

ных будут разработаны новые гипотезы существования углекислого вещества. Последнее является принципиально важным для разработки безопасных технологий, позволяющих реализовать контролируемую дефлюидацию массива при отработке угольных пластов, добыче шахтного газа и в способах предотвращения газодинамических проявлений горного давления.

Кроме того, при ведении горных работ в шахтах на современных глубинах, как отмечалось выше, прослеживается закономерность проявления повышенной газодинамической опасности на угольных пластах даже низкой степени выбросоопасности или угрожаемых, хотя такая опасность в рассматриваемых зонах и редко, но приводит к наиболее мощным ГДЯ, причем они как бы реализуются в несколько стадий. Это также говорит о том, что необходим комплекс исследований по оценке возможности реализации подобных явлений, на пластах, которые, с одной стороны, в целом по отработываемой площади являются неопасными, а с другой, в них имеются на очень и очень малой площади так называемые сверхопасные зоны. При ведении горных работ в таких зонах происходят весьма крупные и практически не ожидаемые выбросы. То есть, используя существующие подходы нельзя корректно и однозначно классифицировать все газодинамические явления, поэтому очевидна необходимость уточнения существующих классификаций путем введения в них дополнительных признаков и, возможно, характеристик новых явлений. Причем, некоторые результаты исследований в этом вопросе уже получены [25, 26].

При разработке новых теорий возникновения ГДЯ следует помнить, что изучению подвергается сложная с точки зрения структуры, газонасыщенная породная среда, находящаяся в условиях высоких сжимающих напряжений. Природа этой высоконапряженно-механической системы – стохастическая, со случайным распределением структурных элементов. Изначально сама система находится в равновесном энергетическом состоянии. Приближающиеся к ней в процессе горных работ выработки нарушают это природное равновесное состояние и в какой-то момент, когда совокупность определяющих факторов достигает критического предела в результате достаточно малого внешнего воздей-

ствия, происходит резкий переход природной механической системы в новое состояние с более низким уровнем потенциальной энергии, сопровождающиеся резким снижением уровня напряжений в массиве, десорбцией газа, увеличением его давления и разрушением вследствие этого структурных элементов угля (пород) и их деструкцией до молекулярного уровня, и выносом тонкоизмельченного вещества вместе с газом в «бутылочное горлышко» - место наименьшее прочного участка массива, примыкающего к подходящей выработке. По сути, это эффект шампанского. В физике такие быстро протекающие явления, сопровождающие перераспределение энергии, получили название потери устойчивости.

Этим объясняется и эффект снижения опасности выброса угля при сотрясательном взрывании или гидроразрыве: разрушение высоконапряженных упругих структурных связей снижает уровень потенциальной энергии в природной механической системе.

Факторов, приводящих углепородный массив в выбросоопасное состояние, так много, что учесть их все в единой детерминированной модели просто невозможно. В такой физической модели можно отразить наиболее влияющие из них, но отнесение самих влияющих факторов к более опасным и менее опасным само по себе является непростой задачей.

В этой связи с точки зрения безопасности на первое место выходит разработки надёжных методов прогноза газодинамических явлений. После решения этой части проблемы, главной становится вторая ее часть – разработка технологий ведения горных работ в условиях возможной реализации ГДЯ.

Учитывая ту неопределенность, которая неизбежно возникает при анализе стохастических систем, основным требованием к системе прогноза ГДЯ является непрерывность зондирования углепородного массива. Из всех имеющихся методов прогноза наиболее удобным в этом отношении является метод прогноза, основанный на непрерывной регистрации акустических сигналов.

Акустический импульс, генерируемый либо работающими механизмами, либо специальными устройствами, пройдя через определенный участок масси-

ва, возвращается на приемное устройство, неся в себе в зашифрованном виде всю информацию об объекте исследования. Вся сложность проблемы состоит в дешифровке этого сигнала, в выборе таких критериев, которые однозначно показали бы возникновение опасной геомеханической ситуации. Настоящие исследования посвящены решению части этой проблемы.

1.3. Влияние глубины и интенсивности отработки угольных пластов на количество газодинамических явлений

Существуют разные мнения по поводу того, как влияет глубина отработки угольных пластов на количество газодинамических явлений. Одни ученые считают, что с глубиной увеличиваются пластические свойства горных пород и вследствие этого количество выбросов угля, породы, газа будет уменьшаться. Другие считают, что с увеличением уровня напряжений, действующих в углепородном массиве, количество катастрофических проявлений горного давления будет возрастать. В этой связи представляется полезным проанализировать ситуацию, используя статистический анализ произошедших ГДЯ,

С увеличением глубины и интенсивности разработки выбросоопасных угольных пластов меняется количество газодинамических явлений (ГДЯ). На рис. 1.7 показана динамика этих изменений, а также добычи угля (рис. 1.8) в период с 1985 по 2012 годы.

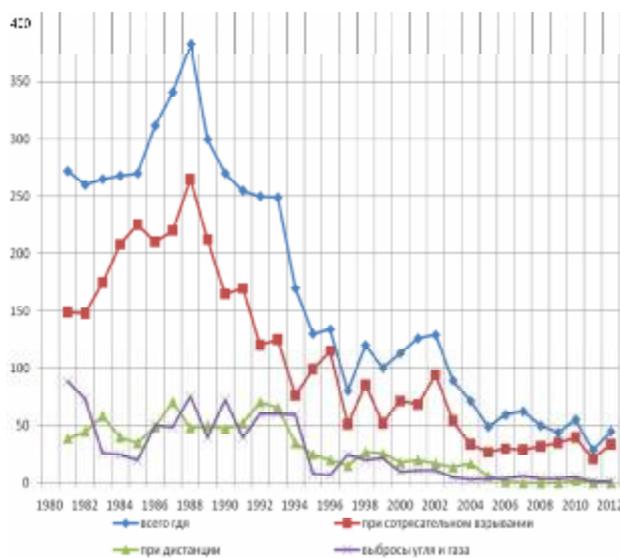


Рис. 1.7. Динамика реализации ГДЯ на шахтах Украинского Донбасса

Отчетливо прослеживается тенденция общего снижения добычи угля и ее стабилизация в последние десять лет.

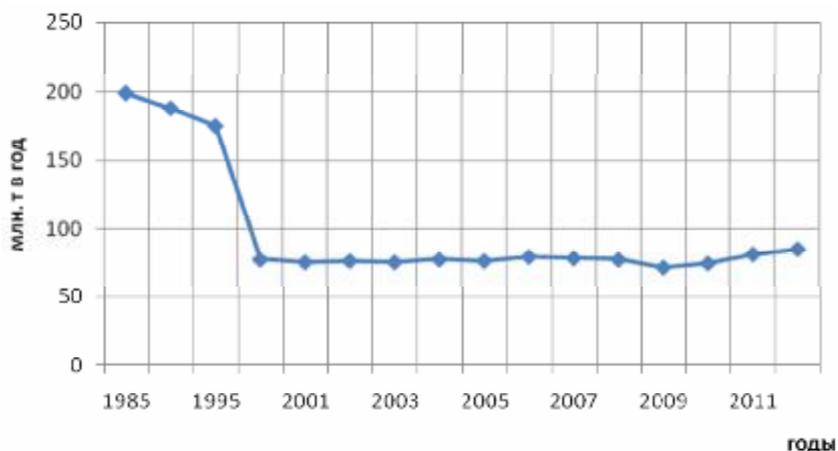


Рис. 1.8 Распределение добычи угля по годам

При этом количество ГДЯ изменяется, повторяя, в общем, тенденцию изменения угледобычи. Увеличение глубины отработки угольных пластов за эти годы незначительно изменяется практически по линейному закону (рис. 1.9).

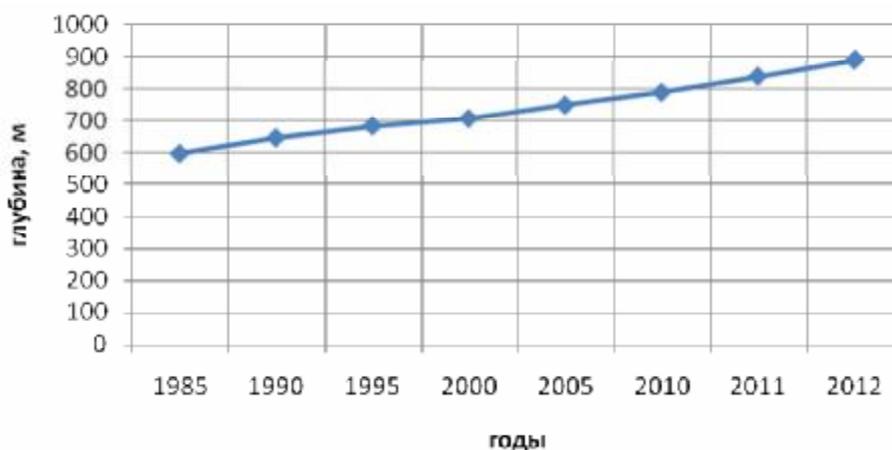


Рис. 1.9. Изменение глубины горных работ по годам

Для возможности сравнения и анализа этих различных по физической сути процессов они были приведены к безразмерному виду, путем деления всех значений графиков на максимальное значение ординаты. На рис. 1.10 показано изменение во времени относительных величин угледобычи $\frac{Q}{Q_{\max}}$ и числа

ГДЯ $\frac{N}{N_{\max}}$. Отчетливо прослеживается близкая связь между исследуемыми величинами.

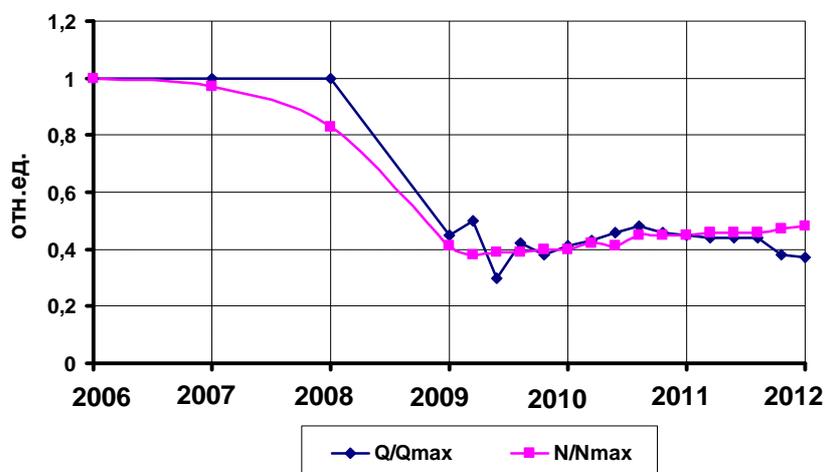


Рис. 1.10. График зависимости относительных значений величин

На рис. 1.11 приведены графики изменения относительной плотности ГДЯ ($\frac{N \cdot Q_{\max}}{N_{\max} \cdot Q}$) и глубины разработки за последние 30 лет. Их анализ позволяет сделать вывод о том, что в пределах анализируемого периода количество ГДЯ находится в линейной зависимости от объемов угледобычи и глубины разработки.

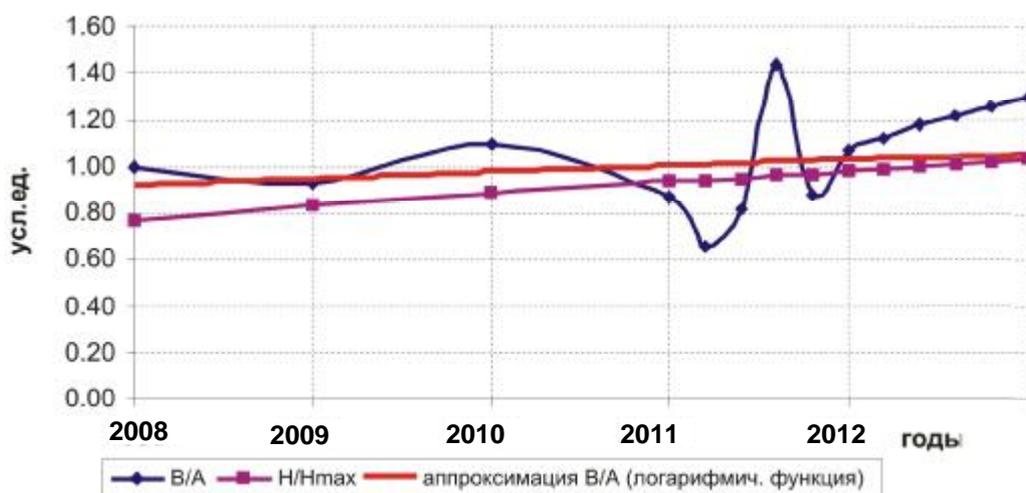


Рис. 1.11. Изменение относительной плотности ГДЯ и глубины разработки во времени

Целью исследований является совершенствование способа прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах.

Идея исследований состоит в том, что геомеханическая система «угольный пласт-вмещающие породы» рассматривается как объект стохастической природы, полная информация о котором содержится в структуре акустического сигнала в виде регистрируемых независимых параметров.

Методическую основу исследований составляет комплексный подход, который состоит в анализе источников информации, в области прогноза газодинамических явлений и способов их предотвращения, технологии разработки выбросоопасных угольных пластов, теории распространения акустических колебаний в неоднородных средах, механики сплошной среды, теории вероятностей и математической статистики.

Объектом исследований являются геомеханические процессы, развивающиеся в высоконапряженном газонасыщенном углепородном массиве со стохастической структурой, приводящие к внезапным выбросам угля и газа.

В процессе выполнения исследований использован комплексный подход, включающий анализ источников информации в области прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах и управления напряженно-деформированным состоянием высоконапряженного углепородного массива; аналитические исследования в части установления взаимосвязи компонентов тензора напряжений в угольном массиве с амплитудно-частотной характеристикой акустического сигнала; вероятностно-статистическая оценка стохастической системы пласт-вмещающие породы и выделение независимых регистрируемых параметров в структуре акустического сигнала; натурные измерения в горно-геологических условиях шахт разрабатывающие выбросоопасные пласты и патентно-лицензионные исследования.

РАЗДЕЛ 2
ТЕОРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

2.1. Теории, описывающие механизм развития
газодинамических явлений

Академику А.А. Скочинскому принадлежит, по видимому, наиболее точное определение явления внезапных выбросов угля и газа: «Внезапным выбросом угля и газа считается явление лавинонарастающего смещения угля под действием горного давления и заключенного в угле газа, сопровождающееся динамическим эффектом с отбросом угля и тонким его измельчением, необычно значительным выделением газа в короткое время и образованием характерной полости в пласте».

Существует также единая классификация динамических явлений по данным рабочей группы УЭК ООН [28] табл. 2.1.

Таблица 2.1

Классификация динамических явлений

Классы динамических явлений	Горные удары	Выбросы газа	Выбросы угля (породы) и газа	Горно-тектонические явления
Виды энергии, участвующие в формировании динамических явлений	Энергия напряженных угля и пород	Энергия газа	Энергия напряженных угля, пород и газа	Энергия напряженных угля, пород и газа, сейсмических волн

По внешним проявлениям, опасности для людей и сохранности горных выработок различные ГДЯ могут быть схожими, однако механизм их различен, и для правильного подбора профилактических и защитных мероприятий их следует различать. Можно выделить следующие типы или группы ГДЯ [29].

1. Собственно внезапные выбросы угля и газа – приурочены к пластам с изменчивой структурой, неоднородными по мощности, простиранию и падению, прочностными свойствами. При подвигании горной выработки в таких пластах или их участках опережающая волна напряжений подвигается не плавно, а скачкообразно, с большими колебаниями амплитуды и скорости перемещения. Внезапные местные концентрации напряжения приводят к локальному разрушению угля, что вызывает ускорение выделения газа из трещин, а затем, по мере дальнейшего разрушения и измельчения угля, десорбцию больших количеств газа из тонких пор угля. Освобождение больших количеств газа (до 40 – 50 м³/т угля), обладающего огромной внутренней энергией (до 600 тм/т угля) приводит к отбросу разрушенного угля в выработку и дополнительному его дроблению.

2. Внезапные высыпания угля с попутным газовыделением приурочены к крутым пластам и только к весьма непрочному, сыпучему углю (Центральный район Донбасса). В отличие от внезапных выбросов они могут происходить и в однородном угле при отсутствии подвигания выработки и не опасном с точки зрения выбросов давления газа (например, ниже 3 атм). На пластах с неоднородным по падению углем внезапные высыпания могут возбуждать настоящие выбросы.

3. Внезапные отжимы, удары кровли, стреляние угля или локальные горные удары с попутным газовыделением отличаются от типичных внезапных выбросов угля и газа тем, что могут происходить на прочных и однородных пластах. Они зависят в первую очередь не от особых свойств угля, а от свойств и напряженного состояния пород и, наконец, могут иметь место на пластах с небольшой газоносностью и неопасным давлением газа. В частности, горные удары и стреляние угля происходит на наиболее прочных углях, обычно неопасных по внезапным выбросам. Если такие явления происходят на сильно газоносных пластах, их трудно отличить от внезапных выбросов. Однако принципиальное отличие сохраняется и в этих случаях: для развития такого рода ГДЯ не требуется участие газа в качестве движущей силы. Поскольку прочные

угли разрушаются значительно меньше, чем перемятые и сыпучие, газовыделение при динамических явлениях этой группы гораздо меньшее, чем при внезапных выбросах угля и газа.

4. Внезапные прорывы газа обычно происходят из пустот, образуемых при деформациях тонкого междупластия, вблизи сближенных сильно газоносных пластов или углистых пород. При достаточно высоком давлении газа породы междупластия под очистной выработкой или над ней лопаются с образованием щели и дают выход газу. В Донбассе такие явления известны при вскрытии суфляров. Весьма часто прорывы газа происходили в антрацитовых шахтах Южного Уэльса.

5. Выбросы, индуцированные взрыванием, могут происходить как на опасных, так и на неопасных по самопроизвольным выбросам пластах, а также в газоносных горных породах. Работа взрывчатого вещества заменяет концентрированные нагрузки горных пород и реализацию потенциальной энергии деформации при внезапном изменении напряжений; поэтому индуцированный выброс может произойти и в однородных и в прочных углях или породе аналогично тому, как это имеет место при горных ударах.

Помимо перечисленных, существуют различные переходные формы, разнообразие которых также велико, как и различия в прочностных и коллекторских свойствах пород, геологической обстановке и технологии проведения горных выработок.

Огромный статистический материал по выбросам угля, породы и газа, произошедших на шахтах Донбасса в период 1906 – 2007 г. приведен в работе [30]. Однако он совершенно не содержит какого-либо анализа произошедших явлений, причин их возникновения.

Существует значительное число гипотез и теорий, в которых сделаны попытки объяснить механизм ГДЯ. Достаточно полный их обзор приведен в работе [31]. В.В. Ходот [32, 38] считает, что разрушение призабойной части угольного пласта вызывается действием сил горного давления. В результате давления кровли на край угольного пласта, уголь растрескивается, частично разру-

шается и призабойной зоне престаает поддерживать основную кровлю. Давление основной кровли переносится вглубь массива, где возникает значительная концентрация напряжений. Уголь вследствие концентрации напряжений в зоне опорного давления деформируется в сторону выработки, переходит из трехосного напряженного состояния в двухосное и при незначительной его крепости, разрушается, что проявляется в виде усиленного отжима угля от забоя. Измельченный уголь выделяет заключенный в нем газ. Газ находится под давлением, поэтому образование в призабойной зоне глубоких трещин вызывает резкий перепад давления. Газ начинает бурно выделяться, устремляясь в сторону выработки и увлекая за собой разбитый и измельченный уголь.

И.М. Петухов и А.М. Линьков [34, 35] связывают развитие подготовительной стадии внезапного выброса с опорным давлением, с изменением прочностных и фильтрационных свойств материала и газового давления. Высокое опорное давление способствует потере устойчивости состояния равновесия и инициированию выброса в связи с резким обнажением поверхности.

А.Э. Петросян и Б.М. Иванов [36] полагают, что в случаях однородной прочности угля, пород, одинаковых коллекторских свойств и равномерного подвигания выработки будет происходить равномерный отжим угля и постоянное газовыделение на обнажении угольного пласта, т.е. обстановка будет безопасной по динамическим явлениям. Процесс инициирования выброса связывается, таким образом, с неравномерной скоростью проведения выработки.

С.В. Кузнецов [37-39] указывает на наблюдающееся быстрое и кратковременное проскальзывание пласта (пропластка) в сторону выработанного пространства. В отдельных случаях область проскальзывания пласта в призабойной зоне распространяется вглубь массива на расстояние нескольких мощностей пласта и всегда сопровождается существенным сбросом давления пород на пласт в призабойной зоне. Это обусловлено главным образом срывом сцепления на поверхности контакта пласта с породами или между пропластками. Кратковременное проскальзывание пласта при его отработке имеет, по мнению автора, решающее значение в возникновении внезапного выброса. Сущность

этого явления заключается в том, что в пласте впереди забоя в результате дополнительного сброса давления пород на пласт в процессе его проскальзывания давление газа может оказаться больше напряжений, сжимающих пласт, и поэтому содержащийся в пласте газ способен развязать выброс.

Сближение вмещающих пород на выбросоопасных пластах может отличаться высокой неравномерностью [40]. В выработках наблюдаются ударообразные сближения, сопровождаемые звуковым эффектом, осыпанием забоя, увеличением газовыделения и т.п. При соответствующих условиях они могут привести к разрушению призабойной части и внезапному выбросу, который трактуется как следствие задержек смещений вмещающих пород.

Ф.А. Абрамов, А.Н. Зорин и др. [41], И.Ю. Бабич, А.Н. Гузь [42], показывают, что в горном массиве возле выработок возникают зоны сжимающих напряжений, которые имеют местный характер и связаны с концентрацией напряжений. Эта концентрация обусловлена действием горного давления и другими нагрузками, в том числе, технологическими, и может иметь как статический, так и динамический характер. Поэтому авторы [41, 42] считают, что в массиве возле выработок может возникнуть ситуация, при которой начало разрушения происходит за счет потери устойчивости в сжатых зонах. Возникшие в результате потери устойчивости возмущения при их дальнейшем (послекритическом) развитии могут привести к разрушению массива, окружающего горную выработку, и инициированию выброса.

В.И. Николин [43] полагает, что перераспределение напряжений, вызываемое внедрением в газоносный массив, сопровождается деформированием в направлении выработки. Величина деформаций в определенных условиях может привести к разрушению ограниченного объема призабойной части пласта, которое вызывает новое перераспределение напряжений и новое разрушение. Процесс прекращается вследствие того, что величина деформаций растяжения окажется недостаточной для разрушения или его предотвратит выброшенная горная масса.

Ж.С. Ержанов, А.С. Сагинов и Ю.А. Векслер [44] считают, что развитие внезапного выброса происходит в момент разрушения слоя некоторой толщины в забое подготовительной выработки. Указанный слой находится под действием сил горного давления в его плоскости (продольные) и сил давления газа в направлении забоя (поперечные силы). Инициатором выброса может служить либо потеря устойчивости слоя при продольном сжатии, либо его разрушение при продольно-поперечном изгибе.

А.Н. Зорин в работе [45] рассматривает возникновение и протекание внезапного выброса, обусловленного взрывными работами. Предполагается, что в кровле (почве выработки) залегает слой пород определенной мощности, моделируемый однородной изотропной плитой, защемленной по контуру. Непосредственно у забоя участок плиты подвергается воздействию взрывной нагрузки. Механизм выброса представлен следующим образом. В результате взрыва разрушается и отделяется порода от массива, после чего контур выработки в результате сил упругого восстановления перемещается. При этом у забоя появляется зона растягивающих напряжений, за которой следует область сжатия, а за ней следует зона растяжения.

Авторы [31] со ссылкой на [46] отмечают, что наличие свободного газа интенсифицирует процесс как в результате увеличения освободившейся энергии упругих деформаций, так и в силу того, что при переходе к пневматическому источнику давления разрушение приобретает взрывной характер.

2.2. Природные факторы и причины возникновения газодинамических явлений

Современные тенденции развития технологий добычи полезных ископаемых связаны с дальнейшим усложнением расчетных моделей геомеханических процессов, протекающих в газонасыщенном углепородном массиве на больших глубинах, что обусловлено необходимостью учета различных взаимосвязанных факторов, многофазности и неоднородности угольных пластов, содержащих газ в двухфазном состоянии – свободном и сорбированном. Причем сорбированная

газовая фаза, по данным многочисленных исследований [47-50], составляет основной резервуар запасов газа в угле и тем самым является определяющим фактором в развязывании газодинамических проявлений горного давления при нарушении равновесного состояния углепородного массива [51]. Общий признак угленосных районов, в которых происходят при разработке пластов внезапные выбросы, это по данным [52], значительная общая тектоническая нарушенность угленосной толщи и ее высокая газонасыщенность. Выбросы происходят на пластах, состоящих из углей различного петрографического состава с выходом летучих от 35% до 3,5%. Наиболее подвержены внезапным выбросам пласты, угли которых относятся к маркам Ж, К, ОС, Т.

По данным работы [32], угли пластов, опасных по внезапным выбросам, не представляют в отношении прочностных свойств особой категории ископаемых углей; однако большинство угольных пластов, опасных по выбросам, или целиком состоят из сильно трещиноватого, перемятого, нарушенного многочисленными плоскостями ослабления угля, или включают пачки и пропластки сильно нарушенных многочисленными трещинами угля или углистого аргиллита (большинство опасных пластов Центрального района Донбасса).

В работе [53] со ссылкой на более ранние работы [54, 55] изложена гипотеза природы и механизма выбросов породы и газа. В соответствии с ней выброс становится возможным при неизменном напряженном состоянии только при определенной способности породы сопротивляться отрыву, т.е. первое условие выбросоопасности B можно сформулировать следующим образом:

$$B = f(s_p), \quad (2.1)$$

где s_p – величина временного сопротивления растяжению.

Далее, в работе [53] со ссылкой на [56] предложено понятие «показатель хрупкости» и установлено, что у выбросоопасных песчаников он в среднем составляет 15. У глинистых и песчанистых сланцев он обычно порядка 3 – 6, у из-

вестняков 7–9. Исходя из этого, в работе [53] предложено 2-е условие выбросоопасности:

$$B = j(X_n), \quad (2.2)$$

где X_n – показатель хрупкости, $X_n = \frac{S_{сж}}{S_p}$.

Третье условие выбросоопасности из [53] основывается на положении о том, что разрушение в форме выброса породы возможно только при наличии предельного напряженного состояния. То есть 3-е условие выброса имеет следующий вид [53]:

$$B = y(s_{cp}), \quad (2.3)$$

где $s_{cp} = \frac{S_x + S_y + S_z}{3}$.

Далее, как указывается в [53], кроме гравитационных сил (P_B), обуславливающих напряженность породного массива, существуют силы давления газа, находящегося в порах пород (P_G), тектонические силы (P_T) и силы, обусловленные наличием менее очевидных и слабо изученных факторов (P_X). Следовательно:

$$s_{cp} = F(P_B, P_G, P_T, P_X). \quad (2.4)$$

В общем виде, выбросоопасность по данным работы [53] предлагается определять по комплексу условий-факторов. В общем виде условие выбросоопасности формулируется в следующем виде:

$$B = \Phi(s_p, X_n, s_{cp}). \quad (2.5)$$

В соответствии с [57], гипотезы, в которых горное давление рассматривается в качестве непосредственной причины катастрофических разрушений массива, не дают ответов на вопросы о механизме ГДЯ в забоях подготовительных выработок и о причинах эффективности способов борьбы с выбросами, основанных на уменьшении прочности горных пород. Кроме того, с этих позиций невозможно объяснить случаи выбросов отдельных пачек угольных пластов и даже углистых сланцев без всяких видимых разрушений массива в окрестности образующихся полостей.

Приведенный в работе [53] анализ распространения выбросоопасных пластов по зонам различной степени метаморфизма позволил установить [58] достаточно надежную зависимость статистической вероятности выбросоопасности (P_i) шахтопласта от весового выхода летучих веществ (V^r %). На основе этого был сделан вывод [53] о том, что весовой выход летучих веществ более 36 % или значение показателя электросопротивления антрацитов $\lg r < 3,2$ (значения приняты с некоторым запасом), являются двумя характеристиками, определяющими отсутствие выбросоопасности:

$$P_i = 0,052V^r - 0,0014(V^r)^2 - 0,145; \quad r = 0,99 \pm 0,02. \quad (6)$$

Параболический характер связи статистической вероятности выбросоопасности шахтопласта и выхода летучих веществ объясняется характером изменения природной газоносности угольных пластов различной степени метаморфизма.

Проведенные в работе [59] исследования показали, что выбросоопасность заложена в природных условиях образования углей, но может быть сформирована и реализована условиями деформирования углей непосредственно при их добыче. В обоих случаях условия возникновения лавинного разрушения зави-

сят от дефектности структуры угля и ее изменения в процессе деформирования. Наиболее полно эти условия проявляются при динамическом деформировании и при их изучении необходимо учитывать дефектность структуры угля. По данным [60], в местах локального метаморфизма породы в силу их преобразования будут накапливать напряжения (потенциальную энергию) в направлении сжатия, в то время как там, где породы более пластичные, произойдет полное или частичное выравнивание компонент напряжений. При достижении предела прочности пород, который в зонах локального метаморфизма ниже, чем в смежных с ними, произойдет хрупкий разрыв в виде небольшого надвига, увеличивающегося во времени от дальнейшего горизонтального сжатия и захватывающего угольный пласт или несколько пластов. При этом в породах в условиях нетронутого массива сохраняется около 90% накопленной потенциальной энергии [61]. Совершенно очевидно, что этой энергии может оказаться достаточно для хрупкого разрушения пород и угля в виде ГДЯ при проведении горных работ. Именно этим можно объяснить тот факт, что к различного рода геологическим нарушениям в Донбассе, а также другим бассейнам приурочено свыше 70 % ГДЯ.

Таким образом, природное формирование выбросоопасности угольных пластов определяется степенью метаморфизма углей [62]. Эта закономерность – результат зависимости комплекса природных явлений и факторов от степени метаморфизма углей. Важнейшими из них являются удельная частота выбросов, достигающая максимальных значений при $V^{daf} \approx 20\%$; вероятность возникновения выброса при разработке шахтопласта, максимум которой приходится при $V^{daf} \approx 19\%$; прочность и пористость углей – минимум их приходится на V^{daf} приблизительно 20–26%; природная газоносность, отнесенная к объему порового пространства и достигающая максимальных значений при $V^{daf} \approx 19\%$; давление газов выбросоопасных угольных пластов, которое имеет максимальное значение при $V^{daf} \approx 22\%$; содержание высших углеводов в

составе газов угольных пластов, достигающее максимальных значений при V^{daf} около 24 %; изменение молекулярного строения угля [62].

В работе [53] приведен также интересный факт относительно выбросоопасных песчаников. Органическое вещество представлено в выбросоопасных песчаниках на 90–95% мелко рассеянным материалом. Степень метаморфизма его выше, чем угля пластов, залегающих в этом же геологическом районе. Следовательно, газоносность песчаников, вмещающих угли марки Г, может оказаться достаточной, чтобы обусловить выбросоопасность пород.

По данным той же работы [53], отсутствие гелия в составе газов угольного пласта свидетельствует о частичной естественной дегазации массива и об отсутствии выбросоопасности на данном участке. Однако положение о том, что отсутствие гелия в составе газа угольного пласта является свидетельством отсутствия выбросоопасности, не следует распространять на угли с $V^r \leq 35\%$ или $\lg r < 3,2$ [53].

В работах [63-65] показано, что при выбросах угля и породы, основная часть газа выделяется не в момент разрушения массива, а в последующий период и в основном из разрушенной массы. Установлено, что даже сильные стрелания угля не сопровождаются значительным газовыделением, поэтому содержащийся в угле газ не может быть причиной этих динамических явлений.

Энергетическая теория выбросов угля и газа, разработанная В.В. Ходотом [32, 33, 66] объясняет эти явления как разрушение угольного пласта вблизи горной выработки, вызванное внезапным изменением его напряженного состояния и реализации потенциальной энергии угля. При этом увеличивается площадь давления газа и создается возможность отброса от забоя угля, потерявшего силовую связь с массивом. По мнению В.В. Ходота [33], во всех случаях постепенное или внезапное разрушение угля происходит под действием гравитационных сил горных пород и давления газа. Считается, что реализация потенциальной энергии угля, газовыделение, падение давления газа – это процессы, индуцированные разрушением угольного пласта [33]. Как указывается в [57], в

основе другой системы взглядов, разработанной МакНИИ [67, 68] лежит предположение о том, что боковые породы опасных пластов имеют повышенные, неравномерно распределенные напряжения, обусловленные тектоническими процессами, а в отдельных случаях – технологией ведения горных работ. Выполненные инструментальные исследования сотрудниками МакНИИ [69], показали, что поле напряжений в выбросоопасных и соседних с ними неопасных зонах близко к гидростатическому, а остаточные тектонические напряжения в боковых породах выбросоопасных геологических нарушений отсутствуют. Кроме того, при анализе теории МакНИИ следует иметь в виду тот факт, что наиболее значительные деформации угля зарегистрированы [70] в плоскости пласта после прекращения интенсивных колебаний кровли. Колебательное движение кровли проявляется также и при обычных сотрясательных взрывах, не сопровождающихся выбросами угля и газа [70]. Правильная оценка происходящих в массиве процессов возможна лишь после выяснения того, что в цепи событий является причиной, а что – следствием. Не вызывает сомнений то, что импульсный характер движения пород в процессе ГДЯ может быть следствием разрушения угля в призабойной части пласта и потери кровлей опоры [57]. Как указывалось рядом авторов [71-73] в очистных забоях интенсивность отжима проявляется по мере продвижения лавы, что связано прежде всего с цикличностью обрушения (посадки) основной кровли пласта. Наименьшее давление на призабойную часть пласта имеет сразу после обрушения основной кровли, и этому периоду соответствует глубина наименьшего отжима. По мере увеличения длины зависающей породной консоли опорное давление возрастает, уголь разрушается уже в зоне с более высоким всесторонним сжатием соответственно и увеличивается и глубина отжима. Немаловажное влияние на характер проявления отжима, а следовательно, и на выбросоопасность призабойной части пласта оказывают вмещающие породы. Исследования, выполненные С.Н. Осиповым и другими экспериментаторами [74, 75], показали, что при наличии в непосредственной кровле известняков и глинистых сланцев возможна наибольшая вероятность отжима, а при расположении в непосредственной кровле пласта

песчаников и песчанистых сланцев вероятность отжима в среднем уменьшается в 2–3 раза, что объясняется большой крепостью пород и их малым изгибом [74].

В непосредственной почве пласта прочностные характеристики пород оказывают обратное влияние. При прочных породах непосредственной почвы вероятность отжима повышается, поскольку такие породы могут быть надежным и прочным основанием для сжатия призабойной зоны угольного пласта. Слабые породы почвы, по мнению авторов работы [74], деформируются и поэтому являются слабым (ненадежным) основанием для реализации процесса отжима. Вместе с тем, как установлено в ИГД им. А.А. Скочинского [76], прослеживается тенденция снижения выбросоопасности пологих пластов Донбасса с увеличением отжима угля.

Благодаря работам И.В. Боброва [63], уже в начальной стадии научно-исследовательских работ в области борьбы с выбросами было известно, что разрушение породы давлением газа невозможно. В работе [64] показано, что во многих случаях в местах высокого давления газа не наблюдалось даже признаков выбросоопасности.

Известно, что в процессе развития внезапных выбросов важную роль играет содержащийся в массиве газ. Если в породах развиваются трещины, то сорбированный газ переходит в свободное состояние, заполняя возникающие пустоты. При росте трещин, как показано Ю.Ф. Коваленко [77], давление газа в результате десорбции сохраняется, если фильтрация газа отсутствует или мала. Если же трещины, прорастая, выходят на свободную поверхность выработки, то происходит естественная дегазация массива и опасность ГДЯ снижается. По данным работы [78] природная система «уголь-метан» обычно находится в напряженном состоянии, отличающем ее от обычных равновесных систем «твердое тело-газ». Такое состояние вызывается: давлением на пласт вышележащих пород; внутренними напряжениями, создающимися в угле, который стремится увеличить свой объем при сорбции им метана, но лишен этой возможности в условиях всестороннего сжатия; образованием газов внутри самого угольного вещества при его метаморфизме.

По данным работы [57], в настоящее время, многие специалисты, рассматривая природу выбросов породы, считают возможность разрушения массива под действием внешних нагрузок фактом самим собой разумеющимся. Одни исследователи предполагают, что разрушение песчаника обусловлено геостатическим давлением, другие – влиянием древних и современных тектонических подвижек земной коры. При этом массив в окрестности выработки рассматривается как пассивный элемент, устойчивость которого определяется его прочностью и величиной приложенных внешних нагрузок. Однако фактические данные не дают оснований считать такую точку зрения правильной. На глубинах залегания, равных 700-1200 м, геостатическое давление составляет 17,2-29,4 МПа, в то время как предел прочности донецкого выбросоопасного песчаника даже на одноосное сжатие равен 114-117 МПа [74]. Тот факт, что выбросы породы большой интенсивности происходят при взрывании даже одного шпурового заряда небольшой массы, а также случаи самопроизвольного откола больших линз песчаника диаметром до 2 м и толщиной 0,1-0,2 м при комбайновой проходке выработок [79] свидетельствует о том, что массив в непосредственной близости от забоя может находиться в состоянии, близком к всестороннему сжатию. Вместе с тем, известно [80], что в условиях всестороннего сжатия прочность горных пород повышается в 10-12 раз. В связи с этим, разрушение песчаника в окрестности выработки под действием внешней нагрузки, независимо от их происхождения считается маловероятным [57].

По данным той же работы [57], делаются попытки доказать существование аномально высоких напряжений в угольных и других месторождений и установить связь ГДЯ с современными областями тектонических подвижек земной коры и сейсмической активности. Однако единого мнения по этому вопросу нет. Некоторые специалисты считают [57], что напряжения, которые могли бы быть вызваны палеотектоникой, вследствие релаксации не могли сохраниться. К тому же, современные методы замеров напряженного состояния массива столь неточны, что на их основании нельзя с достаточной достоверностью подтвердить неравномерность напряженного состояния пород под влиянием их со-

временных подвижек, установленных [81] специальной нивелировкой земной поверхности. Более правдоподобным [82, 83] является предположение о неравномерности распределения напряжений в массиве, обусловленным геостатическим давлением, из-за наличия в нем породных участков с различными физико-механическими свойствами. Для разрушения породы в таких условиях понадобились бы напряжения, превышающие почти на 2 порядка те, которые обусловлены геостатическим давлением. Однако наличие в массиве таких высоких напряжений, даже с учетом неравномерности распределения их на современных глубинах разработки, не подтверждается исследованиями [57].

Существует мнение [54, 85], что причиной выбросов может быть взрывной импульс. Действительно [66], до недавнего времени все выбросы происходили при взрывных работах, так как тогда буровзрывной способ проведения выработок в условиях Донбасса был единственным. При этом опыт показывает [57], что иногда взрывание небольшого заряда вызывало большой выброс, и наоборот, взрывание большого заряда сопровождалось малым выбросом. Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что в некоторых случаях происходят запоздалые выбросы [64]. При строительстве шахты им. А.А. Скочинского, например [57], один выброс произошел через 15 мин после начала взрывных работ, другой – через 4 ч. Выбросы соляных пород и газа имели место во время проведения выработок комбайном, при взрывных работах, а также в отсутствие горных работ [86]. Все это свидетельствует о несостоятельности представлений о выбросах породы как результате действия на массив взрывного импульса.

По мнению автора работы [87], разрушение угля и породы перед выбросами начинается с мест наиболее высокой концентрации напряжений и происходит под действием их касательных составляющих. Некоторые специалисты [79], рассматривая устойчивость пород в забое выработки, считают возможным откол песчаника в виде пластин за счет касательных напряжений по контуру и растягивающих напряжений в средней части забоя. С позиций действия на массив внешних статических или динамических нагрузок и устойчивости его невозможно объяснить причины образования после ГДЯ пластин, которые неза-

висимо от ориентировки напластований всегда повторяют форму стенок полос-
тей. Если принять, что разрушение массива происходит под действием внешних
сил, то следовало бы ожидать образование пластин параллельно напластованию
или вообще беспорядочное разрушение.

Таким образом, ни одна из имеющихся гипотез и теорий не дает удовле-
творительного объяснения причин быстропротекающих разрушений горных
пород в массиве. Если принять, как предлагают некоторые специалисты [33],
что ГДЯ прекращается вследствие самоподбучивания, то остается без ответа
вопрос о том, почему при уборке горной массы из полости и уменьшении боко-
вого отпора разрушение горных пород не возобновляется, а для повторного вы-
броса требуется новое внедрение в массив и создание в нем определенной пло-
щади обнажения. Самоподбучиванием невозможно объяснить прекращение,
например, выбросов песчаника из кровли выработки.

По-видимому, отсутствие удовлетворительных теорий и гипотез ГДЯ
обусловлено тем, что попытки объяснить их делаются с позиций статики горно-
го массива без моделирования быстропротекающих процессов, без выяснения
источников активных сил и условий их проявления [57].

По данным работы [60], в опасных по выбросам зонах уголь более мета-
морфизован, а его метаноемкость при одном и том же давлении газа на 2,1-
3,7 м³/т выше, чем для угля из зон, неопасных по выбросам. Природу увеличе-
ния метаморфизма в опасных по выбросам зонах можно объяснить высокими
тектоническими напряжениями в угленосной толще и вызванными ими высо-
кими температурами. При отсутствии таких напряжений в угле бы произошли
процессы регрессивного метаморфизма.

Как следует из работы [60], упругое изменение объема угля на порядок
меньше, чем песчаника. Следовательно, при слабом воздействии современных
тектонических сил на породы содержащееся в них углистое вещество находит-
ся под защитой скелета из породообразующих материалов, то есть под мень-
шим напряжением, чем породообразующие минералы породы и уголь смежно-
го пласта. Если же участок подвержен интенсивному тектоническому сжатию в

плоскости напластований и при этом предел прочности пород превзойден, в них происходят вторичные минеральные преобразования и они становятся опасными по выбросам. В таких породах углистое вещество будет более метаморфизованным, чем уголь смежного пласта, что объясняется повышенными релаксационными температурами деформируемых пород и высокими напряжениями не только в породах, но и в углистом веществе.

Таким образом, по данным работы [60], условия образования зон газодинамической опасности в угленосной толще создаются, по-видимому, в основном горизонтальными движениями земной коры (тектоническими силами). Возникновение того или иного ГДЯ обусловлено величиной современных тектонических сил, действующих в горизонтальной или близкой к ней плоскости; приобретенными в результате действия тектонических сил свойствами материала и его релаксационными характеристиками, а также глубиной разработки, то есть величиной gH , препятствующей разрядке тектонических напряжений в сторону поверхности шахты. Естественно, напряжения от тектонических сил и сил тяжести пород при проведении горных выработок, подчиняясь законам механики горных пород, увеличиваются в 1,2-2 раза. Именно поэтому, натурные замеры в шахтах показывают иногда концентрацию напряжений, равную (4 ... 6) gH .

У подавляющего большинства исследователей значение тектоники при рассмотрении внезапных выбросов угля и газа прямо или косвенно сводится к тому, что действовавшие в прошлом тектонические силы изменили первичные свойства угля, раздробили его, перемяли, вследствие чего такой уголь, с одной стороны, обладает пониженной прочностью и, с другой стороны, характеризуется более высокой начальной скоростью газоотдачи, а также в ряде случаев и повышенной газоносностью [88].

Другая сторона влияния тектоники заключается в том, что при осложнении пластов пликативными и дизъюнктивными нарушениями распределение метана в угольных пластах становится неравномерным ввиду различий в условиях миграции метана из глубины к поверхности. Тектоническая структура

угольных месторождений и отдельных их частей является одним из главных факторов, определяющих газоносность угольных пластов и, как следствие, их опасность по внезапным выбросам угля и газа.

В бассейнах или месторождениях с простым тектоническим строением, когда пласты залегают полого и характеризуются выдержанной мощностью, когда отсутствуют тектонически нарушенные пачки угля (или присутствуют, имея малую мощность), складчатость выражена слабо, а дизъюнктивные нарушения встречаются чрезвычайно редко, внезапные выбросы угля и газа начинают проявляться на сравнительно большой глубине – 275-350 м. В бассейнах и месторождениях с более сложным тектоническим строением внезапные выбросы могут происходить на глубине 140-170 м, с весьма сложным строением - на глубине 120 м [88].

Выбросоопасность участков, осложненных дизъюнктивами, зависит также от ориентировки обреза пластов сместителями дизъюнктивных нарушений. Наибольшее число выбросов и участков, к которым они приурочены, приходится на те дизъюнктивные нарушения, обрезы которых ориентируются по простиранию пласта. Такая ориентация в значительной степени препятствует миграции метана по пласту к поверхности. При ориентации обреза пластов по падению внезапные выбросы не зарегистрированы [88].

В то же время, предположения о связи ГДЯ с лунными приливами и ротационным режимом Земли [74] также мало обоснованы [57]. Полусуточные составляющие приливов соответствуют относительной деформации земной коры порядка 10^{-8} - $0,5 \cdot 10^{-7}$ и изменению напряженного состояния в ней всего лишь на 0,1-1,0 кПа. Если бы отмеченные выше глобальные воздействия на земную кору были существенными, то они становились бы причиной крупных катастроф в шахтах одновременно на больших участках месторождений.

По данным работы [60], указывается на то, что проявления вулканизма, землетрясений и ГДЯ в шахтах и рудниках во времени происходят неравномерно, отмечается их связь с положением Луны и Солнца относительно Земли. В работе С.А. Батугина и И.М. Батугиной [89] на основании обширного статисти-

ческого материала (свыше 5000 горных ударов) был сделан вывод, что на большинстве месторождений максимум числа ударов приходится на период минимума солнечной активности или на периоды максимальной скорости изменения последней.

Газодинамическая активность в течение года неодинаковая [60]. Она повышена весной и осенью, несколько ниже зимой и особенно низка летом, в то время как атмосферное давление в весенние и летние месяцы практически одинаково, что свидетельствует об отсутствии существенного влияния атмосферного давления на газодинамическую активность.

Д.Ю. Белоцерковский [90] исследовал зависимость ротационного режима Земли и установил, что скорость вращения Земли не постоянна, она изменяется в течение суток, сезонов года и от максимума до минимума солнечной активности.

Далее, в работе [60] предложена тектонофизическая гипотеза, сущность которой заключается в том, что ГДЯ, включая землетрясения, имеют общую природу. Они возникают там, где в приповерхностной части земной коры под действием внутри- и внеземных факторов проявляются современные тектонические силы, ориентированные преимущественно в горизонтальной или близкой к ней плоскости. В конкретных условиях величина этих сил обусловлена скоростью современных горизонтальных движений земной коры, физико-механическими свойствами и геометрическими размерами ее частей, глубиной от поверхности. Современное проявление горизонтальных движений земной коры сопровождается неравномерным преобразованием (метаморфизмом) пород в ней, в результате чего в отдельных участках месторождения образуются локальные зоны повышенной хрупкости, большей пористости, меньшей прочности, повышенных неравнокомпонентных напряжений, аномально высокого давления. В таких зонах, опасных по ГДЯ, указанные факторы увеличиваются или уменьшаются в зависимости от характера ведения горных работ, то есть ГДЯ в шахтах – это, в первую очередь, продукт тектонофизических факторов и факторов горного давления гравитационной природы.

В работе [91] большое внимание уделено пористости песчаников. Пористость песчаников на основе качественного сравнения отнесена к одному из показателей выбросоопасности [92]: пористость выбросоопасных слоев в 1,5-2,0 раза выше пористости выбросонеопасных. Выполненные в работах [91-95] исследования, свидетельствуют о том, что в среднем открытая пористость выбросоопасных песчаников выше, чем у выбросонеопасных.

В работе [93] обосновано положение, что данные определения физико-механических свойств горных пород, в том числе и пористости по шахтным пробам, значительно искажаются вследствие возникновения вторичной трещиноватости. Коэффициент открытой пористости K_n является важным показателем коллекторских свойств песчаника. Однако он не дает информации о газоемкости песчаника, так как характеризует лишь его емкость, доступную флюидам, не отражая характера флюида. По значениям K_n невозможно дать ответ, имеем ли мы дело с газоносным или водоносным песчаником [91].

Исследования характера изменения влажности песчаников показало, что ее значения изменяются в широких пределах (0,36-7,32%). Выбросоопасные песчаники характеризуются меньшими значениями влажности по сравнению с выбросонеопасными. Однако существенных различий установить не удалось, так как значения влажности изменяются в зависимости от степени катагенетических преобразований, современной глубины залегания и других геологических факторов. Поэтому было предложено оценивать не влажность пород, а степень заполнения пор газом [96]. Коэффициент открытой пористости и степень заполнения пор газом V_r обуславливают эффективную пористость и несут информацию о газоемкости песчаника. Степень заполнения пор газом V_r является показателем, характеризующим относительную газоемкость пород. Следовательно [91], этот показатель несет больше информации о газовом факторе, чем K_n .

Первые исследования различия выбросоопасных и выбросонеопасных песчаников по значениям V_r [96] показали, что поры выбросонеопасных песча-

ников заполнены газом на 20-30%, а выбросоопасных – на 60-70%. Однако эти исследования базировались в основном на данных о пробах, отобранных в горных выработках шахт Донецко-Макеевского и Центрального угленосных районов, где значения открытой пористости песчаников составляют в среднем 5-7%. Интересная картина наблюдается в Красноармейском угленосном районе, где пористость песчаников выше и составляет в среднем 9-11%, степень заполнения пор выбросоопасных песчаников газом достигает 60%, а выбросоопасных – в среднем 80%. По-видимому, с увеличением открытой пористости степень заполнения пор выбросоопасных песчаников должна увеличиваться. Согласно инструкции [97], с увеличением численных значений показателей K_n и V_r увеличивается ранг выбросоопасности этих показателей, что приводит к повышению значений комплексного критерия выбросоопасности B . Как уже говорилось, одним из важных факторов, которые влияют на поведение системы метан-уголь, являются динамические знакопеременные нагрузки. Важность изучения влияния знакопеременных воздействий на газонасыщенный уголь связана с тем, что в условиях естественного залегания угольный пласт непрерывно находится под влиянием волновых процессов, связанных с производственной деятельностью человека (взрывные работы, работа проходческих и угледобывающих машин, посадка и обрушение кровли и т.п.) [98]. В связи с этим ряд исследователей выдвигает предположение о вибрационных процессах в угольном пласте как источнике и причине внезапных выбросов угля и газа [99-101]. При этом колебательные процессы рассматриваются как причина потери устойчивости пласта в зоне отжима и предлагается использовать знакопеременные нагрузки для снятия выбросоопасности в призабойной зоне угольного пласта. Известны работы, в которых установлено, что колебания различной интенсивности и частоты приводят к усилению выхода газа из образцов угля [102].

Можно предположить, что динамическое периодическое воздействие на перемятые угли пониженной прочности, обладающие большой пустотностью,

может привести при большой амплитуде к кратковременному повышению давления газа в пласте за зоной влияния выработок. С другой стороны, переменное воздействие малой амплитуды особенно для углей слабой нарушенности может привести к снижению давления и тем самым к уменьшению вероятности выбросов. Количественное уточнение понятий «малая» и «большая» амплитуда зависит от конкретных условий в угольном пласте и требует дальнейших экспериментов в шахтных условиях [98].

В работах [88, 98, 103], подробно рассмотрены стадии разрушения угля при внезапном выбросе угля и газа.

2.3. Напряженно-деформированное состояние выбросоопасных угольных пластов, как основной фактор выбросоопасности

В работе [32] приведен анализ распределения напряжений в угольном пласте вблизи горной выработки. В соответствии с ним можно перечислить свойства угольного пласта и сочетание этих свойств, которые создают опасность внезапных выбросов угля и газа.

Первое условие возбуждения внезапного выброса угля и газа – освобождение вблизи очистной горной выработки таких количеств потенциальной энергии угля W и реже кинетической энергии горных пород \mathcal{E} , которых было бы достаточно для работы смещения угля в сторону горной выработки F и разрушения угля U :

$$W + \mathcal{E} > F + U ; \quad (2.7)$$

В случае подготовительной выработки это условие может быть записано:

$$W > F + U ; \quad (2.8)$$

а для случая вскрытия угольного пласта:

$$W + Q > F + U , \quad (2.9)$$

где Q – внутренняя энергия газа, заключенного в «свободном» объеме пор, т.е. вне влияния сорбционных сил. Этот газ обычно составляет не больше 10 % всего заключенного в угле газа.

Второе условие: Скорость разрушения угля v_p должна превышать скорость падения давления газа в трещинах угля v_d :

$$v_p > v_d; \quad (2.10)$$

Третье условие – сохранение давления газа к моменту завершения разрушения угля на уровне более высоком, чем сопротивление разрушенного угля отбросу:

$$P > \frac{m}{S} [g(f \cos a \pm \sin a) + v], \quad (2.11)$$

где S – площадь поперечного сечения разрушенного блока угля.

По данным работы [32], экспериментальные определения и расчет величин, входящих в неравенства (2.8) и (2.9), показывают, что в газоносных угольных пластах, разрабатываемых на шахтах от первой и выше категорий по газу, второе и третье условия выполняются практически всегда.

Главным и необходимым условием внезапного выброса является выполнение условия (2.7). Даже в малопрочных углях освобождающаяся в угольном пласте потенциальная энергия в большинстве случаев должна полностью расходоваться на работу смещения (отжима) угольного пласта при изменении его напряженного состояния.

Большая скорость разрушения угольного пласта возможна только при внезапных изменениях напряженного состояния угля, которые возможны вследствие следующих причин [32]:

- истощения несущей способности прочного участка угля или прочного включения угольного пласта в форме хрупкого разрушения;

-
- динамической нагрузки на угольный пласт со стороны вмещающих пород;
 - быстрого внедрения горной выработки в угольный пласт при взрывной отбойке угля, в частности при сотрясательном взрывании;
 - вскрытия угольного пласта взрыванием.

Эти четыре причины охватывают все многообразие динамических явлений, в которых существенную роль играют давление горных пород и давление газа. Все они характеризуют внезапность изменений свойств материала в пространстве или процессов изменения напряжений во времени. В угольном пласте однородной структуры, в условиях плавного подвигания прямолинейного забоя и постепенной осадки кровли внезапные выбросы не могут иметь места.

Таким образом [32], если исключить производственные факторы – взрывную отбойку угля или вскрытие пласта взрыванием, связанные с индуцированными выбросами, и создание зон дополнительной концентрации напряжений (в кутках уступов), то наиболее общей причиной внезапных выбросов угля и газа является неоднородность структуры угля и вмещающих пород.

В соответствии с работой [78], спор о том, что чему предшествует – измельчение угля в пласте и потом десорбция газа, или наоборот, в достаточной степени схоластичен. В системе «уголь-газ» вследствие разрядки напряжения, создавшегося в этой системе, происходит спонтанный переход метана или углекислоты из негазообразного состояния в газообразное и одновременное нарушение сплошности угольного массива. Этот процесс происходит быстро, но скорость его протекания значительно меньше, чем скорость взрыва химических веществ.

Интересный подход к описанию явления внезапного выброса предложен в работе [104], основанный на термодинамическом методе. По мнению ее автора, нет такой математической системы уравнений, которая бы учитывала основные особенности внезапного выброса. Одной из причин этого является недостаточная детализация описания механизма выброса и определенный субъективизм в выборе свойств такой сложной среды, как газонасыщенный угольный

пласт. В соответствии с ним, вначале угольный пласт медленно нагружается до потери им механической прочности. Это – первый термодинамический процесс. Затем уголь быстро теряет механическую прочность – второй термодинамический процесс. Затем происходит постепенное доразрушение твердого «скелета» и перераспределение газового равновесия между количествами масс и энергий свободного и сорбированного газа. Это – третий термодинамический процесс. В конце третьего термодинамического процесса может сформироваться непосредственно вынос угольной и газовой смеси вследствие сложившихся соотношений между внешними импульсами и энергетическими показателями (параметрами) процесса. Его можно назвать четвертым термодинамическим процессом. По мнению автора работы [104], такая схематизация обобщает широкий класс явлений, происходящих в массиве горных пород. Ее конкретизация на случай описания внезапного выброса заключается в выборе параметров среды и соответствующих математических зависимостей для их определения.

Очевидно, что при производстве горных работ накопленная в массиве энергия упругих деформаций пород может трансформироваться в работу смещения среды. В тех зонах пласта, где наблюдались и непрерывные во времени деформации угля, выбросы не происходили [105]. То есть, все ГДЯ приурочены к местам задержки деформаций среды.

Количество потенциальной энергии упруго деформированного породного массива в призабойной области подготовительной выработки однозначно не характеризует степень выбросоопасности и условий развязывания выброса [79]. Условие достижения критических напряжений в очаге динамических явлений необходимо, но не достаточно для возникновения горных ударов и внезапных выбросов. Речь идет о необходимости преодоления некоторого энергетического барьера, после чего реализуется возможность многостадийного протекания этих явлений [106]. Потенциальная энергия, накопленная в очаге динамического явления в форме энергии упругой деформации массива, давления газа, заключенного в угле, и сил тяжести аналитически может быть представлена следующим образом:

$$W = \int_V (w_e + w_p + w_g) dV, \quad (2.14)$$

где W_e – удельная энергия упругой деформации массива; W_p – удельная энергия давления газа, заключенного в угле; W_g – удельная энергия сил тяжести.

Эта энергия высвобождается в виде работы разрушения, затухающих колебательных процессов и кинетической энергии движения газугольной смеси. Кроме перечисленных видов энергии, как правило, наблюдается ряд побочных, диссипативных процессов. В работе [106] показано, что при определенном уровне концентрации и общих запасах потенциальной энергии, условия развязывания динамического явления реализуются только в ограниченном объеме V_0 , и наоборот, определенным объемам очагов должны соответствовать достаточные уровни энергии. Это позволяет управлять ударо- и выбросоопасностью путем физического уменьшения концентрации и запасов энергии, а следовательно, и размеров потенциальных очагов этих явлений [106]. С точки зрения выбросоопасности весьма важной представляется оценка парциального участия различных источников энергии [106].

В окрестности некоторой точки $(x, y, z) \in V$ удельную энергию упругой деформации или упругий потенциал можно представить в виде [107]:

$$w_e = \frac{S^2}{2K} + \frac{T^2}{2m}, \quad (2.15)$$

где S – среднее напряжение, действующее в окрестности рассматриваемой точки, МПа; T – интенсивность касательных напряжений МПа.

В результате математического моделирования для конкретных расчетных схем [108], установлено, что упругий потенциал зависит от квадрата коэффициента концентрации напряжений, от формы и размеров предельно напряженной области потенциального очага динамического явления.

Длительность основной фазы выбросов, по данным сейсмоакустических исследований [67, 109, 110], изменяется от 1 до 26 с при сотрясательном взрывании и от 8 до 47 с при выемочных работах и бурении, в то время как продолжительность горных ударов изменяется в пределах 1-3 с [111]. То есть, скорость разрушения при выбросах на порядок меньше, чем при хрупком разрушении в виде горного удара [98].

Так, если горный удар происходит только за счет высвобождения энергии упругих деформаций сильно напряженного массива, а прорыв пльвуна – за счет действия газа или воды, насыщающих грунт, то внезапные выбросы происходят в результате совместного действия напряжений и газа. При этом сложность познания механизма выбросов заключается в том, что роль газа и напряжений может проявляться по-разному в зависимости от условий высвобождения энергии в массиве и стадии развития процесса [98].

На основе шахтных исследований установлено [98], что характерной особенностью выбросоопасных угольных пластов является высокая изменчивость длины области предельного состояния пласта впереди забоя, приводящая к периодическому созданию высоких выбросоопасных градиентов напряжений и давления газа в краевой части пластов и к уменьшению величины разгруженной и дегазированной зоны.

В краевой части угольного пласта параметр вида напряженного состояния А.Н. Ставрогина $C = s_3 / s_1$ [112] может изменяться от 1 до 0, а параметр Надаи-Лодэ $m_s = (2s_2 - s_3 - s_1) / (s_1 - s_3)$ [113] – от 1 до -1. При этом, как это следует из теории прочности горных пород А.Н. Ставрогина и как показали экспериментальные исследования, происходит разрушение с образованием трещин сдвига и отрыва.

Применительно к динамическим формам разрушения краевых частей угольных пластов возможно использование достаточно общего подхода, согласно которому под потерей устойчивости при разрушении может пониматься спонтанный переход от одного состояния равновесия к другому, вызванный малыми отклонениями от исходного состояния равновесия при неизменных

внешних условиях. Конкретное развитие этого подхода к понятию устойчивости или неустойчивости применительно к проблеме горных ударов шло на основе использования теоретической модели и математического аппарата линейной механики разрушения [114], а применительно к проблеме внезапных выбросов – на основе данных натуральных наблюдений закономерностей изменения напряженного состояния в краевой части выбросоопасных угольных пластов и физического моделирования процесса лавинного разрушения совместным действием механических напряжений и газа [115].

А.М. Линьковым [116] при рассмотрении устойчивости состояния равновесия прилегающих к горной выработке пород сформулировано условие неустойчивости, распространяющее на задачи горной геомеханики энергетический критерий Гриффитса, хорошо себя зарекомендовавший в теории трещин:

$$-\Delta\dot{Y}_1 \geq 2\dot{Y}_{\max} \Delta S_1, \quad (2.16)$$

где $\Delta\dot{Y}_1$ – энергия, освобождаемая из пород при увеличении поверхности почвы выработки на ΔS_1 ; $2\dot{Y}_{\max}$ – максимальная энергия на единицу сечения, которая может быть поглощена разрушаемым материалом.

Условие (2.14) рассуждениями, в значительной степени подобными применяемым в механике хрупкого разрушения, приводится к виду, сходному с критерием Дж. Ирвина в теории трещин и содержащему коэффициент интенсивности нормальных напряжений:

$$(1 - n_1^2) k_1^2 / E_1 \geq 2\mathcal{E}_1, \quad (2.17)$$

где n_1 , E_1 – коэффициент Пуассона и модуль упругости вмещающих пород; k_1 – коэффициент интенсивности напряжений в точке выработки, где определяется устойчивость.

Аналогия с теорией трещин определяется по мнению А.М. Линькова [98], общностью сути явления: в обоих случаях потеря устойчивости происходит за счет упругой энергии больших объемов деформированного материала и обусловлена ограниченностью энергии, которая может быть поглощена в пластических зонах. В принципе можно согласиться с таким определением и возможностью применения условий (2.14) и (2.15) для решения ряда задач геомеханики и проблемы горных ударов. Однако условия (2.14) и (2.15) все же не соответствуют реальной модели выбросоопасной ситуации, так как в них не учитывается газовый фактор, являющийся определяющим для внезапных выбросов угля и газа, происходящих не только за счет упругой энергии, но и за счет энергии газа.

Несомненный интерес представляют работы А.В. Шестопалова, например [116]. В соответствии с представлениями автора, новой областью применения синергетики стала механика горных пород на больших глубинах, где начинает проявляться самопроизвольное разрушение краевой части породного массива. Альтернативный механизм начинает преобладать на больших глубинах, т.е. ниже границы газового выветривания, где становится возможным саморазрушение краевой части угольного пласта. Система «горный массив – выработка (полость)» - открытая система и, на больших глубинах может быть сильно удалена от своего механического равновесия. Образование зоны отжима автором интерпретируется как образование диссипативных структур. По данным работы [116], механизм выброса угля и газа состоит из 2-х основных частей: 1) разупрочнения под действием горного давления, и затем газового и 2) разрушения разупрочненной области под действием газового давления или давления веса разупрочненного угля на крутопадающих пластах (близких к вертикальному залеганию) или того и другого совместно. И другого возможного давления, например при выполнении технологических операций – давления жидкости или гидровывыве полости, давления воздуха при продувке во время бурения шпуров и т.п. Инициатором является первая часть процесса, а затем обе части процесса протекают одновременно. Измельчение угольного вещества до суперме-

лонитов и выделение больших количеств газа происходит в результате того же процесса (части процессового фрактала), но протекающего на мезо-, и микро-уровне.

Существование обратной связи между склонностью шахтопласта к обрушению кровли и вероятностью развития выбросоопасных ситуаций, что особенно характерно для шахт Центрального района Донбасса, отмечалось неоднократно рядом исследователей [117-119]. Так, по данным работы [118], свыше 70% выбросов зарегистрировано на шахтопластах, где произошло не более двух завалов в очистных выработках, т.е. отмечается приуроченность участков с наиболее активной газодинамической опасностью угольного массива с труднообрушаемыми кровлями. Отмеченные факты позволяют сделать вывод о том, что существенную роль в формировании выбросоопасных ситуаций кроме непосредственного состояния самого угольного массива и влияния технологии выемки угля, играют вмещающие пласт породы, их монолитность и устойчивость.

Образование горной выработки в напряженном массиве горных пород означает, что силы горного давления до того располагавшиеся хаотически и компенсировавшие друг друга, теперь направлены в горную выработку. Образовавшаяся система «породный массив – выработка» на больших глубинах оказывается сильно удаленной от своего механического равновесия [120]. Система восстанавливает утраченное равновесие путем создания в краевой части массива зоны разупрочнения. Последняя, подбучивает неразупрочненный массив, т.е. создает силу противодействия и таким образом восстанавливает утраченное равновесие. В краевой части массива наступает состояние, которое в традиционной геомеханике называется «напряженно-деформированным» и которое ею и изучается. По представлениям А.В. Шестопалова [121, 122] горная выработка является «стоком», к которому устремляются потоки механической энергии (силы горного давления). Далее в своих работах автор приводит достаточно пространные рассуждения о механизме ГДЯ, основанные на общефизических представлениях с привлечением некоторых элементов синергетики. Однако практических выводов, рекомендаций, или же какой-либо, хоть в некоторой

степени новой теории, позволяющей принципиально по-новому изучать эти процессы он не приводит.

2.4. Критерии и методы оценки и прогноза выбросоопасности

В 1928 г. С. Бубнов [78] первым указал на то, что причину выбросов следует искать не в особенно высокой поглотительной способности угля, а в колебаниях скорости газовыделения из него. Он же заметил, что переход от крепкого к мягкому углю может служить индикатором опасности внезапных выбросов.

По данным работы [52], количественная оценка газового фактора и определение величины безопасного давления с точки зрения вероятности возникновения ГДЯ, могут быть произведены с позиций устойчивости угольного пласта [123]. Согласно этому подходу, пласт считается опасным, если показатель выбросоопасности имеет вид:

$$A_g = (I - 1,6)(\Delta U - 600) - 150 \geq 0, \quad (2.18)$$

где I – коэффициент нагруженности; ΔU – изменение внутренней энергии газа.

Изменение внутренней энергии газа определяется по формуле [52, 123]:

$$\Delta U = \frac{RT}{g-1} \cdot \frac{V \cdot 10^6}{22414} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{g-1}{g}} \right], \quad (2.19)$$

где g – показатель адиабаты, $g = 1,31$; P_2 – начальное давление газа, кгс/см²; P_1 – конечное давление газа, кгс/см².

Прогноз опасности возникновения ГДЯ производится на стадии ведения геологоразведочных работ, перед вскрытием пластов горными выработками и в

процессе проведения подготовительных выработок и в процессе ведения очистных работ [124].

Прогноз при геологоразведочных работах производится для оценки потенциальной выбросоопасности и удароопасности угольных пластов и выбросоопасности пород по комплексу показателей, индивидуальных для каждого вида явления и определяемых по керновому материалу [124, 125]. Полученные результаты используются при разработке проектно-сметной документации на строительство новых шахт и горизонтов, что позволяет еще на стадии проектирования предусматривать меры борьбы с этими явлениями и материально-трудовые затраты на их осуществление.

Прогноз возможности прорывов метана из почвы выработок по данным геологоразведки согласно «Инструкции...» [126], в сущности лишь декларируется [124], поскольку практическое осуществление его с помощью ЭВМ, как это предусмотрено, проблематично из-за отсутствия нормативного решения организационно-технических вопросов и программного обеспечения.

Возможность прогноза склонности шахтопластов к таким ГДЯ, как внезапные обрушения (высыпания) и выдавливания (отжимы) угля по данным геологоразведочных работ до настоящего времени не изучена и ведение такого прогноза действующими нормативными документами вообще не регламентируется, что требует постановки специальных исследований [124].

Прогноз ГДЯ в местах вскрытия пластов горными выработками ведется лишь на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа, по показателям согласно [97], характеризующим возможность возникновения этих явлений. Многолетний опыт применения такого прогноза подтверждает приемлемую для практики его надежность [124, 125]. Однако необходимость отбора проб угля и породы и анализа их в лабораторных условиях снижает оперативность получения исходных данных для прогноза, что сдерживает темпы проведения горных выработок. Для устранения этого недостатка целесообразно использовать экспресс-метод прогноза выбросоопасности угольных пластов и пород непосредственно в забоях вскрываемых выработок.

Прогноз внезапных прорывов метана перед вскрытием угольных пластов горными выработками хотя и предусматривается [126], но не ведется по тем же причинам, что и при геологоразведочных работах [124].

Прогноз других ГДЯ (горных ударов, внезапных выдавливаний и обрушений угля) в месте вскрытия пластов нормативными документами не предусматривается [124]. Это оправданно в отношении горных ударов и выдавливаний угля, поскольку в таких условиях не произошло ни одного из явлений за всю историю разработки угольных пластов.

Что касается внезапных обрушений угля, то прогноз их при вскрытии пластов, особенно крутых, необходим, поскольку, как показала практика, вероятность этих явлений весьма высокая и не принятие своевременных мер борьбы с ними приводит нередко к катастрофическим последствиям [124].

Прогноз газодинамической активности пластов в процессе проведения подготовительных выработок и ведении очистных работ, получивший название «текущий прогноз», является наиболее распространенным и предназначен для выявления зон, опасных по ГДЯ [124]. Многообразие этих явлений и гипотез о причинах их возникновения с конкурирующими доказательствами преобладающей роли того или иного фактора породило множество способов текущего прогноза [126-127]. Причем, даже для одного и того же явления существуют различные методы и показатели прогноза, но область применения их не регламентируется. Так, прогноз выбросоопасных зон в угольных пластах производится по начальной скорости газовыделения из шпуров, по акустической эмиссии (АЭ) из массива и по прочностным характеристикам угля; выбросоопасности пород – по делению кернов на диски, по показателю структурно-петрографических свойств песчаников, по величине эффективной поверхностной энергии и по акустическим сигналам, возбуждаемым в массиве; внезапных обрушений угля – по его прочностным характеристикам или по АЭ; удароопасности – по объемному выходу буровой мелочи из шпуров и ее фракционному составу; прорывов метана – по резонансным частотам искусственно возбуждаемых акустических сигналов. В тоже время, методов прогноза зон, опасных

по внезапным выдавливаниям угля, не существует [124]. Близким по назначению и содержанию к методам прогноза выбросоопасности угольных пластов является способ контроля эффективности противовыбросных мероприятий по динамике изменения начальной скорости газовыделения из шпуров, определяющей величину разгруженной призабойной части пласта. Контроля эффективности мер предотвращения других ГДЯ вообще не предусматривается, что с точки зрения обеспечения безопасности ведения горных работ после выполнения этих мер не допустимо.

По данным работы [128], проявление внезапных выбросов неравномерно по площади и в геологическом разрезе. Для Донецкого бассейна установлено [129], что в региональном плане выделяются 3 области.

Наряду с региональной зональностью существует локальная зональность проявления выбросов угля и газа [129-131]. Ширина локальных зон по простиранию изменяется от нескольких десятков метров до нескольких километров [132].

Установлена взаимосвязь выбросоопасности угольных пластов с генетическим типом углей по восстановленности [132, 133].

Изучение ряда свойств разновосстановленных углей показало [128], что они существенно различны по содержанию серы, сорбционной метаноёмкости и природной газоносности, особенностям молекулярной структуры (по количеству парамагнитных центров (ПМЦ), тангенсу угла диэлектрических потерь $tg d$), анизотропии отражательной способности витринита, градиенту его изменения.

Большое влияние на устойчивость угольных пластов оказывают степень тектонической нарушенности (препарации) и структура угля [128]. Обследование угольных пластов выявило вполне определенную зависимость их выбросоопасности от степени препарации [68]. С увеличением коэффициента препарации выбросоопасность угольных пластов возрастает, и наоборот. Коэффициент препарации угольных пластов, опасных по выбросам, приблизительно в 2,5 раза больше, чем у неопасных пластов. Большинство угольных пластов, опасных по

выбросам, имеет коэффициент нарушенности более 0,4; у большинства неопасных угольных шахтопластов коэффициент нарушенности менее 0,1.

По данным В.Е. Забигаило [128], Г.Н. Фейта, Б.М. Иванова [134-136], выбросы угля и газа происходят на углях со следующими характеристиками: предел прочности на сжатие: 0,7-7,5 МПа; предел прочности на растяжение: 0,015-0,28 МПа; модуль упругости при сжатии $(0,3-3,8) \cdot 10^3$ МПа; реологический параметр: 0,04-0,13; модуль упругости при изгибе $(0,5-0,9) \cdot 10^2$ МПа; реологический параметр (при изгибе) 0,3-0,4; коэффициент неупругого сопротивления 0,4-0,6; коэффициент Пуассона 0,3-0,45.

По данным работы [128], наличие в угле газа существенно изменяет механические характеристики угля и энергетические параметры его разрушения. Установлено, что для одних и тех же углей максимальные деформации, предшествующие разрушению, при газонасыщении меньше на 40 %, удельная работа разрушения уменьшается на 48-60 %; показатель разупрочнения, характеризуемый тангенсом угла наклона касательной к ниспадающей ветви кривой напряжение-деформация, увеличивается почти в 1,7 раза. Выбросоопасные угли имеют акустическую активность, в 1,5-2 раза большую, чем неопасные [109].

В качестве одного из методов оценки влияния способов управления горным давлением и принятой технологии выемки угля в лаве на снижение или повышение выбросоопасности массива с дифференциацией причин этого может быть принят комплексный критерий, предложенный в работе [137]. Этот критерий выбросоопасности, по мнению авторов [137-139] может вполне раздельно оценивать влияние горного давления и газа, свойств пласта и характер выбросоопасности под действием природных и технологических факторов:

$$B = \left(0,3 \frac{K_s S_{gH}}{R_{сж}} + \frac{P}{R_p} \right) \frac{l_*}{l_k}, \quad (2.20)$$

где K_s – коэффициент относительной концентрации напряжений; S_{gH} – среднее напряжение в массиве на данной глубине, МПа; $R_{сж}$ и R_p – пределы прочности

угля на сжатие и растяжение (средневзвешенное значение для пласта), МПа; P – наибольшее давление газа в пласте на данной глубине от поверхности, замеренное в скважине через породную толщу, МПа; l_* – сменное подвигание забоя, м; l_k – расстояние от кромки пласта до области максимальной концентрации напряжений (длина области спада напряжений и дегазации в краевой части пласта).

Опыт ведения горных работ показывает, что наибольшие значения неравномерности скоростей сдвижения наблюдаются обычно в зонах зависания породных консолей в очистном пространстве, например, в зонах расположения бутовых полос и других местах с плохо обрушаемой кровлей. Отсутствие зависаний породных консолей на отдельных участках очистного забоя, в свою очередь будет обеспечивать равномерное сдвижение массива и, следовательно, исключение дополнительных зон с повышенными концентрациями выбросоопасности в забое [116]. Поэтому актуально решение вопросов увязки изменения неравномерности сближения пород кровли почвы в призабойном пространстве при выемке угля разными выемочными механизмами, наличия бутовых полос, других зон неравномерного обрушения породных консолей и влияния всех этих факторов на зональную выбросоопасность вдоль линии очистного забоя в процессе его перемещения по мере образования следующей породной консоли кровли [138].

В соответствии с исследованиями, выполненными в работе [139], установлено, что ситуациям, предшествующим развязыванию выбросов угля и газа, как правило, сопутствует сближение кровли и почвы пласта, носящее ударообразный характер. Причем критическая скорость V_y^* сближения кровли и почвы пласта определяется эмпирической формулой:

$$V_y^* \geq I \cdot V_{н.к.} \left(1 - \frac{l}{L_D} \right), \quad (2.21)$$

где $V_{н.к.}$ – скорость перехода кромки пласта в предельное состояние; l – расстояние от кромки пласта; $L_{Д}$ – протяженность зоны деформаций пласта; $I = m/(1 - m)$.

Критические скорости ударообразных сближений вмещающих пласт пород для усредненных условий Донбасса, согласно расчетам А.А. Борисенко [139], составляют на кромке пласта $22,1 \cdot 10^{-2}$ м/с, на границе зоны предельного состояния – $16,6 \cdot 10^{-2}$ м/с. Обычно при ударообразных сближениях вмещающих пласт пород условие накопления пластом критических значений потенциальной энергии обеспечивается достаточно часто, поскольку фактические скорости ударообразных сближений составляют порядка $(18 - 25) \cdot 10^{-2}$ м/с [138].

Рациональная технология применения противовыбросных мероприятий заключается в первоначальном выявлении методом прогноза выбросоопасных зон и в последующем применении способов предотвращения выбросов только в опасных зонах, установленных прогнозом [140]. При этом, во всех случаях применения региональных и локальных способов предотвращения внезапных выбросов должен осуществляться контроль их эффективности.

По данным [141], эффективность применяемых методов прогноза в связи с возросшими в несколько раз скоростями проходки и отработки угольных пластов в настоящее время недостаточна. Необходимость разработки и применения методов прогноза объясняется еще и тем, что площадь реальной выбросоопасности на опасных пластах не превышает, как правило, 10-15%, и лишь на отдельных (в основном на пластах крутого падения) составляет 25 – 30% общей площади обрабатываемого шахтопласта.

Из всех физических предвестников, которые могут быть использованы для прогноза выбросоопасных зон, наиболее предпочтительными, с точки зрения перспектив автоматизации, являются параметры аэрогазового и сейсмоакустического состояния призабойного массива, комплексно характеризующие напряженно-деформированное состояние призабойного массива, газосодержание, физико-механические и коллекторские свойства угля и вмещающих пород,

структуру и строение угленосной толщи и их реакцию на технологическое воздействие.

Метод локального прогнозирования основан на определении из горных выработок признаков выбросоопасности пластов [142]. Он используется для уточнения данных регионального прогноза и деления угольных шахтопластов на выбросоопасные, угрожаемые и неопасные по горизонтам.

Методы текущего прогнозирования опасных и неопасных зон правильнее называть «методами определения фактического выбросоопасного состояния призабойной части угольного пласта», так как на показатели выбросоопасности, устанавливаемые по геологическим факторам, существенное влияние оказывают технологические показатели, а также способы предотвращения внезапных выбросов.

В последние годы разработаны и находятся в стадии экспериментальных исследований и проверки ряд способов, наиболее проработанными из которых являются следующие.

Электрометрический способ оценки состояния массива [143].

В его основе лежит контроль удельного электрического сопротивления породы. Основным его недостатком является непостоянство переходного электрического сопротивления между электродами и горной породой, вследствие чего в результаты измерений вносятся существенные искажения.

Электрометрическим критерием состояния массива является изменение удельного электрического сопротивления на контролируемом участке массива большего допустимого предела:

$$K_9 > |r_o - r_i|, \quad (2.22)$$

где r_o и r_i – удельные электрические сопротивления невыбросоопасного и выбросоопасного пластов соответственно; K_9 – допустимая критериальная величина.

Так как удельное электрическое сопротивление горных пород зависит от набора факторов: плотности пород, их трещиноватости, минерального состава, влажности и т.д., то на практике использовать такой критерий весьма сложно из-за необходимости каждый раз учитывать для каждой породы все указанные выше зависимости.

Магнитный [143], основанный на изменении магнитных свойств горных пород в зависимости от изменения напряженности в массиве и его физико-механических свойств.

Основным достоинством данного способа является возможность ведения непрерывного контроля НДС массива без нарушения его сплошности.

Критерием оценки степени выбросоопасности горных пород по магнитным параметрам является отношение

$$K_m = \frac{m_i}{m_o}, \quad (2.23)$$

где m_b и m_t – магнитная проницаемость контролируемого и невыбросоопасного участков массива.

Однако, в настоящее время отсутствуют данные для количественной оценки связи магнитных параметров и характеризующих состояния массива.

Радиоволновые [143] методы измерений обладают теми же достоинствами и недостатками, что и магнитные.

Радиоволновой критерий основан на измерении параметров радиоволн, прошедших через горный массив. Аппаратура для реализации данных методов сложна и громоздка.

Способ оценки выбросоопасности по электромагнитной эмиссии [144] основан на регистрации возникающих при зарождении и росте трещин электромагнитных импульсов. Основным препятствием для его реализации является высокий уровень помех в действующей шахте.

Тепловой метод [143] позволяет оценивать НДС горного массива по данным терморазведки. Основой теплового критерия является дифференцированность горных пород по теплопроводности, выделению избыточной теплоты по зонам трещиноватости, выделения глубинного теплового потока при увеличении напряженности в массиве. Недостатком критерия является возможность только точечных измерений.

Активно применяются методы, основанные на измерении скорости газовой выделения метана из шпура [145, 146].

К их числу относятся, прежде всего, нормативные методы: определение величины зоны разгрузки и текущий контроль выбросоопасности по начальной скорости газовой выделения из шпура.

Критерием выбросоопасности по газовой выделению из шпура является превышение этим показателем некоторой критической величины газовой выделения, которая зависит от марки угля и принимается в зависимости от выхода летучих веществ (V^{daf}):

при V^{daf} менее 15% - 5 л/мин.

при V^{daf} от 15 до 20% - 4,5 л/мин.

при V^{daf} от 20 до 30% - 4,0 л/мин.

при V^{daf} свыше 30% - 4,5 л/мин.

Эти методы, наряду с преимуществами, имеют и недостатки: низкая технологичность, влияние локальных неоднородностей.

Известен метод прогноза выбросоопасности, основанный на измерении концентрации метана в горной выработке. Известно, что каждый участок массива имеет свою газоносность. Газ, выделяющийся в выработку при разрушении газонасыщенных пород, изменяет свою концентрацию в шахтной атмосфере. Учитывая то, что проветривание тупиковых выработок, которыми являются проходческие забои, происходит при постоянном расходе воздуха, по концентрации газа можно судить о газоносности горного массива, которая является одним из факторов, обуславливающим его выбросоопасность.

Критерием выбросоопасности по газовому фактору здесь является превышение величины показателя текущего замера концентрации газа в выработке над установившимся или базовым уровнем концентрации на определенную величину в течение выбранного промежутка времени.

Кроме того, по данным работы [88], опасность по внезапным выбросам угольных пластов и отдельных их участков нельзя установить по сорбционной емкости углей. Это еще раз подтверждает вывод о том, что газоемкость углей не может быть использована для разграничения пластов на опасные и неопасные.

Внезапный выброс угля и газа, рассматриваемый в качестве процесса разрушения угольного массива, возникает в какой-то ограниченной области при сочетании определенных природных и горнотехнических условий и развивается в пространстве и времени. Большое прогностическое значение представляет изучение процессов разрушения, предваряющих явления внезапных выбросов.

Разрушение любых горных пород, и в частности, угольных пластов, сопровождается волновыми процессами. Регистрация акустических импульсов используется для текущего прогнозирования внезапных выбросов угля и газа сейсмоакустическим методом.

Наиболее перспективными методами контроля состояния горного массива являются акустические методы. Они основываются на исследовании как естественных акустических полей, возникающих в массиве при образовании трещин и разрывов (пассивная сейсмоакустика), так и искусственно созданных полей упругих колебаний (активная сейсмоакустика).

Опасные пласты в сравнении с неопасными отличаются низкой проницаемостью углей в массиве и более высокой проницаемостью при их интенсивной разгрузке и разрушении. Если первая особенность способствует сохранению перепада газового давления в призабойной части угольного пласта на более высоком уровне, то вторая особенность вызывает интенсивное газовыделение в разрушенном угле. Как первая, так и вторая способствуют внезапным вы-

бросам угля и газа. Это не только хорошо согласуется с современными взглядами [32], но и в определенной степени дополняет их [88].

К методам пассивной сейсмоакустики относится представляющий интерес метод акустического последействия, включающий регистрацию и анализ импульсов, характеризующих трещинообразование после окончания технологического воздействия. Использование информативных параметров этого метода последействия для оценки состояния массива возможно, поскольку активность АЭ является реакцией забоя на технологическое воздействие. Преимуществом этого метода является то, что в этот период времени отсутствуют акустические помехи, сопровождающие работы в шахте.

Признаком входа забоя в опасную зону является регистрация одного из двух возможных критериев: «двух точек» или «критического превышения».

Критерий «двух точек» – это возрастание средней в двух последовательных интервалах осреднения сейсмоактивности, удовлетворяющее следующим условиям:

$$\frac{\bar{N}_{k+1} - \bar{N}_k}{\bar{N}_k} \times 100 \geq q \geq c, \quad (2.24)$$

где $q = 5\%$ при $\bar{N}_{k+1} \geq 10$ имп/ч; $q = 10\%$ при $\bar{N}_{k+1} \leq 10$ имп/ч; $c = 2$ имп/ч, c – уровень активности, ниже которого критерий «двух точек» не действует; \bar{N}_{k+1} – число импульсов АЭ.

Критерий «критического превышения» должен удовлетворять следующему условию:

$$N_{kp} \geq P \cdot \bar{N}_k, \quad (2.25)$$

где N_{kp} – активность, при регистрации которой выдается прогноз «опасно»; P – коэффициент, зависящий от \bar{N}_k .

В последние годы широкое распространение получили методы активной сейсмоакустики, основанные на регистрации и анализе сейсмоакустического сигнала, возбуждаемого в массиве путем технологического воздействия, которые более информативны.

Одним из наиболее перспективных является способ прогноза состояния массива при помощи аппаратуры АК-1. Он основан на сопоставлении интенсивностей высокочастотной и низкочастотной составляющих спектра, которые выделяются путем фильтрации сигнала, получаемого из массива. Критерием для определения состояния массива служит показатель $K = A_g/A_n$, определяющий отношение амплитуды высокочастотной составляющей спектра A_g к амплитуде низкочастотной составляющей A_n .

Преимуществами способа являются высокая технологичность и оперативность контроля НДС массива, при этом осуществляется автоматический режим обработки данных.

Контроль за состоянием массива осуществляется непрерывно, в процессе разрушения пород рабочим органом комбайна, причем он не нарушает основной технологический процесс, а ведется параллельно.

Аппаратура АК-1 позволяет выделить следующие зоны массива: при $0 < K < 2$ – неопасная зона; $2 < K < 3$ – переходная зона; $K > 3$ – опасная зона.

Данный способ и его критерии прошли проверку в шахтах Украины, России, Казахстана. Он рекомендован к использованию на предприятиях угольной промышленности Украины.

При проходке выработок в выбросоопасных песчаниках используют способ диагностики массива по делению керна на диски [53]. Здесь в направлении проходки бурят прогнозную керновую скважину. Образующийся керн извлекается, маркируется и подвергается анализу. Критерием оценки состояния массива служит количество дисков и кольцевых трещин в керновом материале.

Так, наличие более 30-40 выпукло-вогнутых дисков в 1 м керна свидетельствует о том, что скважина бурилась в породах высокой степени выбросоопасности.

При наличии в 1 м керна не более 20-30 дисков перемежающихся породными цилиндрами длиной 50-100 мм с характерными кольцевыми трещинами - зона средней степени опасности.

Выход кернов размером 150-200 мм и более, опоясанных трещинами и перемежаемых единичными дисками - зона невысокой степени опасности.

Если диски (кольцевые трещины) отсутствуют - зона невыбросоопасная.

Данный способ является нормативным и рекомендован к использованию. Недостатком его является необходимость вести прогнозное керновое бурение скважин с последующим анализом кернового материала. При этом основные процессы по проходке выработки останавливаются. Это существенно снижает темпы проходки выработок, требует дополнительного оборудования и трудовых затрат, что увеличивает стоимость угля.

Проведенный анализ способов контроля и прогноза состояния массива и критериев оценки этого состояния свидетельствует о том, что в настоящее время целесообразно использовать способы контроля по динамике газовыделения из шпуров, акустического контроля с использованием аппаратуры ЗУА и АК-1, которые являются наиболее проверенными и достоверными.

В работе [147] рассматривается определение физических условий формирования потенциальной опасности угольных пластов по различным типам ГДЯ с ростом глубины горных работ на основе оценки их геоэнергии по геолого-геофизическим данным. Для оценки геоэнергии пластов, состоящей из накопленной потенциальной энергии сжатия пласта W_y и энергии заключенного в нем газа W_a , используются следующие исходные данные: газоносность угольного пласта X , м³/т; кавернометрия пласта (d_{\max} , d_{\min} , $d_{\text{скг}}$, мм); глубина пластопересечения H , м; температура пласта T , градус; зольность A и влажность

W , %. Все перечисленные данные являются стандартными и имеются для всех разведанных шахтных полей и участков [148].

Важной частью осуществления прогноза ГДЯ на стадии эксплуатации месторождений является использование для этих целей экспресс-метода определения физико-механических свойств углей в забоях горных выработок [149]. В качестве показателей опасности забоев по ГДЯ используются показатели прочности, упругости и способности к газоотдаче угля, полученные экспресс-методом с помощью прочностномера П-1. Его действие основано на динамическом внедрении в угольный массив конического пуансона (пробника), получающего определенную энергию удара от пружинного механизма. В качестве основной характеристики прочности угля в забое используется величина внедрения пуансона в обнаженную поверхность забоя. Физико-механические свойства угля в месте измерения (пределы прочности при сжатии, сдвиге и разрыве, модуль упругости и коэффициент газоотдачи) определяются по экспериментальным зависимостям, установленным для углей всех стадий метаморфизма. Как отмечается в [148], автоматизированный прогноз, основанный на непрерывном контроле акустического сигнала из породного массива, более объективен. Так, по результатам применения автоматизированного прогноза выбросоопасных зон на шахтах Кузнецкого и Карагандинского бассейнов, в работе [148] сделан вывод о том, что из 81 «опасной» по нормативному прогнозу зоны признаки опасности и внезапный выброс угля и газа зарегистрированы лишь в 30, а при применении автоматизированного прогноза – во всех 90 «опасных» по автоматизированному прогнозу зонах.

По данным [98] на стадии подготовки и развязывания внезапного выброса следует различать два вида разрушения.

На первой, подготовительной стадии внезапного выброса, которая обязательно переходит в выброс, происходит медленное разрушение в виде трещинообразования в призабойной зоне угольного пласта. Условие такого разрушения описывается теорией прочности Кулона-Мора.

На второй стадии развязывания внезапного выброса происходит лавинное разрушение с выбросом при совместном действии механических напряжений и давления газа. Определяющим механизмом разрушения в этом случае является разрушение отрывом под действием газа. На основе физического моделирования и теории размерностей определен критерий оценки лавинного разрушения газоносного угля. Критерий выражен в виде двух безразмерных отношений определяющих параметров внутривещного давления газа P , максимального S_1 и минимального S_3 напряжений и физико-механических свойств угля $S_p, S_{сж}, m_0$, учитывающих совместное действие газа и горного давления в процессе разрушения, а также условия разрушения отрывом и сдвигом:

$$a_1(P \cdot m_0 - |S_3|) / S_p + a_2 S_1 / S_c \geq 1, \quad (2.26)$$

где a_1 и a_2 – экспериментально определяемые коэффициенты, характеризующие вязкость разрушения; S_c и S_p – пределы прочности на одноосное сжатие и отрыв; m_0 – коэффициент пористости угля.

Основным вопросом теории формирования выбросоопасной ситуации в массиве и развязывания внезапного выброса является определение условия перехода от обычного вида разрушения, описываемого критерием Кулона-Мора, к лавинному, сопровождаемому выбросом. В качестве такого дополнительного условия принимается условие потери устойчивости некоторого объема газоносного угольного массива, прилегающего к забою выработки, вызванное быстрым изменением вида напряженного состояния вследствие подвигания забоя [98].

Критерием потери устойчивости является достижение критического значения градиента напряжений и давления газа в призабойной зоне угольного пласта с соответствующими физико-механическими свойствами. Критическое значение градиента определяется уровнем действующих напряжений S и давления газа P , длиной области спада напряжений в краевой части пласта l_k ,

глубиной заходки при выемке l_0 и физико-механическими свойствами пласта ($s_p, s_{сж}, m_0, k_v$) и может быть определено комплексным критерием, состоящим из трех безразмерных параметров, имеющих вид [98]:

$$\left[a_1 (P \cdot m_0 - |s_3|) / s_p + a_2 s_1 / s_{сж} \right]_0 k_v / l_k = B \geq 1, \quad (2.27)$$

где k_v – реологический коэффициент.

Два первых безразмерных параметра критерия характеризуют уровень напряжений и давления газа, а третий параметр – их градиент в призабойной зоне пласта в первый момент после образования новой свободной поверхности в результате выемки и подвигания забоя. В соответствии с типом ГДЯ свойства массива, от которых зависят условия возникновения явления и основные действующие силы, могут существенно различаться, что отражается на количественных значениях параметров, входящих в критерий, который может рассматриваться как обобщающее условие возникновения внезапного выброса.

В работе [88] предложена классификация методов прогноза выбросоопасности, в соответствии с которой наибольший интерес представляют так называемые моделирующие методы прогноза.

Существующими методами прогноза выбросоопасности изучаются свойства и состояние массива в остановленном забое (за исключением сейсмоакустического метода). Вследствие этого создается несоответствие: выбросоопасность изучается в забоях выработок, в которых в момент проведения наблюдений внезапные выбросы не реализуются. Поэтому существующие методы прогноза (за исключением сейсмоакустического метода) устанавливают лишь потенциальную выбросоопасность зон, которая в зависимости от конкретной горно-технической обстановки и ее изменения во времени может быть не реализована. Если на основании используемых в настоящее время показателей (начальная скорость газоотдачи по лабораторным пробам, коэффициент крепости угля, начальная скорость газовыделения из шпуров и др.), будет сделан вывод о

том, что пласт в месте опробования выбросоопасен, это, конечно, может не соответствовать реальной ситуации, поскольку, например, проведение горной выработки с очень малой скоростью и тем более прекращение ее проведения (в качестве крайнего случая) не могут вызвать развязывания внезапного выброса [88].

Второй недостаток существующих методов прогноза заключается в том, что принципы и показатели, используемые при прогнозе выбросоопасности, лишь косвенно связаны с характером процесса внезапного выброса и не позволяют углублять исследования в этом вопросе.

Применительно к методам прогноза выбросоопасности существует ряд требований, которые, по нашему мнению, достаточно хорошо изложены в работе [88]. Метод прогноза должен быть пригодным не только для установления выбросоопасных зон, но и для решения таких задач, как оценка эффективности способов борьбы с выбросами и установление приемлемости применяемой на выбросоопасных пластах технологии ведения горных работ. Метод должен дать однозначный ответ об опасности независимо от того, является ли, например, зона пласта невыбросоопасной по своей природе или же выбросоопасность устранена в результате предварительного применения специального способа борьбы с внезапными выбросами. Применяемые методы прогноза «не работают» и дают искаженные результаты в случае, если выбросоопасность снята в процессе применения способа борьбы с выбросами. Методы могут ошибочно показывать, что выбросоопасность пласта после применения способа не только не снизилась, а, наоборот, увеличилась. Например, такой распространенный показатель выбросоопасности, как начальная скорость газовыделения из стенок скважин и шпуров, намного увеличивается после отработки защитного пласта, хотя выбросоопасность защищаемого пласта полностью устраняется. Следовательно, методы прогноза, основанные на существующих принципах и показателях, оказываются непригодными для оценки эффективности способов борьбы с внезапными выбросами и применяемой на шахте технологии ведения горных работ. Это является третьим недостатком существующих методов.

Разрушение массива при внезапном выбросе угля и газа происходит под действием отбойки угля, инициирующей рассматриваемый процесс, и в результате действия природных сил – горного давления и давления газа, развязывающих и инициирующих этот процесс. Поэтому, чтобы избежать вышеуказанных недостатков при прогнозировании выбросоопасности, необходимо изучать состояние призабойной части пласта, во-первых, в момент отбойки угля, и во-вторых, с использованием таких показателей, которые характеризуют собой способность угольного массива разрушаться не только под действием отбойного органа, но и особенно в результате проявления горного давления и давления газа.

Так как сейсмоакустический метод является на сегодняшний день наиболее разработанным и перспективным, что объясняется возможностью неразрушающих испытаний при его использовании, рассмотрим более подробно данный метод.

Характеристиками сейсмоакустической активности угольного массива в призабойной его части являются [88]:

- амплитуда акустических импульсов A ;
- энергия акустических импульсов \mathcal{E} , отнесенная к определенному (характерному) отрезку времени;
- число импульсов N за определенный отрезок времени.

Характеристика N получила название шумности [88].

Для приближенного подсчета энергии сейсмоакустических процессов используется следующая формула [88]:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n A_i^2 T_i, \quad (2.28)$$

где A_i – последовательные значения снятых с осциллограмм амплитуд колебаний (одинарный размах); T_i – значения величин полупериодов, соответствующих амплитудам A_i ; n – число полупериодов в импульсе.

Использование акустических колебаний в качестве носителя информации о напряженном состоянии и структурной организации обрабатываемого породного массива является наиболее перспективным направлением при исследовании объектов средствами неразрушающего контроля. Это связано, в первую очередь, с тем, что энергия, которая передается при колебательном процессе, взаимодействует с внутренней энергией среды распространения. При этом изменениям подлежит целый ряд параметров акустического сигнала, что, в зависимости от поставленной задачи, позволяет анализировать те или другие его составляющие. Сложность заключается в том, что в качестве источника сигнала используется шум от работающих в выработке механизмов, то есть источник имеет случайные характеристики и постоянно изменяет свое положение в пространстве по отношению к приемнику акустического сигнала.

Таким образом, газодинамические явления в подземных горных выработках происходят в различных горно-геологических условиях, но чаще всего сопряжены с пересечением геологических разрывных нарушений или приближением выработки к ним. Количество факторов, провоцирующих выброс угля, породы, газа весьма велико: горное давление, сорбированный газ, темпы продвижения выработок, форма забоя, структура и текстура пород, трещиноватость и т.д. При этом доля участия каждого фактора неопределенна, а сам процесс подготовки и реализации выброса стохастичен по своей природе. Единой теории, объясняющей природу внезапных ГДЯ, на настоящий момент не существует. Наиболее технологичным способом прогноза ГДЯ является способ, основанный на регистрации и анализе искусственных акустических сигналов.

Поэтому, следующим этапом исследований ГДЯ является анализ процессов прохождения акустических волн через структурно неоднородный породный массив в окрестности горной выработки.

РАЗДЕЛ 3

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОХОЖДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЧЕРЕЗ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫЙ ПОРОДНЫЙ МАССИВ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Породный массив – это неоднородная по своей структуре и свойствам природная среда. С точки зрения подземной добычи полезных ископаемых он является весьма сложным и труднодоступным объектом, возможности диагностики свойств которого существенно ограничены.

Использование акустических колебаний в качестве информационного сигнала о нарушенности породного массива, локализации в нем аномальных зон и т. п., является, на сегодняшний день наиболее перспективным и отработанным методом исследований. Это связано с тем, что акустические волны в горных породах по своим размерам сопоставимы именно с теми неоднородностями и трещинами, которые, в первую очередь, ответственны за потерю устойчивости горной выработкой, возникновение ГДЯ. Кроме того, процессы распространения акустических волн в породном массиве хорошо коррелируют с процессами сдвижения слоев пород, развитием их трещиноватости.

С целью реализации оперативного акустического контроля участка породного массива со случайно распределенными дефектами при образовании в нем искусственных полостей (горных выработок), в соответствии с [199] можно выделить три основных уровня внутренних неоднородностей:

1. Микронеоднородности. Микронеоднородности относительно l , удовлетворяют условию $a \ll l$, где l - длина акустической волны, a - размер неоднородности. Эти неоднородности могут изучаться при рассмотрении процессов распространения колебаний в однородной среде (например, идеально упругие и дифференциально упругие многофазные среды).

2. Мезонеоднородности. Включают в себя структурную неоднородность массива (включения, трещины, зернистость), для которых справедливо $a \approx l$. Дифракция волн на этих неоднородностях приводит к рассеянию энергии вол-

нового поля; их воздействие выражается в изменении структуры и флуктуациях параметров сигнала. Имея размеры, сопоставимые с размерами длин акустических волн, изменение их формы, угла направления и т.п.

3. К макронеоднородностям относятся внутренние несовершенства, обладающие размерами, сопоставимыми с линейными размерами самого углепородного массива, которые возникли вследствие крупномасштабных тектонических процессов – сбросы, надвиги и т.п. К ним также относится слоистая структура, вызванная естественными процессами образования земной коры. Физико-механические характеристики слагающих слоев существенно различаются между собой. Исследованием этого типа неоднородностей занимается раздел геофизики, основанный на анализе упругих колебаний с достаточно большой длиной волны (сейсмических).

По данным работы [200], к неоднородностям мезоуровня можно отнести и силовые неоднородности. К таковым можно отнести, например, опорное давление – эксплуатационное, связанное с перемещающимся в пространстве забоем очистной выработки и стационарное, располагающееся у неподвижной границы очистной выработки. Техногенными «источниками» силовых неоднородностей являются также протяженные выработки, камеры, целики и другие возможные объекты, приводящие к возмущению поля напряжений в породном массиве.

Исходя из этих положений, мы можем ограничить поставленную задачу, выбрав в качестве инструмента исследования акустические колебания, имеющие такой диапазон длин волн, с которыми сопоставим размер определенного класса неоднородностей (мезонеоднородности) [201].

По данным [199], в настоящее время выявлен широкий класс так называемых структурно неоднородных сред, к которым необходимо отнести и горные породы, акустическая нелинейность которых демонстрирует аномально повышенный (по сравнению с однородными материалами) уровень, а структура характеризуется наличием различных включений типа зерен, пор, трещин и т.п. Именно такие включения-дефекты определяют нелинейные свойства среды.

Горные породы обладают сложной иерархической структурой, элементы которой обладают как релаксационными так и/или резонансными свойствами по отношению к распространению в них акустических колебаний. Известные работы, например [200] позволяют в обобщенном виде рассматривать поведение сред с такой структурой в состояниях, близких к термодинамическому равновесию. Однако, такой подход очень сложен, и что самое важное, не позволяя детально исследовать поведение горных пород в связи с тем, что на сегодняшний день все еще недостаточно исследовании акустических свойства их структурных элементов.

Не выяснен окончательно механизм распространения акустических колебаний в горных породах. По всей видимости, он включает в себя несколько параллельно идущих процессов:

- распространение акустических волн по твердой фазе горной породы, сопровождающееся дифракцией;
- поглощение и последующее испускание фононов структурными элементами породы;
- возникновение и/или развитие под действием акустических колебаний в породе трещин с их резонансным откликом на силовое воздействие.

Таким образом, целью настоящих исследований является аналитическое исследование процессов прохождения акустических волн через участок напряженного структурно неоднородного углепородного массива, ослабленного искусственно созданной полостью – горной выработкой.

3.1. Взаимосвязь параметров акустического сигнала с уровнем напряжений в углепородном массиве

На рис. 3.1 схематически показан участок углепородного массива в окрестности горной выработки. Как показали исследования [202], источником акустических колебаний при разрушении угольного забоя в исследуемой области спектра является не непосредственно рабочий орган механизированного комплекса, бурильного оборудования и т.п., а собственно процесс разрушения гор-

ных пород, вызываемый этим технологическим воздействием. При этом по данным работы [202], отклик трещины на силовое воздействие должен быть резонансным. Акустические колебания, возникающие в ходе этого процесса, распространяется от зоны первичного разрушения вглубь массива, до плоскости максимума опорного давления, от которой, по нашему мнению, они испытывают наибольшее отражение.

Рассмотрим вначале более подробно процесс распространения акустических волн в угольном пласте. На рис. 3.2 схематически представлен процесс распространения акустических колебаний в угольном пласте.

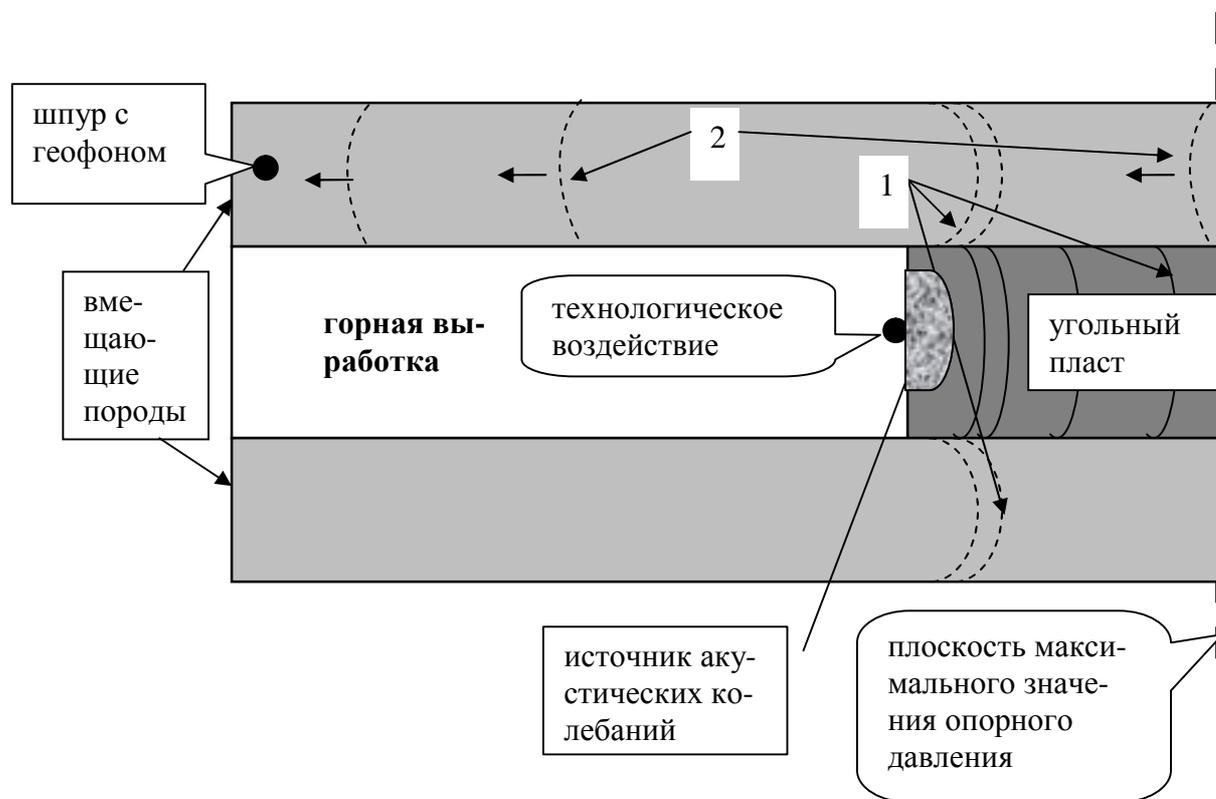


Рис. 3.1. Участок породного массива в окрестности горной выработки:

1 – акустические волны, распространяющиеся от источника колебаний; 2 – акустические волны, отраженные от плоскости максимального значения опорного давления (информационный акустический сигнал при осуществлении оперативной диагностики породного массива)

На рис. 3.2. показаны три характерные зоны влияния выработанного пространства на распределение напряжений впереди горной выработки, которые

отделены друг от друга толстыми штрихпунктирными линиями. Слабым пунктиром в зоне начального напряженного состояния показана волна, прошедшая через плоскость максимума опорного давления, и уходящая на бесконечность. Акустические колебания распространяются от источника колебаний (зоны первичного разрушения пород в призабойной области) по угольному пласту. Последний, в данном случае, можно приближенно рассматривать как акустический волновод, ограниченный сверху и снизу кровлей и почвой выработки, состоящих соответственно из пород значительно отличающимися по физико-механическим свойствам от аналогичных свойств угольного пласта. Степень неидеальности границ отражающих поверхностей такого волновода определяется различием их коэффициентов крепости, которое в предельном случае, составляет около 10 раз [201].

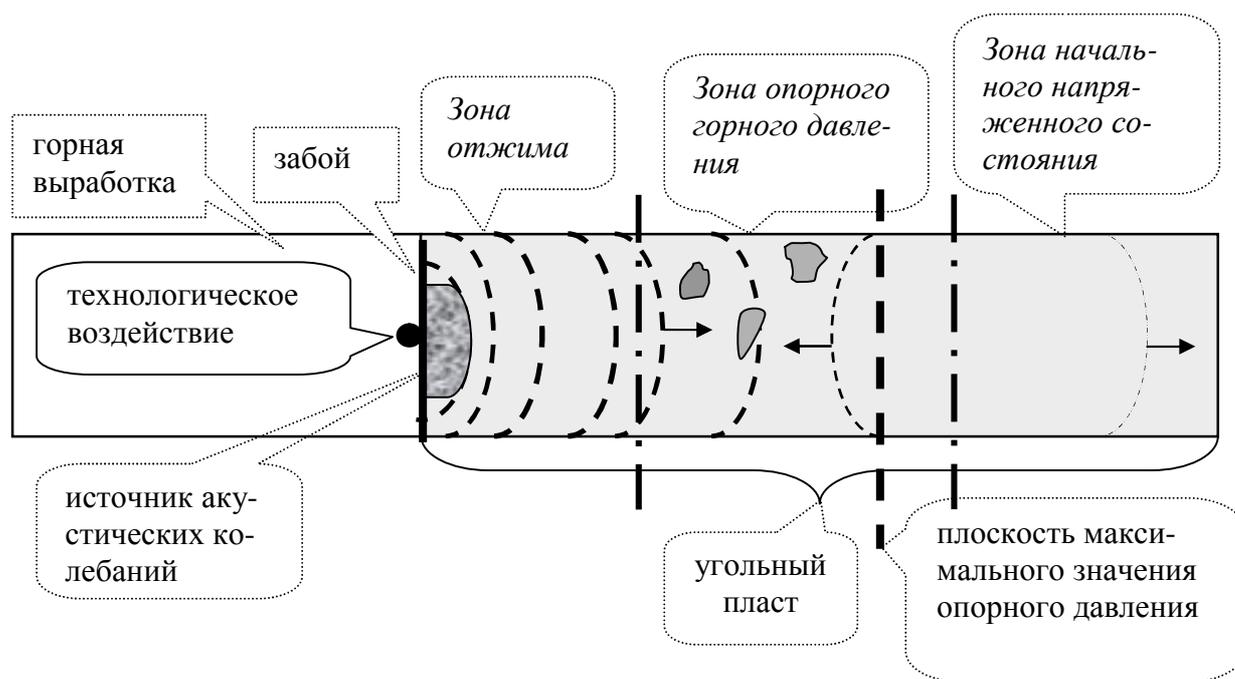


Рис. 3.2. Процесс распространения акустических колебаний в угольном пласте; области неправильной формы темно-серого цвета в зоне опорного давления – неоднородности

Возбужденные в призабойной области акустические колебания по мере распространения вглубь массива проходят через среду с переменными параметрами, причем изменения напряжений в этой среде соответствуют параметрам

рам эпюры напряжений, а ее протяженность – простирацию зоны повышенного горного давления. Максимальная протяженность этой зоны для невыбросоопасных угольных пластов составляет 120 м [201].

На основе решения обратной задачи активного прозвучивания слоистой среды показано [203], что разрывные нарушения могут выступать в качестве индикатора напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Основой такого подхода (чувствительность которого, по проведенным оценкам, в 3 - 5 раз выше, чем при контроле напряжений на основе изменения скорости волн в породном массиве) служит нелинейный характер зависимости $s_i = s_i(P_i)$, описывающей связь «напряжение – конвергенция» берегов вдоль разрывных нарушений. Практическое применение полученного результата связано с мониторингом напряженного состояния породных массивов на основе анализа изменения жесткости межслоевых контактов K_i (рис. 3.3), а также определения их числовых значений.

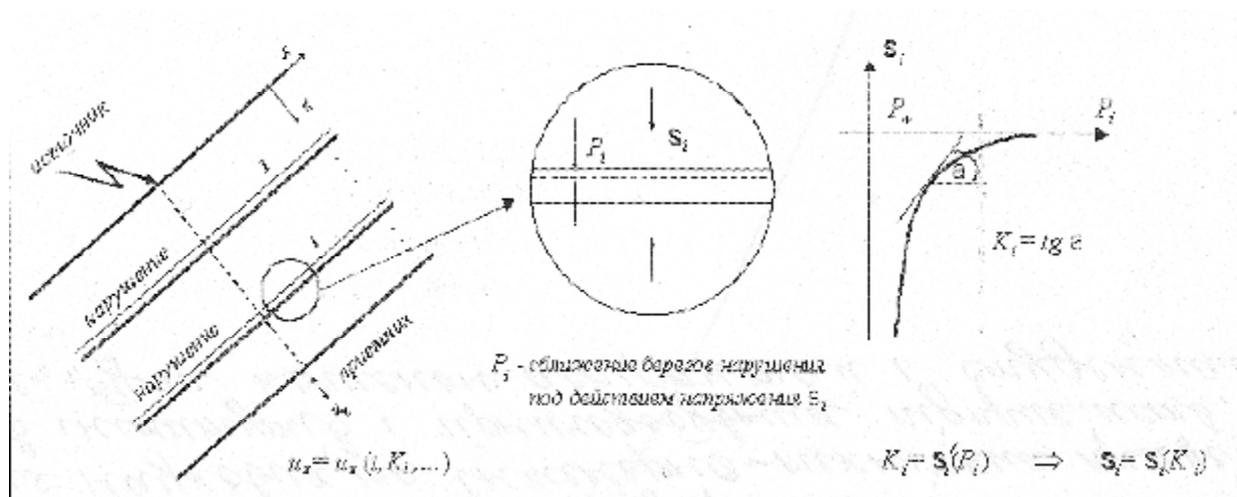


Рис. 3.3. Схема прозвучивания слоистого массива для мониторинга поля напряжений

При распространении единичной акустической волны в среде имеет место так называемое трассовое затухание, которое обусловлено диссипативными потерями на неоднородностях [201]. Породный массив является средой с силь-

но выраженными диссипативными свойствами, в которой имеет место значительное поглощение колебаний любой природы. Ссылаясь на результаты работ [203, 204], можно утверждать, что затухание акустических волн в породном массиве происходит вследствие их рассеивания и дифракции на структурных неоднородностях породы, и вследствие прохождения через зоны концентрации напряжений.

Трассовое затухание правильнее всего можно выразить через постоянную затухания a_L на единицу длины пути z [206]:

$$A = A_0 \exp(-a_L \cdot z) \sin(b \cdot z - w_i \cdot t),$$

где $b = \frac{2p \cdot w}{c}$ - постоянная распространения.

В работе [203] применительно к процессам затухания ультразвука, обусловленного рассеянием в поликристаллических средах, приведены следующие результаты. Волна, падающая на неоднородность в среде, рассеивается. Возмущенное поле внутри неоднородности отличается от падающей волны; это различие порождает другие волны вне неоднородности. Рассеяние волны зависит от характеристик распространения внутри и вне неоднородности, типа падающей волны и от граничных условий на поверхности неоднородности. Граничными условиями для упругих волн являются непрерывность напряжения и смещения на границе, что вполне применимо к описанию НДС породного массива. После того, как найдена рассеянная волна, переносимая ею мощность может быть рассчитана путем интегрирования плотности потока излучения по сфере вдали от неоднородности. Рассеянная мощность является частью падающей мощности; для единичного объема, содержащего N независимо рассеивающих неоднородностей (без учета многократного рассеяния), эта часть будет в N раз больше. Она определяет скорость затухания падающей волны. При рассеянии отдельной неоднородностью диаметром D , рассеянная мощность пропорциональна D^4 , если $l \approx D$, где l - длина волны.

При акустическом анализе строения породного массива большое значение имеет его микрослоистость. В отношении упругих свойств, а именно в такой постановке следует рассматривать распространение акустических волн в горных породах, микрослоистая среда подобна кристаллу гексагональной симметрии [199]. В работе [201] приведены соотношения для случая гексагональной симметрии, соответствующей анизотропии трансверсально-анизотропных сред. Упругие свойства такой среды описываются 5-ю упругими постоянными: C_{11} , $C_{12} = C_{66}$, C_{13} , C_{33} и C_{44} , которые связаны с модулем упругости следующим соотношением:

$$E = \left\{ \frac{(C_{11}C_{33} - C_{13}^2)\sin^4 j}{[(C_{11} + C_{12})C_{33} - 2C_{13}^2](C_{11} - C_{12})} - \frac{(C_{11} + C_{12})\cos^4 j}{(C_{11} + C_{12})C_{33} - 2C_{13}^2} + \left[\frac{1}{C_{44}} - \frac{2C_{13}}{(C_{11} + C_{12})C_{33} - 2C_{13}^2} \right] \sin^2 j \cos^2 j \right\}^{-1}, \quad (3.1)$$

где j – угол между направлением распространения волны \vec{n} и осью симметрии среды \vec{l} ; $\cos j = \vec{n} \cdot \vec{l}$.

Согласно [26], скорости упругих волн v_p , v_{SH} и v_{SV} , равны:

$$\begin{aligned} v_p &= \sqrt{\frac{1}{2r} [C_{11} + C_{44} + (C_{33} - C_{11})\cos^2 j + \sqrt{C_{11} - C_{44} + 2B\cos^2 j + P\cos^4 j}]}; \\ v_{SH} &= \sqrt{\frac{1}{r} [C_{12} + (C_{44} - C_{12})\cos^2 j]}; \\ v_{SV} &= \sqrt{\frac{1}{2r} [C_{11} + C_{44} + (C_{33} - C_{11})\cos^2 j - \sqrt{C_{11} - C_{44} + 2B\cos^2 j + P\cos^4 j}]} \end{aligned}, \quad (3.2)$$

где

$$\begin{aligned} B &= -C_{11}^2 + 2C_{13}^2 - C_{11}C_{33} + 3C_{11}C_{44} + 4C_{13}C_{44} + C_{33}C_{44}; \\ P &= C_{11}^2 + C_{33}^2 - 4C_{13}^2 + 2C_{11}C_{33} - 4C_{11}C_{44} - 8C_{13}C_{44} - 4C_{33}C_{44}, \end{aligned}$$

v_p – скорость квазипродольной волны P ; v_{SV} – скорость квазипоперечной волны S , поляризованной субпараллельно оси симметрии (волна SV); v_{SH} –

скорость квазипоперечной волны S , поляризованной в плоскости, приблизительно перпендикулярной к оси симметрии (волна SH).

Аналогично, по данным [203] в случае Рэлеевского рассеяния при $I > 2p\bar{D}$ (\bar{D} – средний диаметр зерен) для случая гексагональных кристаллитов справедливы следующие соотношения для продольного a_l и поперечного a_t коэффициентов затухания акустических волн:

$$a_l = \frac{4p^3 T \cdot u^4}{450 r^2 v_l^3} \left(\frac{a_1}{v_l^5} + \frac{b_1}{v_l^5} \right), \quad a_t = \frac{4p^3 T \cdot u^4}{450 r^2 v_t^3} \left(\frac{a_2}{v_t^5} + \frac{b_2}{v_t^5} \right), \quad (3.3)$$

где u – частота колебаний; r – плотность, T – размер зерен, выраженный в единицах объема.

Параметры в (3.3) заданы следующими выражениями [201]:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{88}{15} g^2 + 40 c^2 + 96 h^2 + \frac{80}{3} c \cdot g + \frac{128}{3} g \cdot h + \frac{320}{3} c \cdot h, \\ b_1 &= \frac{82}{15} g^2 + 30 c^2 + \frac{272}{3} h^2 + 20 c \cdot g + \frac{112}{3} g \cdot h + 80 c \cdot h, \\ a_2 &= \frac{41}{15} g^2 + 15 c^2 + \frac{136}{3} h^2 + 10 c \cdot g + \frac{56}{3} g \cdot h + 40 c \cdot h, \\ b_2 &= \frac{8}{5} g^2 + 28 h^2 + 8 g \cdot h, \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$g = c_{11} + c_{33} - 2(c_{13} + 2c_{44}), \quad c = c_{13} - c_{12}, \quad h = c_{44} + \frac{c_{12} - c_{11}}{2}.$$

где c_{ij} – упругие модули кристаллита.

Приведенные выше соотношения (3.1-3.4) являются, по сути базой для разработки теоретических основ выявления структурной неоднородности породного массива.

Процесс распространения упругих колебаний в угольном пласте с некоторыми допущениями можно попытаться рассмотреть как волновой процесс в

неоднородной распределенной линии [205]. Угольный пласт в такой постановке считаем распределенной системой, в которой бегут волны, отражающиеся от неоднородностей. Это трактовка Даламбера особенно удобна для описания процессов в неограниченных системах и в системах, длина которых значительно больше длины волны. Для простоты рассмотрим одномерную распределенную систему: угольный пласт – передающая линия.

Для рассмотрения этой задачи рис. 3.2 представлен в несколько измененном виде (рис. 3.4).

Предположим, что при $x = 0$ параметры системы испытывают скачкообразное изменение вследствие какого-либо динамического воздействия. Тогда, для волны, падающей на плоскость максимума опорного давления, имеем следующее выражение для величины смещений частиц среды:

$$u_{над} = A_{01} \exp[j(\omega t - k_1 x)], \quad (3.5)$$

а для волны, отраженной от нее:

$$u_{отп} = A_2 \exp[j(\omega t + k_1 x + j)], \quad (3.6)$$

где A_{01} , A_2 - амплитуда падающей и отраженной волны; k_1 – волновое число в линии 1, j - мнимая единица, ω - циклическая (круговая) частота, x - расстояние от источника колебаний до рассматриваемой точки.

Кроме того, существует прошедшая A_3 волна, распространяющаяся в линии 2 за плоскость максимума опорного горного давления и далее в линию 3, которую можно считать уходящей в бесконечность, т.е. ее энергия принимается безвозвратно утерянной. Для нее справедливо следующее выражение:

$$u_{потерь} = A_3 \exp[j(\omega t - k_2 x)], \quad (3.7)$$

где k_2 – волновое число в линии 2.

Тогда волну $u(x,t)$ можно представить в виде суперпозиции падающей, отраженной и прошедшей волн:

$$u(x,t) = A_1 \exp[j(\omega t - k_1 x)] + A_2 \exp[j(\omega t + k_1 x + j)] + A_3 \exp[j(\omega t - k_2 x)], \quad (3.8)$$

где j – сдвиг фаз при отражении волн.

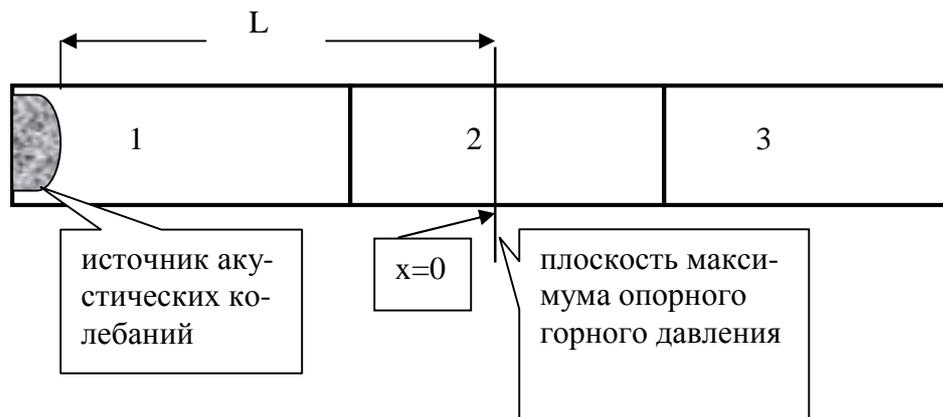


Рис. 3.4. Схема передающей линии (угольного пласта) со скачкообразным изменением параметров: 1 – зона отжима; 2 – зона опорного давления; 3 – зона начального напряженного состояния

Энергия акустических колебаний пропорциональна квадрату величины смещений. Так как процессы распространения акустических колебаний, в общем случае, подчиняются законам волновой оптики, то с энергетической точки зрения, распределение энергии акустических колебаний \mathcal{E} , распространяющихся от источника, выглядит следующим образом:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 \approx E \frac{U^2(x,t)}{2}, \quad (3.9)$$

где \mathcal{E}_1 – энергия акустических колебаний, поглощенная породным массивом на участке длины L ; \mathcal{E}_2 – энергия акустических колебаний, отраженная от плоскости максимума опорного давления и \mathcal{E}_3 – энергия акустических колебаний, прошедшая через плоскость максимума опорного давления (см. рис. 3.4).

С точки зрения изменения состояния горного массива, интерес представляет только поглощенная им часть энергии \mathcal{E}_1 , как составляющая часть энергии исходной волны \mathcal{E} .

При решении задачи оценки свойств возникающего акустического излучения, интерес представляет в первую очередь частота колебаний \mathbf{u} и их амплитуда A .

По данным работ [204, 206], исходя из основ динамической микромеханики, при образовании структурного нарушения (разрыва сплошности) излучается (или поглощается) импульс энергии, которую можно представить суммой элементарных квантов (фононов) с энергией:

$$\mathcal{E}_1 = N \cdot h \cdot \mathbf{u}, \quad (3.10)$$

где N – количество элементарных разрывов структуры (в нашем случае – число трещин); h – постоянная Планка; \mathbf{u} – частота излучения.

Разрыв сплошности происходит, если в зоне разрыва в соответствии с критерием Гриффитса действует импульс напряжений:

$$s = \sqrt{\frac{2Eg_0}{p \cdot N \cdot a}} = \sqrt{\frac{E \cdot h}{p \cdot a \cdot t}}, \quad (3.11)$$

где E – модуль упругости, t – длительность импульса, a – характерный размер трещин возникающих при разрушении горных пород.

При этом следует учесть, что сложное напряженное состояние можно привести к одноосному, используя тот или иной критерий прочности, например, П.П. Баландина, А.Н. Шашенко, Хоека-Брауна [28]. Тогда формула (3.14) примет следующий вид:

$$s_e = \sqrt{\frac{E \cdot h}{p \cdot a \cdot t}}, \quad (3.12)$$

где s_e - граничное напряжение одноосного растяжения, эквивалентное сложному напряженному состоянию.

Частоту излучения можно найти следующим образом:

$$u = \frac{c}{p \cdot N^2 \cdot a}, \quad (3.13)$$

где c - скорость акустических волн в породном массиве; a – характерный размер возникающих трещин при разрушении горных пород.

Подставляя (3.13) в (3.10), получаем выражение для энергии акустического излучения (поглощения):

$$\mathcal{E}_1 = \frac{h \cdot c}{p \cdot N \cdot a}; \quad (3.14)$$

Воспользовавшись результатами [207], мощность эмиссии акустических волн может быть описана следующим выражением:

$$W_g = \mathcal{E}_1 \cdot N; \quad (3.15)$$

где \mathcal{E} - энергия излучения (поглощения), N - число излучателей (трещин).

Мощность упругого деформирования, которую мы принимаем равной мощности акустического излучения, в момент времени, определяемый временем деформирования (длительностью излучения), характеризуется величинами действующих в объеме деформирования напряжений [207]:

$$W_g = \frac{2(1-m)}{G \cdot t} s_e^2 \cdot a^3, \quad (3.16)$$

где G - модуль сдвига, m - коэффициент Пуассона.

Подставив (3.14) и (3.15), и приняв правые части формул (3.15) и (3.16), выражение (3.16) можно преобразовать, выразив из него в явном виде число излучателей (трещин) N и величину эквивалентных напряжений S_e .

Тогда:

$$N = \frac{2(1-m)S^2 a^3}{G \cdot t \cdot \mathcal{E}} = \frac{2(1-m)S_e^2 a^3}{S_e \cdot t \cdot N \cdot h \cdot n}, \quad (3.17)$$

откуда

$$S_e = \sqrt{\frac{N \cdot G \cdot \mathcal{E} \cdot t}{2a^3(1-m)}} = N \sqrt{\frac{G \cdot h \cdot n \cdot t}{2a^3(1-m)}}. \quad (3.18)$$

Последние выражения свидетельствуют о прямой связи частоты акустического сигнала с действующими напряжениями.

Анализ исследований разрушения горных пород [209, 210] показывает, что условия лавинного разрушения – ГДЯ создаются при развитии микродефектов по некоторому объему материала. Причем их число должно достичь некоторой критической концентрации, в соответствии с интегральным критерием разрушения [211, 212].

Процесс развития ГДЯ без сомнения можно отнести к резонансным явлениям. Рассматривая его с точки зрения волновых процессов, можно сказать следующее. Участок углепородного массива, в котором развивается подобное явление, представляет собой синергетическую самонастраивающуюся на определенные частоты систему, находящуюся в неустойчивом предельном напряженном состоянии. Уравнение (3.18) устанавливает непосредственную связь между эквивалентным напряжением S_e и частотой возникающих в массиве акустических колебаний u . Т.е. по существу величина S_e задает ту частоту колебаний, при которой в случае выполнения ряда условий, система с критиче-

ским числом дефектов скачкообразно, вследствие резонанса перейдет в устойчивое состояние с более низким уровнем потенциальной энергии, что выразится в реализации ГДЯ.

Мощность акустического излучения (поглощения) может быть определена также по амплитуде A_i и длительности импульса t_i для дискретного спектра [210]:

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} (A_i)^2 t_i = \frac{1}{2} r \cdot u_i^2 w_{ij}^2, \quad (3.19)$$

где u_i – смещения; w_{ij} – тензор вращения.

Для непрерывного спектра (3.20) принимает вид:

$$W = \int_0^{\infty} A(t) dt = \frac{1}{2} r \int_0^{\infty} u_0 du \int_0^{\infty} w dw, \quad (3.20)$$

где под u_0 подразумевается величина начальных смещений.

С точки зрения физического механизма процесса трещинообразования, спектр рассматриваемого акустического излучения является дискретным. В общем случае это утверждение можно считать справедливым при наличии очень большого числа трещин и неизбежного взаимовлияния отдельных элементарных процессов возникновения новых трещин. В связи с этим для аналитического описания данного процесса следует использовать выражение (3.19), однако не следует забывать, что в случае параллельного действия такого огромного числа излучателей в локализованной области пространства, которой и является углепородный массив, неизбежно возникновение большого числа гармоник, учет которых также необходим. В этом случае более применимым является рассмотрение непрерывного спектра, который дается выражением (3.20). В

таким виде спектр более удобно исследовать с помощью современных численных методов с использованием компьютерных методов анализа.

В соответствии с [206], при импульсном воздействии (удар, вибрация, взрыв и т.п.), по массиву будет распространяться импульс, который, взаимодействуя с локальными полями напряжений и аномальными зонами, приведет к их изменению. Достаточные условия изменений определенного уровня формируются такими характеристиками импульсного воздействия, как длительность, амплитуда, плотность воздействия и т.п. Существует определенное взаимоотношение между импульсом и спектром взаимодействующих с ним трещин и дефектов в материале. Как показано в [206], короткие импульсы с высоким пиком напряжений могут воздействовать преимущественно только на короткие дефекты, длинный же импульс равной энергии с низким пиком напряжений может воздействовать преимущественно на относительно длинные трещины. Практически это выражается в следующем [206]: короткий скачок (импульс) может измельчать среду и быстро затухнуть, длинный же импульс вызывает менее густую сеть трещин, но проникнуть может гораздо глубже и в итоге привести к дегазации, разгрузке, и возможно – ГДЯ.

В настоящее время установлено, что волна напряжений может способствовать разрыву в том случае, если действительная плотность волны (скачка, импульса и т.п.) больше, чем $\frac{p \cdot g_0 E}{c}$. То есть, при воздействии импульса на дефекты длиной a , их перевод в критическое состояние определяется соотношением (3.12). Или, иначе, используя данные [206], дефекты будут приведены к граничным условиям их роста напряжениями S_e только скачком – импульсом длительностью:

$$t > \frac{p^2 a}{2c} = \frac{p^2 a}{2} \left(\frac{r(1-m)}{E} \right)^{1/2}, \quad (3.21)$$

где r – плотность горной породы.

Так как колебательный процесс может быть рассмотрен как набор импульсов, то данный подход представляется справедливым.

Разложение акустического сигнала $F(t)$, распространяющегося от источника колебаний (см. рис. 3.1, 3.2, 3.3) в ряд Фурье дает выражение:

$$F(t) = A_1(\cos w_1 t + j_1) + \dots + A_n(\cos w_n t + j_n), \quad (3.22)$$

где A_i - амплитуда, w_i - частота спектральных членов, j_i - начальная фаза колебаний.

Примем за основу линейную зависимость затухания от частоты:

$$A = A_0 e^{-ax}, \quad (3.23)$$

где A – амплитуда колебаний на расстоянии x от источника, A_0 – амплитуда колебаний в источнике, a - коэффициент затухания.

Тогда с увеличением давления в 2 раза затухание в угольном пласте уменьшается примерно вдвое, и амплитуда сигнала увеличивается в зависимости от частоты в соотношении:

$$\frac{A_n}{A_0} = e^{a_n - a_0}, \quad (3.24)$$

где A_n , A_0 – амплитуда сигнала при повышенном и исходном давлении, a_n , a_0 – коэффициенты затухания при повышенном и исходном давлении.

По данным экспериментальных исследований, с ростом напряженности угля, т.е. с увеличением выбросоопасности, амплитуда высокочастотной составляющей спектра увеличивается быстрее, чем амплитуда низкочастотной составляющей в 2 – 7 раза, и амплитуда в области основной частоты f_0 - в 1,8 – 4,5 раза. Таким образом, спектральная плотность, которая определяется, в основном амплитудой сигнала вблизи резонанса, является менее информативной

характеристикой выбросоопасности угольного пласта, чем соотношение спектральных составляющих [201].

Мощность акустического излучения может быть проанализирована путем разложения искусственного акустического сигнала в ряд Фурье $F(t) = A_1(\cos w_1 t + j_1) + \dots + A_n(\cos w_n t + j_n)$. При этом возможно выделение одного сигнала (со своей частотой и фазой), использование которого в качестве опорного позволит произвести все показанные ранее вычисления для предыдущей задачи. При этом перечень исходных расчетных параметров остается прежним $t_1 \dots t_n$ (селекция расстояния), $\Delta t_{пр} \dots \Delta t_{прn}$ (селекция a) с добавлением перечня $A_1 \dots A_n$, $w_1 \dots w_n$, $j_1 \dots j_n$ необходимого для селекции производного сигнала в общей структуре, который принимается в качестве опорного.

Проведение показанного спектрального анализа параллельно с решаемой задачей позволяет решить еще одну – определения степени напряженного состояния исследуемой области путем определения безразмерного коэффициента

$k = \frac{A_B}{A_H}$, который можно считать прогностическим признаком выбросо-

опасности, где A_B , A_H – коэффициенты A_1, \dots, A_n ряда Фурье соответственно в высоко- и низкочастотных областях [201]. Эти коэффициенты отражают величину трассового затухания D , а также затухание в частотной области, т.е.

$$A_1(w_1) = f(D), A_2(w_2) = f(D, w_i), i = 1 \dots n, A_n(w_n) = f(D, w_n), i = 1 \dots n.$$

Данные многочисленных шахтных экспериментальных исследований показывают, что в случае $k \geq 3$ имеет место выбросоопасная ситуация и необходимы срочные меры по предотвращению возникновения ГДЯ.

Следует отметить, что амплитуда сигнала в точке приема является наиболее удобной и чаще всего используемой при всех видах измерений характеристикой сигнала.

При разложении в ряд Фурье показанные значения $A_1 \dots A_n$ также являются амплитудами, однако они принадлежат членам разложения исходной функции и в общем виде определяются суммой $A = \sum_{i=1}^n A_i$.

Энергия акустического импульса, согласно теореме Парсеваля, выражается следующим образом [206]:

$$\int_0^t s_e^2(t) dt = \frac{1}{2\rho} \int_{-\infty}^{\infty} F^2(w) dw, \quad (3.25)$$

где $F(w)$ – члены ряда Фурье для импульса s ; w – частота спектральных членов. Выражение (3.25) свидетельствует о взаимосвязи напряженно-деформированного состояния в породном массиве со структурой акустического сигнала, с его амплитудно-частотной характеристикой.

3.2. Акустический контроль состояния участка массива впереди выработки

Акустический контроль состояния участка массива впереди выработки предусматривает исследование участка породного массива от забоя горной выработки вплоть до плоскости максимума опорного горного давления. Цель исследований состоит в выявлении наличия аномальных зон в этой области (нарушения, трещины, зоны повышенных напряжений и т.п.), которые являются потенциальными очагами развития ГДЯ.

Исследования акустических сигналов для решения этой задачи должны проводиться с целью определения величин членов разложения в ряд Фурье акустического сигнала, принимаемого геофоном, расположенным позади выработки. При этом принимается, что вмещающие породы по сравнению с угольным пластом не имеют нарушений и их свойства как акустического волновода близки к идеальным.

Основываясь на этих допущениях, суммарное значение амплитуды акустического сигнала при его разложении в ряд Фурье может быть выражено следующим образом:

$$A_{\Sigma}(w) = \sum_{i=w_1}^{w_2} \exp(-a_L \cdot z) \sin(b_i \cdot z - w_i t), \quad (3.26)$$

где $w_1 \dots w_2$ – диапазон частот, в котором ведутся измерения акустического сигнала.

Таким образом, мы имеем на входе в геофон прошедший через участок углепородного массива волновой пакет. Каждая из гармонических составляющих этого пакета испытывает на пути распространения затухание, вызванное взаимодействием с неоднородным породным массивом. При этом степень затухания находится в прямой зависимости от частот собственных колебаний неоднородностей, их напряженно-деформированного состояния и т.п., и частот той или иной составляющей волнового пакета.

Как видно из приведенных выше соотношений (3.22), (3.26) эти зависимости достаточно сложны, и могут быть использованы с условием соответствующей экспериментальной корректировки и выбора наиболее удобного набора формул для получения достоверного результата. Последнее невозможно без проведения довольно обширных лабораторных исследований. Реализация такого подхода позволит проанализировать количественно наличие тех или иных аномальных зон (структурных неоднородностей) по данным определения коэффициентов затухания продольных и поперечных волн и подставки в определяющие уравнения (3.1) и (3.7) величин предполагаемых размеров неоднородностей и их упругих модулей.

Другой путь предполагает использование соотношений (3.10)-(3.20). При этом появляется возможность непосредственно связать размер неоднородности (трещины) с энергией акустических колебаний, излучаемой и/или рассеиваемой при ее образовании (энергия фонона).

В соответствии с общими законами распространения акустических колебаний в реальных средах [213], потеря энергии происходит за счет поглощения и рассеяния энергии. При этом, поглощение звука дает сведения о строении среды и ее поведении в молекулярных масштабах, а также о таких усредненных характеристиках среды, как модуль упругости и плотность. Рассеяние, как нам представляется, является более информативным параметром, так как содержит информацию о наличии, размерах и некоторых параметрах внутренних неоднородностей. Поэтому дальнейшие исследования целесообразно продолжать в направлении изучения именно рассеяния акустических колебаний на внутренних неоднородностях в породном массиве. По данным работы [15], рассеяние волн телами, сравнимыми с длиной волны, – наиболее трудная задача. Она может быть решена только для простейших случаев: рассеяние на шаре, диске, эллипсоиде и некоторых других телах. Такие задачи, а также нахождение деталей структуры поля рассеяния большими препятствиями относятся к теории дифракции.

В работе [214] рассматривается механизм затухания звука, играющий существенную роль на низких частотах. Этот механизм в одинаковой мере применим и к морским грунтам и к сухим грунтам или горным породам. Его особенностью по сравнению с любым другим механизмом типа релаксационного является отсутствие связи между дисперсией скорости и коэффициентом затухания, так что большое затухание может быть и при отсутствии дисперсии скорости, как это имеет место в грунтах и горных породах. При этом горная порода принимается как среда содержащая крупномасштабные неоднородности достаточно больших размеров. Считая длину волны много меньше размера неоднородностей в [214] используется лучевое приближение. Чтобы не усложнять картину, неоднородности считаются плавными, что позволяет пренебречь отражением. В точку приема будут приходить лучи с различными фазами, прошедшие различные пути в такой среде – лучи с различными средними волновыми числами k вдоль оси x , совпадающей с начальным направлением рас-

пространения звуковой волны. Вводится функция распределения волновых чисел $g(k)$ и предполагается, что она имеет вид лоренцевской кривой:

$$g(k) = g_0 \frac{b^2}{(k - k_0)^2 + b^2}, \quad (3.27)$$

где b – полуширина этого распределения, g_0 – значение этой функции в максимуме.

Заменяя суммирование лучей интегрированием, получаем:

$$p = p_0 e^{i\omega t - ik_0 x} \int_{-\infty}^{\infty} g_0 \frac{b^2}{(k - k_0)^2 + b^2} e^{-i(k - k_0)x} dk = pg_0 bp_0 e^{i\omega t - ik_0 x - bx}. \quad (3.28)$$

Таким образом, за счет неоднородности среды возникает затухание звука с коэффициентом, равным полуширине функции распределения по волновым числам.

Как нам представляется, под N следует понимать следующие величины:

1. Число трещин, возникающих в породном массиве вследствие технологического воздействия;

2. Число неоднородностей и иных элементов структуры в рассматриваемом участке породного массива, которые являются вторичными источниками акустических колебаний, возникающим в результате их взаимодействия с первичным акустическим полем.

Выражение (3.14) с учетом этой оговорки не теряет смысла, однако необходимо сделать еще одну оговорку. Рассматривая процесс распространения акустических колебаний в породном массиве, мы, по существу, рассматриваем процесс распространения последовательной передачи энергии акустических колебаний от источника колебаний к приемнику, на своем пути акустические волны взаимодействуют со структурными элементами породного массива, ко-

торые являются вторичными источниками (и/или рассеивателями) энергии акустических колебаний. Каждый из этих структурных элементов обладает как резонансными так и релаксационными свойствами. Вследствие этого необходимо детальное исследование резонансных и релаксационных свойств породного массива.

Частоту излучения каждой структурной неоднородности (трещины) можно определить из спектра принимаемого акустического сигнала при его разложении в ряд Фурье. Размер и число этих структурных неоднородностей определяются с помощью соотношений (3.14)-(3.16). Амплитуда каждой гармоники ряда Фурье с учетом соотношений (3.19)-(3.21) является количественной характеристикой, определяющей как количество неоднородностей данного размера, так и рассеивающие свойства передающей линии (участка породного массива, находящегося между приемником и источником колебаний). В этом контексте возникает вопрос о расположении источника колебаний. В идеальном случае, он находится в непосредственной близости от забоя выработки, в связи с чем можно считать, что акустическое поле, распространяющееся в породном массиве в направлении к приемнику, не вызывает возникновения в нем новых трещин и неоднородностей. По-видимому, с достаточной степенью точности, такое допущение и следует принять.

Тогда принятый акустический сигнал формируется резонансно-волновыми свойствами породного массива. В этом случае, необходимы серьезные аналитические и лабораторные исследования акустических свойств породного массива на образцах, с использованием физического и имитационного моделирования.

3.3. Исследование области массива впереди забоя как "геомеханической лазерной системы"

Участок углепородного массива рассматривается как акустический волновод конечных размеров, ограниченный, с одной стороны забоем выработки, а с другой - плоскостью максимума опорного давления. "Накачка" такой "геоме-

ханической лазерной системы" возможна путем внешнего акустического воздействия в течение определенного интервала времени со стороны технологического оборудования, работающего в ближайшей выработке.

В [215], при моделировании поведения акустических гармонических сигналов в блочных средах под нагружением, доказано, что на стадиях предразрушения очаговые зоны динамических форм проявления горного давления могут уподобляться своеобразной "геомеханической лазерной системе", т.е. акустически активной среде, способной к когерентному излучению сейсмической энергии. Полученный результат свидетельствует о том, что при анализе и изучении механизмов формирования очагов землетрясений, горных ударов и других процессов разрушения геоматериалов следует учитывать то обстоятельство, что квазистатические процессы накопления упругой энергии в очаговых зонах всегда идут на акустическом фоне – от естественных микросейсмиков до сложных волновых явлений, сопровождающих импульсные сейсмические воздействия от удаленных землетрясений, взрывов и т. п.

На рис. 3.5 представлены результаты этих исследований.

Такое явление, может иметь место при накоплении энергии акустических колебаний в зоне опорного давления, складывающегося из излучаемых источником акустических колебаний волн и волн, многократно отраженных от плоскости максимума опорного давления и внутренних неоднородностей. Так как породный массив является средой с большим количеством неоднородностей – рассеивателей, то по мере распространения первичной акустической волны происходит накопление рассеянных волн [213].

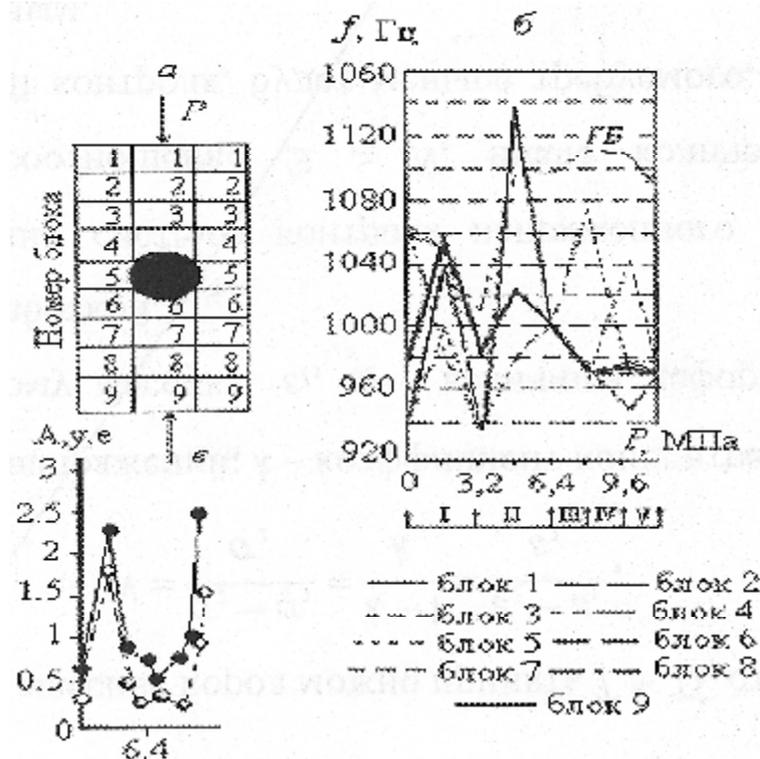


Рис. 3.5. Геомеханическая «лазерная» система: а) переход модели из геоматериалов с цилиндрической полостью на стадии предразрушения; б) переход в акустически активное состояние, характеризующееся конвергенцией резонансных частот по системе блоков; в) усиление амплитуды гармонических сигналов за счет перехода накоплений упругой энергии структурных элементов в энергию акустических сигналов; I-V – этапы энергии

В результате этого однократно рассеянное поле уже не будет мало по сравнению с первичным даже при малости рассеяния от одного рассеивателя.

Дифференциальное уравнение для пространственной Фурье-компоненты акустического поля, по аналогии с данными работы [205], можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2 A_n}{dt^2} + \frac{w}{Q_n} \frac{dA_n}{dt} + \Omega_n^2 A_n = -4p \frac{d^2 P_n}{dt^2}, \quad (3.29)$$

где Ω_n – собственная частота резонатора, $\Omega_n = \frac{P \cdot n \cdot c}{L}$; L – длина резонатора;

Q_n – добротность резонатора на n -й моде; w – частота акустического поля; P_n – пространственная Фурье-компонента поляризации среды;

$$P_n(t) = \frac{2}{l} \int_0^l \vec{P}(r, t) \sin\left(\frac{n \cdot P \cdot r}{L}\right) dr; \vec{P}(r, t) – \text{вектор поляризации акустической вол-}$$

ны. Для простоты будем считать, что $\vec{P}(r, t) = 1$, т.е. во всех направлениях степень поляризации одинакова.

Учитывая вышеизложенный материал, анализа процессов прохождения акустических волн получены следующие заключения.

Дифракция и рассеяние акустических колебаний в породном массиве на неоднородностях мезоуровня, сравнимых с длиной акустической волны, наиболее существенны. В силу того, что эти неоднородности вызывают наибольшее ослабление энергии акустических колебаний, и, одновременно, они являются очагами развития ГДЯ, наиболее целесообразно проведение исследований строения и степени нарушенности породного массива акустическим методом.

При строении и степени нарушенности породного массива акустическим методом необходимо рассматривать его как микрослоистую среду, которая подобна кристаллу гексагональной симметрии. В этой постановке породный массив представляется в качестве трансверсально-анизотропной среды, упругие свойства которой описываются 5-ю упругими постоянными.

Исходя из основ динамической микромеханики, при образовании в породном массиве структурного нарушения (трещины), излучается или поглощается импульс (квант, фонон) энергии элементарного разрыва сплошности.

Условия лавинного разрушения (ГДЯ) создаются при развитии количества микродефектов по некоторому объему породы до критической концентрации.

Амплитудно-частотная характеристика искусственного акустического сигнала, генерируемого разрушающим органом работающих в лавах очистных механизмов, функционально связана с уровнем предельного напряженного со-

стояния призабойной части угольного пласта, что позволяет использовать ее в качестве исходной информации при оценке опасности возникновения газодинамического явления.

Участок угленосного массива может быть рассмотрен как акустический волновод конечных размеров, ограниченный, с одной стороны, забоем выработки, а с другой – плоскостью максимума опорного давления. "Накачка" такой "геомеханической лазерной системы" возможна путем внешнего акустического воздействия в течение определенного интервала времени со стороны технологического оборудования, работающего в ближайшей выработке.

При анализе и изучении механизмов формирования очагов землетрясений, горных ударов и других процессов разрушения геоматериалов следует учитывать то обстоятельство, что квазистатические процессы накопления упругой энергии в очаговых зонах всегда идут на акустическом фоне – от естественных микросейсм до сложных волновых явлений, сопровождающих импульсные сейсмические воздействия от удаленных землетрясений, взрывов и т. п.

Дальнейшие исследования, целесообразно продолжить в направлении исследования резонансных и релаксационных свойств отдельных характерных элементов породного массива с учетом дифракции на них акустических волн.

Несмотря на появившиеся в последнее время публикации о существовании геомеханических систем свойств «лазерной накачки», все же представляется сомнительным возможность реализации этого явления с учетом того, что реальный породный массив является средой с ярко выраженными диссипативными свойствами. Для изучения этого явления необходимо проведение физического моделирования на породных образцах.

РАЗДЕЛ 4

ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ АК-1М

4.1. Повышение надежности прогноза ГДЯ на основе статистических моделей

С увеличением глубины разработки угольных месторождений возрастает опасность катастрофических проявлений горного давления в виде внезапных выбросов угля, газа, породы [216]. Существующие способы прогноза ГДЯ как контактные, так и бесконтактные позволяют предсказывать их с определенной ошибкой – первого и второго рода по классификации МакНИИ. Наиболее технологичными и физически обоснованными являются нормативные способы прогноза, основанные на использовании акустических колебаний, как носителей информации о напряженном состоянии породного массива [217-220]. Эти способы реализуются в Украине с помощью аппаратуры АПСС или АК-1. В основе работы аппаратуры АПСС и АК-1 лежит непрерывный анализ отношения амплитуды высших и низших частот регистрируемых акустических колебаний и сравнение получаемых величин с некоторыми критическим значением. Ошибка этого вида прогноза по оценкам специалистов доходит до 30% и более. Та же ситуация характерна и для других видов прогноза. В этой связи представляется полезным выполнить анализ стохастической системы «углепородный массив – приемник – анализатор» с целью определения путей повышения надежности способов прогноза.

Высокая технологичность акустических способов контроля ГДЯ обусловлена использованием в качестве источника зондирующего углепородный массив акустического сигнала, генерируемого рабочими органами добычных или проходческих механизмов, и который в отношении проводимого анализа является сигналом со случайными характеристиками. Характер сигнала делает возможным применение методов статистической обработки для выделения его регулярных составляющих с целью повышения информативности прогноза по

выбранному критерию. Такая регулярность априори заложена в сменном характере работы, цикличности режима работы добычного (проходческого) механизма и т.д. При этом кроме амплитудно-частотного анализа сигнала целесообразно параллельное применение других методов анализа, в т.ч. морфологического, который позволит идентифицировать работу механизма на уровне случайных составляющих для исключения их из последующего анализа, Фурье-анализа, вейвлет-анализа и т.п.

Система обработки информации, основанная на многофакторном анализе одного и того же акустического сигнала, принятого из массива и транслированного на поверхность шахты, показана на рис. 4.1.

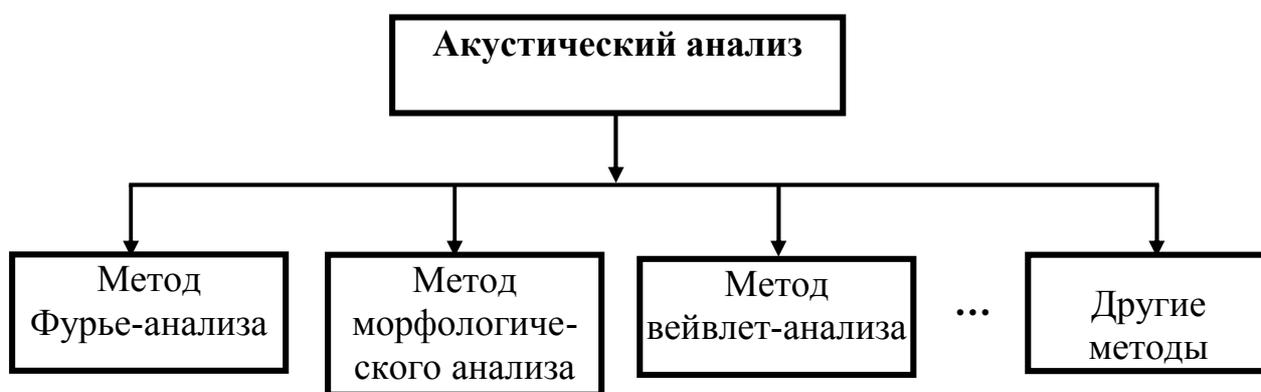


Рис. 4.1. Схема многофакторного анализа акустического сигнала

Параллельное выделение различных характеристик сигнала из одного сигнала позволит, с одной стороны, повысить достоверность конкретного прогностического параметра относительно основной поставленной задачи и, с другой стороны, одновременно решать другие не менее важные задачи, например, такие как оценка структурной неоднородности породного массива.

Предложенную систему можно условно разбить на две составляющие: универсальный базис, с относящейся к нему системой сбора акустической информации в выработке и передачи ее на поверхность шахты, и наращиваемую надстройку в виде программного обеспечения, в которой производится выделение указанных критериев и их последующий анализ. С экономической точки зрения увеличение количества решаемых такой системой задач будет при-

водить к снижению себестоимости оборудования, поскольку наращивание системы будет касаться, в основном, усложнения программного продукта, а не его аппаратной части.

Поставим задачу следующим образом. Пусть на вход некоторого приемного устройства подается сигнал, имеющий сложную вероятностную структуру, и несущие информацию о некотором явлении (процессе) A , которое в свою очередь имеет стохастическую природу. Явление A прогнозируется на основе анализа этого сигнала на выходе из устройства. Например, анализируя некоторую характеристику сигнала можно прогнозировать явление A с вероятностью P . Предположим, что вероятность прогноза изменится, если анализировать не одну, а несколько независимо друг от друга характеристик. Применительно к рис. 4.1 такая задача аналогична задаче о параллельном соединении в электрической сети (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Структурная модель системы «сигнал – приемник – анализатор»

Пусть вероятность события $u_i = \{\text{прогноз явления } A \text{ по } i\text{-й характеристике верен}\}$ равна P_i . Вероятность события $\bar{u}_i = \{\text{прогноз явления } A \text{ по } i\text{-й характеристике не верен}\}$ равна вероятности противоположного события

$$q_i = 1 - P_i. \quad (4.1)$$

Событие $u = \{\text{прогноз явления верен}\}$ заключается в том, что произойдет либо событие $u_1 = \{\text{прогноз верен по характеристике 1}\}$, либо событие $u_2 = \{\text{прогноз верен по характеристике 2}\}$, ... либо событие $u_n = \{\text{прогноз верен по характеристике } n\}$.

Таким образом, событие u представляет собой систему событий:

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_n. \quad (4.2)$$

Поскольку анализ характеристик производится независимо, в одном и том же испытании прогноз осуществляется параллельно по нескольким характеристикам (т.е. прогноз по одной характеристике не исключает прогноз по другим характеристикам), события u_1, u_2, \dots, u_n являются совместными. Тогда по теореме сложения вероятностей вероятность события u равна сумме вероятностей событий u_1, u_2, \dots, u_n за вычетом вероятностей их совместного появления в различных сочетаниях.

Значительно проще эта задача решается через вероятность противоположного события – q_1 . Событие $\bar{u} = \{\text{прогноз не верен}\}$ заключается в одновременном появлении событий $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_n$. События $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_n$ – независимы. Поэтому по теореме умножения вероятностей

$$P(\bar{u}) = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n. \quad (4.3)$$

Соответственно, вероятность события $u = \{\text{прогноз верен}\}$ равна

$$P(u) = 1 - q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n. \quad (4.4)$$

Из формулы (4.4) следует, что чем больше характеристик анализируется, тем выше вероятность верного прогноза рассматриваемого явления. Например,

пусть вероятность верного прогноза при анализе одной характеристики равна $P_u = P_1 = 0,5 \cdot (q_1 = 0,5)$, что равносильно угадыванию «да-нет». Вероятность верного прогноза при параллельном анализе второй характеристики, которая тоже реализуется с такой же низкой вероятностью $P_2 = 0,5$ ($q_2 = 0,5$), будет в соответствии с формулой (4.4) равна

$$P(u) = 1 - 0,5 \cdot 0,5 = 0,75.$$

То есть, вероятность прогноза возросла от 0,5 до 0,75. Соответственно, при трех одновременно анализируемых параметрах, позволяющих производить оценку верного прогноза с одинаковой низкой вероятностью $P_i = 0,5$ ($i = 1,2,3$), вероятность прогноза выброса становится равной 0,875. Это уже достаточно высокая точность прогноза. При четырех одновременно анализируемых параметрах вероятность прогноза в исследуемых условиях становится равной 0,96875, что практически можно считать прогнозом со стопроцентной вероятностью.

Важным условием при выборе параметров, по которым ведется прогноз ГДЯ, является их функциональная независимость. Это означает, что корреляционная связь между ними либо должна отсутствовать вовсе, либо быть достаточно низкой. Для технических систем со стохастической структурой слабой считается функциональная связь между изучаемыми величинами в том случае, если коэффициент корреляции не превышает 0,4 [221].

Для экспериментов, которые по плану совершенствования акустической системы АК-1М выполнялись на угольных шахтах, разрабатывающих выбросоопасные пласты угля, были приняты три параметра.

Параметр K_1 , используемый в качестве основного в аппаратуре АППС и АК-1, представляет собой отношение амплитуды высоких частот A_v в спектре анализируемого сигнала к амплитуде низких частот A_n т.е.

$$K_1 = \frac{A_e}{A_n}. \quad (4.5)$$

Параметр K_2 равен отношению площади спектра S_t в текущий момент времени к площади спектра в предыдущий момент времени S_{t-1} , т.е.

$$K_2 = \frac{S_t}{S_{t-1}}. \quad (4.6)$$

Параметр K_3 равен отношению абсолютного значения разности площадей спектра в текущий и последующий моменты времени к количеству отсчетов в спектре Δt , т.е.

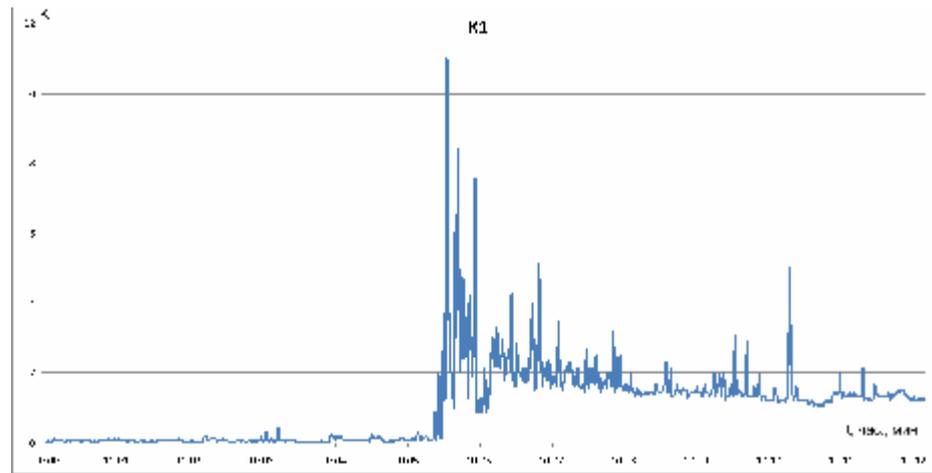
$$K_3 = \frac{|S_t - S_{t-1}|}{2000 \cdot \Delta t}. \quad (4.7)$$

Все параметры являются безразмерными величинами.

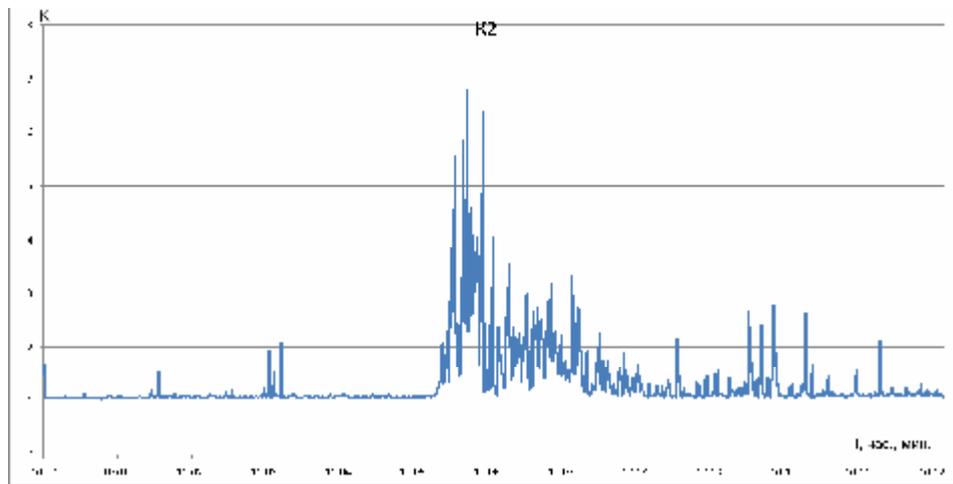
Функциональная независимость выбранных трех параметров K_i ($i = 1, 2, 3$) была проверена при регистрации внезапного выброса, произошедшего на шахте им. А.А. Скочинского 7 июня 2009 года в 10 часов 05 минут 27 секунд. На рис. 4.3. показано изменение параметров вырсоопасности во времени.

На рис. 4.4. приведена корреляционная зависимость между параметрами K_1 и K_2 при различных способа аппроксимации полученных значений: квадратическая, логарифмическая и степенная функции.

a)



б)



в)

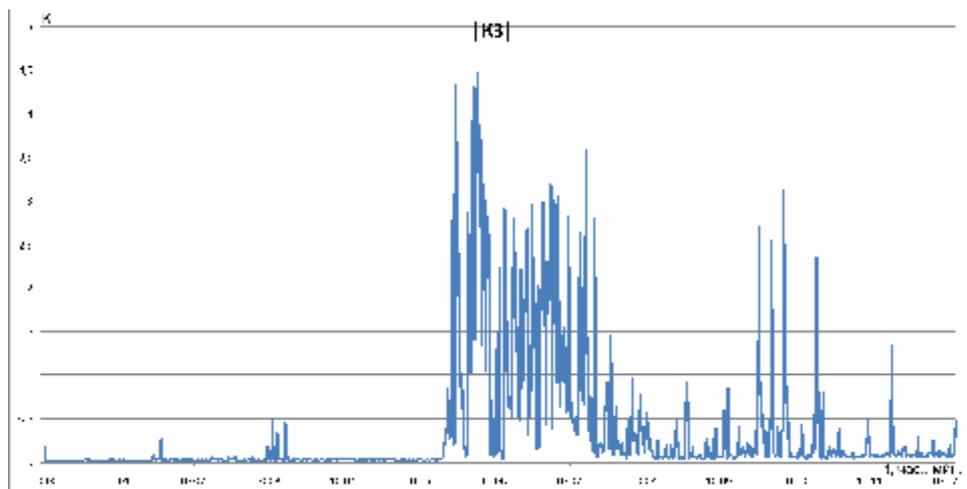


Рис. 4.3. Зависимость параметров выбросоопасности от времени t : а) K_1 ; б) K_2 ; в) $|K_3|$

На рис. 4.5 приведена корреляционная зависимость между параметрами K_1 и K_3 при тех способах аппроксимации.

На рис. 4.6 приведена корреляционная зависимость между параметрами K_2 и K_3 . Во всех случаях коэффициент корреляции не превышал 0,4. Это свидетельствует о том, что выбранные параметры вырсоопасности функционально слабо связаны между собой и могут быть приняты в качестве основных при многопараметрическом анализе акустических сигналов.

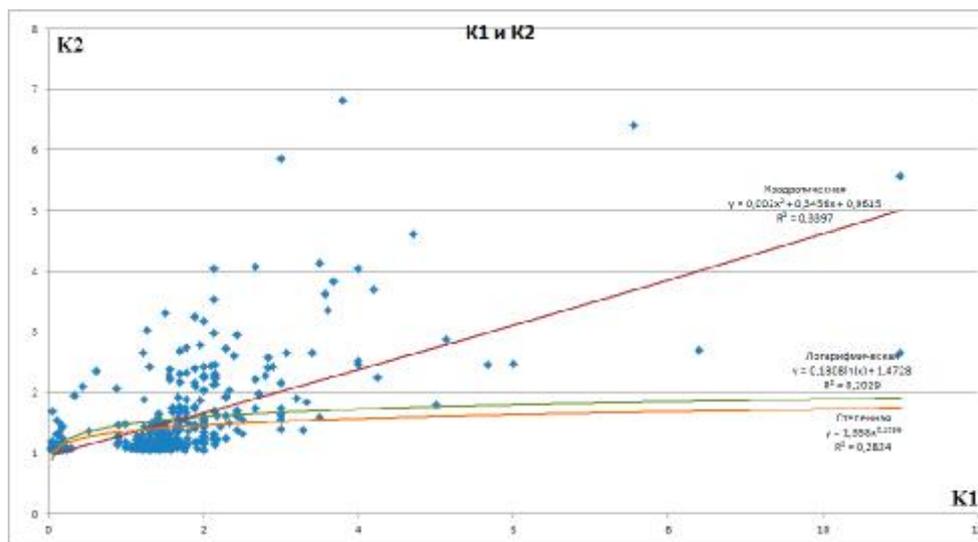


Рис. 4.4. Корреляционная зависимость между параметрами K_1 и K_2 : 1 – квадратичная, $R^2 = 0,3397$; 2 – логарифмическая, $R^2 = 0,2029$; 3 – степенная, $R_2 = 0,2824$.

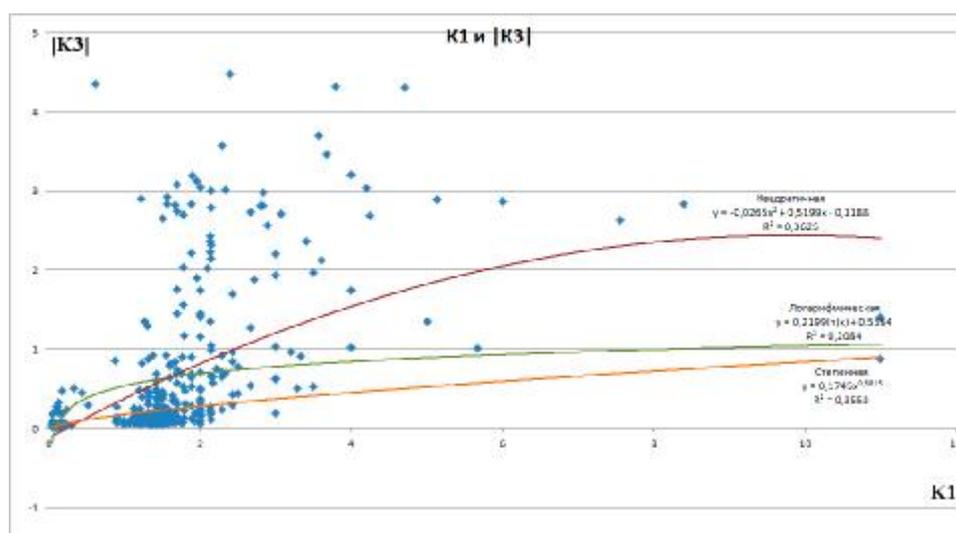


Рис. 4.5. Корреляционная зависимость между параметрами K_1 и $|K_3|$: 1 – квадратичная, $R^2 = 0,3625$; 2 – логарифмическая, $R^2 = 0,2084$; 3 – степенная, $R_2 = 0,3553$

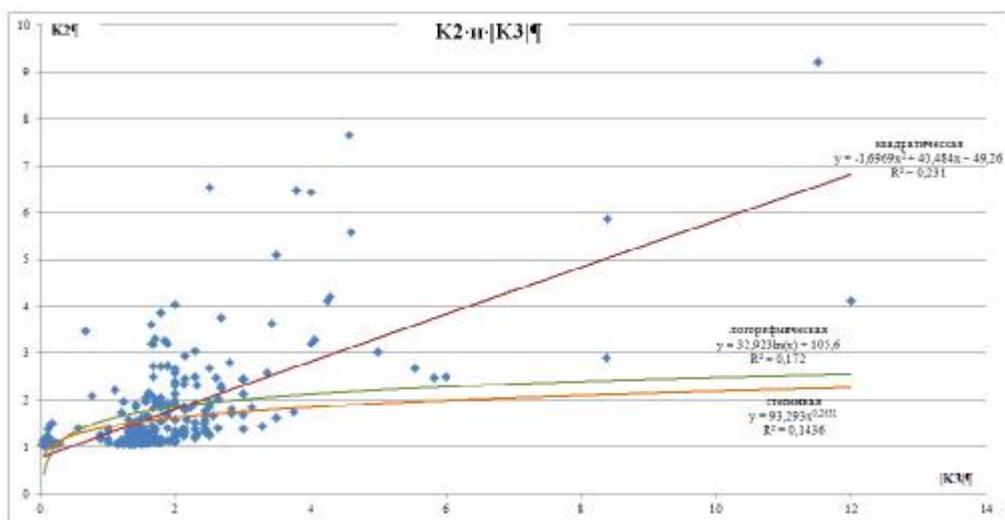


Рис. 4.6. Корреляционная зависимость между параметрами K_2 и K_3 :

1 – квадратическая, $R^2=0,231$; 2 – логарифмическая, $R^2=0,172$;

3 – степенная, $R^2=0,143$

При многофакторном анализе работа акустической системы АК-1М по обработке исходного сигнала организована следующим образом. Исходный сигнал, содержащий, вообще говоря, всю информацию о структуре и напряженном состоянии углепородного массива, попадает в приемное устройство-геофон (рис. 4.7), откуда с помощью подземного блока по открытой линии передается на поверхность в наземный блок обработки.

В этом блоке исходный сигнал дублируется и его три аналогии подвергаются самостоятельной обработке по трем параметрам K_1 , K_2 , K_3 . Результаты обработки в каждом случае сравниваются с некоторыми предельными значениями, анализируется с помощью программных средств и визуализируются на экране монитора. Так, например, граничным значением критерием вырсоопасности K_1 является уровень $K_1^{np}=3$. При равенстве параметра своему граничному значению, геомеханическая ситуация в углепородном массиве в смысле развития ГДЯ считается опасной.

Описанный выше многопараметрический способ оценки выбрсоопасности углепородного массива защищен патентом Украины [222].

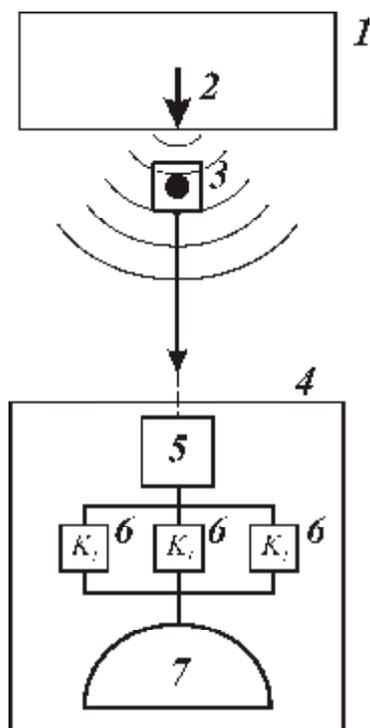


Рис. 4.7. Схема перемещения и обработки акустического сигнала в приборном комплексе АК-1М: 1 – выработка; 2 – источник звука; 3 – геофон; 4 – поверхностный приборный комплекс; 5 – дифференцирующее устройство; 6 – анализаторы критериев; 7 – визуализатор

4.2. Требования к аппаратуре АК-1М и методика проведения шахтных экспериментов

Требования к аппаратуре АК-1М делятся на функциональные, технологические и технические.

К функциональным требованиям относятся, в первую очередь, обеспечения сбора акустической информации из массива в окрестности проводимой выработки и передача ее на поверхность шахты для последующей обработки. Обработка сигналов проводится в ПЭВМ на основе методики многопараметрового анализа основных характеристик упругих колебаний, распространяющихся в углепородном массиве и зарегистрированных подземной частью аппаратуры. Исходя из этих соображений, аппаратурный комплекс состоит из подземной части, включающей датчик и служебные усилители, обеспечивающие необхо-

димое усиление сигнала, и его передачу по длинной (до 10 км) линии связи и наземной части, обеспечивающей прием сигналов с длинной линии связи, необходимую их фильтрацию от возможных помех в линии, питание подземной части искробезопасным выходным напряжением, согласование уровней принятых сигналов со входным устройством ПЭВМ. В состав наземной части входит сама ПЭВМ, обеспеченная соответствующим программным продуктом, для решения задачи конечного результата обработки акустической информации из массива в виде заключения «опасно» или «неопасно» в отношении ситуации в наблюдаемой области.

Таким образом, система сбора и передачи информации (подземная и наземная часть без учета ПЭВМ) из выработки на поверхность шахты и ПЭВМ являются функционально независимыми, что позволяет при необходимости применять различные системы аналогичного назначения при условии согласования их основных технических характеристик. Это, с одной стороны, обеспечивает гибкость разрабатываемой системы в отношении используемого аппаратного обеспечения с уже подтвержденными техническими характеристиками (в первую очередь – допущенными к использованию на сверхкатегорийных шахтах), с другой стороны – позволяет проводить параллельную разработку аппаратуры с улучшенными техническими характеристиками. Вместе с тем, повышение качественных показателей результирующего прогноза возможно за счет наращивания программного обеспечения ПЭВМ без необходимости технического переоснащения существующей системы.

Технологические требования состоят в том, что применение аппаратуры АК - 1М не должно влиять на качество технологических процессов. Использование упругих колебаний, распространяющихся в углепородном массиве в качестве носителя информации о его состоянии позволяет устанавливать приемные датчики на удалении от места проведения основных работ, достаточном для обеспечения невмешательства в используемую технологию добычи (проходки).

Ограниченные возможности чувствительности системы сбора и передачи информации приводят к необходимости периодической перестановки приемных датчиков по мере подвигания выработки при одновременном гарантировании их радиуса действия. Последний должен периодически подтверждаться (согласно требованиям нормативной документации) простукиванием лавы вдоль всей длины по пикетам, и составлять не менее 100 м для одного датчика. Таким образом, для обслуживания одной лавы требуется как минимум 2 датчика с соответствующими линиями связи. При проведении наблюдений в подготовительной выработке достаточным является использование одного датчика.

Место и способ установки датчика определяется дополнительными требованиями, выполнение которых гарантирует оговоренный выше радиус действия всего блока подземного. Для его обеспечения используется различие прочностных свойств угля и вмещающих пород. Поскольку объектом исследования является угольный пласт на глубину, соизмеримую с протяженностью зоны ПГД, упругие колебания пройдя сквозь эту область, ретранслируются в сторону обнажения и далее структурной составляющей массива, имеющей малое (как минимум на порядок меньше) акустическое сопротивление. Здесь имеются в виду слои песчаника, прочность которых приблизительно в 20 раз выше прочности угля. Таким образом, слой песчаника в кровле выполняет роль своеобразного волновода.

Датчик устанавливается в шпур, подготовленный путем перебурирования угольного пласта до контакта с основной кровлей (песчаником) по восстающей под небольшим углом, необходимым для отлива внутрипластовой воды. Обычно глубина шпура составляет около 2 м. отдельным требованием по обеспечению радиуса действия является необходимость расклинивания датчика в шпуре после его установки с целью обеспечения качественного механического контакта с массивом. Однако, в зависимости от конкретных горно-геологических условий, такая возможность создается за счет задавливания тела датчика массивом, на что требуется резерв времени около 1-2 суток. Дополнительная фильтрация принимаемых из массива акустических колебаний от их неинформатив-

ной составляющей, присутствующей в воздушной среде выработки достигается герметизацией устья шпура, выходящего в выработку.

Технические требования состоят в том, что аппаратура АК-1М должна обладать определенными техническими характеристиками. К особенностям работы системы сбора и передачи информации следует отнести требование поддержания уровня выходного сигнала в пределах допустимой области изменения его амплитуды, ограниченной возможностями входной части ПЭВМ и составляющей не более 40 дБ относительно 0 дБ (в меньшую сторону). Соблюдение этого требования составляет достаточно сложную задачу.

Сложность заключается в том, что изменения уровня полезного сигнала при работе породразрушающего механизма укладывается в диапазон порядка 40 дБ при условии постоянства местонахождения его источника по отношению к датчику, и может быть скомпенсировано усилением блока подземного. В случае же изменения местоположения источника сигнала (что имеет место при подвигании комбайна вдоль лавы, перестановке датчика и удержания сигнала в пределах неискаженного усиления самого блока подземного, блока приемного поверхностного и входной части ПЭВМ. Выход за пределы неискаженного усиления является совершенно недопустимым, поскольку принимаемый сигнал в дальнейшем подвергается обработке различными методами для осуществления многопараметрового анализа.

Поскольку местонахождение источника сигнала по отношению к датчику в реальной обстановке оказывается неизвестным, то необходимый коэффициент усиления оказывается также неизвестным. Обычно применяемые методы решения такой задачи в виде создания усилителя с автоматической регулировкой усиления (РУ) для данного случая являются неприемлемыми, поскольку с одной стороны с введением системы АРУ в усиленном сигнале появляются новые частотные компоненты, обусловленные ее собственной постоянной времени, с другой стороны происходит деформирование сквозной амплитудно-частотной характеристики всего усилительного тракта.

Таким образом, требования достаточной чувствительности блока подземного (радиус действия) и необходимости наблюдения за объектом с изменяемым местоположением, оказываются взаимно противоречивыми. При этом следует отметить, что вопрос о шумовых характеристиках системы не обсуждается. К возможным решениям поставленной задачи можно отнести системы с программируемым особым образом усилением, либо системы с передаточной характеристикой особого вида.

Требования к диаграмме направленности датчиков должны рассматриваться в зависимости от конкретного типа используемых датчиков и решения конкретной задачи. В данном случае ставится задача оценки состояния исследуемой области массива с точки зрения вероятности возникновения ГДЯ без уточнения его места формирования. Исходя из такой постановки задачи, датчики могут иметь диаграмму направленности, близкую к круговой. Как показала практика, обычно применяются в шахтных условиях датчики двух типов - электродинамические и пьезоэлектрические. И те, и другие имеют ярко выраженную осевую чувствительность, поэтому при последовательном анализе продольной и поперечной составляющих колебаний может возникнуть необходимость либо соответствующей ориентации самого датчика, либо использования блока датчиков. При создании диаграммы направленности близкой к круговой с помощью одного датчика возможно применение технических решений, основанных на создании специальной конструкции держателя датчика.

Специальные требования к частотному диапазону используемых датчиков не предъявляются, поскольку практически измеряемые амплитуды принимаемых колебаний источника, находящегося на расстоянии до 200 м от датчика регистрируются в частотной области, не превышающей 5000 Гц, что вполне укладывается в технические характеристики указанных типов датчиков.

Требования к линии связи блока подземного с наземной не могут выставляться, поскольку в качестве такой линии используется одна пара (открытая, витая) стандартного телефонного кабеля. При разработке входных-выходных устройств передачи сигналов в линию наземной и подземной части необходимо

учитывать наличие импульсных помех от сигналов в соседних парах кабеля с амплитудой до 100 В (система «Ветер» и и т.д.)

При выборе объекта исследований проводится анализ горногеологических условий, планов горных работ, и технологии отработки горного массива на шахте с целью уточнения параметров источника сигнала, возбуждающего упругие колебания в массив, цикличность его работы.

При выборе выработки учитываются такие факторы как пересечение зон геологических нарушений, наличие ГДЯ за время проведения испытаний. Выработка должна быть оборудована кабелем для подключения аппаратуры через отдельную кабельную сеть (рис. 4.8).

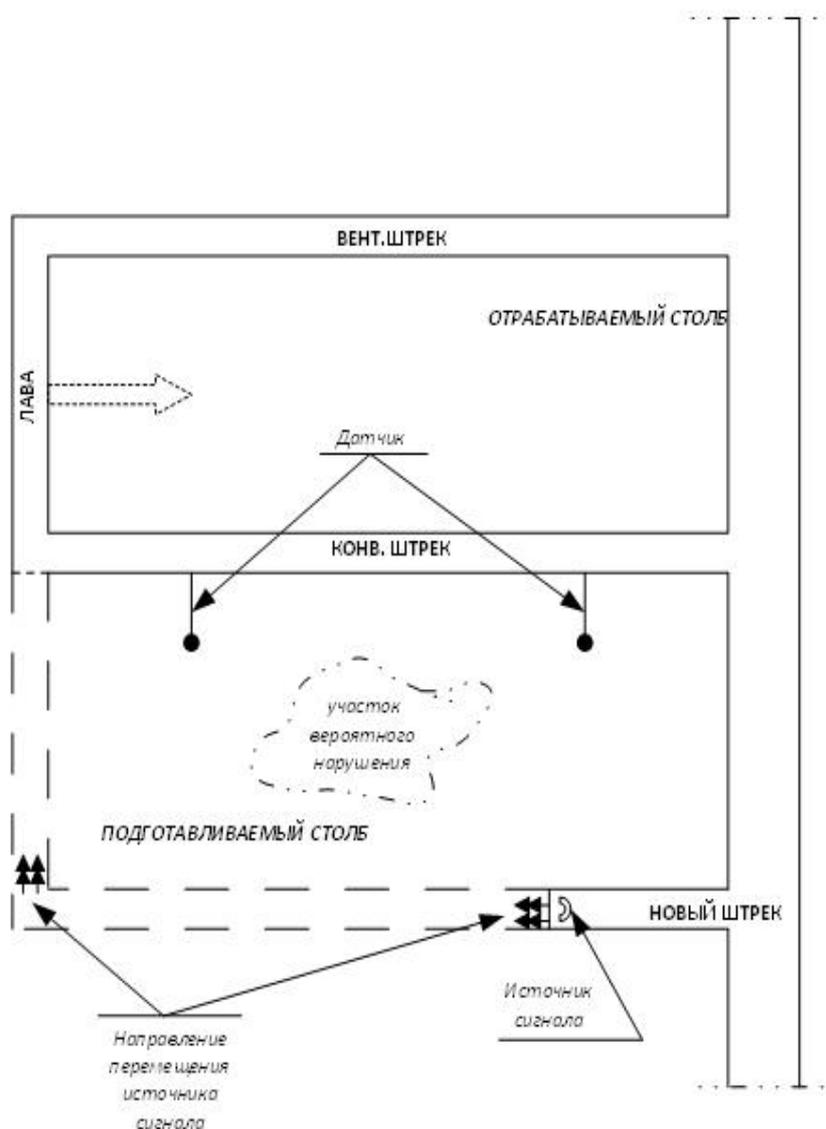


Рис. 4.8. Схема проведения измерений

Для осуществления замеров применялась аппаратура акустического контроля АК-1М, состоящая из наземного блока обработки сигналов, расположенного на поверхности в помещении АСУП шахты, и подземной капсулы-усилителя с выносным геофоном, расположенных на подземной замерной станции. Замерная станция представлена собой шпур диаметром 42 мм и длиной 2 м, пробуренный в породах кровли на расстоянии 15-20 м от груди забоя с размещенной в нем геофоном (рис. 4.9).

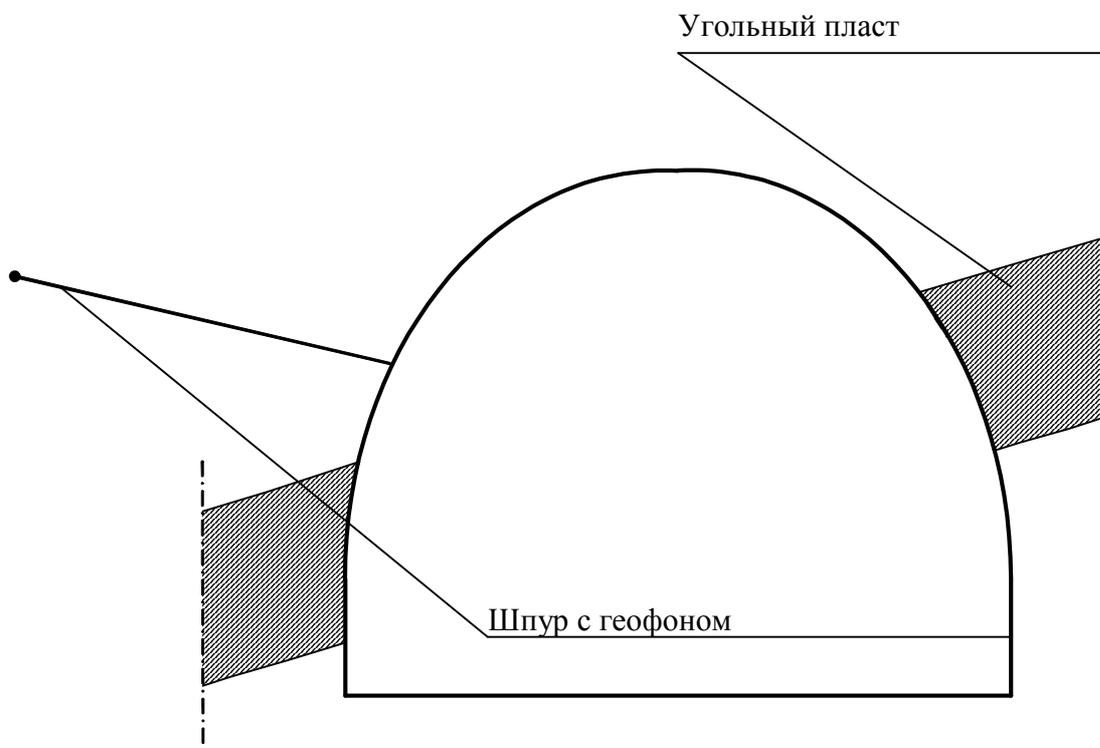


Рис. 4.9. Схема замерной станции

Связь надземной и подземной частей аппаратуры происходит по штатной линии связи («открытая пара») общешахтной системы АГЗ или внутришахтной связи.

Переход замерной станции в рабочий режим измерения происходит по истечении 1-2 суток с момента установки подземной части, которые необходимы для обжатия геофона породами.

По мере подвигания забоя (по мере увеличения расстояния до источника звука – проходческого комбайна) на расстоянии до 50 м от геофона, готовится следующий шпур, устанавливается второй геофон и надземный блок переключается на новый геофон.

Геофон, установленный на предыдущей станции, извлекается и используется в дальнейшем для подготовки следующих станций.

Надземная часть аппаратуры анализирует поступающий из шахты сигнал. Результат анализа шума работы комбайна или шума бурового инструмента фиксируется на жестком компьютере, установленного рядом с наземным блоком аппаратуры АК-1М в помещении АСУП, в виде кривой, отображающей уровень напряжений, которые возникают впереди забоя штрека в нетронутой области горного массива.

При установке на шахте акустической аппаратуры с момента ее запуска в работу производится первичное накопление результатов акустического анализа состояния выработки и сопоставление получаемой информации с данными обследования выработки путем применения нормативных локальных методов оценки ее состояния с целью формирования «базовых уровней» для аппаратуры акустических измерений. Время накопления должно составлять не менее 3-х проходческих циклов, либо выемки не менее 3-х полосок угля. Ситуация в выработке, оцениваемая локальными методами, должна быть неопасной. При использовании метода и аппаратуры АК-1М в этом случае производится установка режимов фильтрации для данной выработки. Нормальному режиму фильтрации аппаратуры соответствуют показания ее выходного устройства в пределах значений $K_1 = 0,5 - 0,1$ при работе механизмов. При проведении последующих измерений выбранные режимы оставались неизменными.

Хранению на жестких носителях подлежат исходная акустическая информация, переданная из забоя выработки в виде шума работающих в ней механизмов (с отметкой времени, номера выработки и т.д.).

Обработка информации заключалась во взаимной увязке всех полученных данных с целью получения целостной картины процесса изменения напря-

женного состояния массива и отбора промежутков времени, соответствующих работе механизмов в выработке, генерирующих в массив упругие колебания. Этот отбор производился на основании данных: полученных из журнала, заполняемого операторами службы сейсмопрогноза шахты по показаниям времени начала-окончания работ в забое с указанием вида работ.

В качестве объектов исследований были выбраны три шахты: Краснолиманская, Красноармейская-Западная № 1 и им. А.А. Скочинского.

4.3. Прогноз ГДЯ на ГП «Угольная компания «Шахта Краснолиманская»

4.3.1. Геологические особенности шахтного поля

Шахтное поле расположено в висячем крыле крупного Центрального надвига. Залегание каменноугольных пород моноклиналиное, с падением пластов на восток и северо-восток под углом 30-140.

На участке, в северо-восточной его части, прослеживается пологая флексура с поднятым северо-западным крылом, амплитуда флексуры порядка 100 м. Кроме того, залегание пород осложнено рядом дизъюнктивных нарушений типа «сброс» и «взбросов».

Разрывные нарушения в основном развиты в зонах расчленения Центрального надвига на 2-3 ветви, и в большинстве своем сопровождают его Глубокоярский сброс.

Так, в центральной и в восточной частях участка, в зоне шириной 0,8-1,5 км, прослеживается большая группа нарушений: сбросы 2, 5, 6, 11, 12, 13, 15, 14, Грачевский, Федоровский, 1-й и Грушевский, 7, 8, взбросы 3, 4 7. Глубокоярский сброс. Из перечисленных нарушений только Грушевский и Глубокоярский сбросы имеют развитие к юго-востоку. В северной части сгруппированы взбросы 6 и сброс 4, а несколько восточнее Безымянный сброс и взброс 5. В юго-

восточном направлении Глубокоярский сброс сопровождаются сбросы 9, 10, взбросы 1, а также сброс 3 и взброс 2.

Таким образом, участок условно делится на 3 блока, заключенных между Центральным надвигом, Грачевским и Грушевским сбросами на севере; Грушевским, Глубокоярским и сбросом 3 в центральной части, сбросами 3 и Глубокоярским на юге.

Центральный надвиг и Глубокоярский сброс разведаны детально, за исключением фланговых частей участка, где они отстроены с некоторой долей условности из-за редкой сети скважин. Надвиг вскрыт по падению 3-5 скважинами в нескольких профилях, горными работами подсечена только зона мелкоамплитудной нарушенности, сопровождающая надвиг. Особенностью Глубокоярского сброса является то, что в северо-западной части он многоступенчатый и на всем своем простираении сопровождается взбросами и мелкими сбросами. Амплитуда его по мере удаления от Центрального надвига уменьшается от 80 м до 40-20 м.

Амплитуда Федоровского сброса вблизи надвига составляет 80-40 м, затем, резко уменьшается до 10-15 м и далее к юго-востоку сброс затухает. Грушевский сброс пересекает почти все шахтное поле в центральной части с амплитудой 5-10 м.

Горными работами вскрыт и прослежен Краснолиманский сброс, который сопровождается серией мелких нарушений с амплитудой от 0,5 м до 4 м.

Грачевский сброс скважинами не подсечен, установлен графически, четко фиксируется сейсморазведкой. Характеризуется резким затуханием по мере удаления от надвига.

На оцениваемой площади ведения горных работ осложнялось влиянием зон Центрального надвига, Краснолиманского, Глубокоярского, Федоровского и Грачевского сбросов и сопровождающих их серии мелкоамплитудных разрывных нарушений. Подход, вскрытие и пересечение выше указанных геологических нарушений сопровождалось обрушением пород кровли от 1,0 до 10 м;

преимущественно повышенным газовыделением, в редких случаях повышенным водопроявлением.

Центральным уклоном пласта l_3 был вскрыт и пересечен Глуболярский сброс, являющийся в данной части шахтного поля морфологически сложным и представлен рядом плоскостей смещения, ширина зоны составляет 60-70 м, общая амплитуда смещения около 3 м. При проведении выработки в данном интервале наблюдалось: обрушение пород кровли до 3 м; при вскрытии плоскостей смещения по трещинам выделение воды (общий приток составил $1 \text{ м}^3/\text{час}$), повышенное газовыделение.

Шахтой разрабатываются два пласта – k_5 и l_3 .

Угольный пласт l_3 сложного трехпачечного строения с прослоями алевролита. Угольный пласт угрожаем по внезапным выбросам с ведением прогноза при достижении глубины в 400 м. Пласт опасен по пыли. К самовозгоранию не склонен. По горным ударам не опасен.

Характер пород непосредственной кровли неустойчивый (Б2), местами весьма неустойчивый (Б1). Пласт характерен наличием среднеобрушаемой основной кровли (А2).

Наблюдаются нарушения типа «сброс», при подходе к которым, вскрытии и пересечении возможны обрушения пород кровли, местные водо и газопроявления, в том числе в виде суфляров, а также разрушения пород почвы и прорыв метана. Пласт и вмещающие породы содержат зоны повышенной трещиноватости от Федоровского и Грачевского сброса.

Ожидаемый приток воды до $15 \text{ м}^3/\text{час}$. При проведении выработки прогнозируется разрушение пород почвы на глубину 8,50 м и прорыв метана.

Пласт k_5 имеет сложное двухпачечное (в начале) и трехпачечное (далее) строение, мощность верхней (первой) пачки – 1,25-1,35 м, второй пачки – 0,68-0,77 м, междупластье представлено аргиллитом-«кучерявчиком» мощностью 0,17-0,31 м, мощность третьей пачки – 0,10-0,25 м, междупластье представлено аргиллитом-«кучерявчиком» мощностью 0,15-0,24 м. Пласт среднезольный

(26,9-29,8 %, среднее значение золы – 28,4 %), среднесернистый (2,0-2,6 %, среднее содержание серы составляет 2,3 %).

Марка угля Жк. Непосредственная кровля пласта представлена аргиллитом мощностью 1,75–3,5 м, неустойчивой (Б2), склонной к обрушению, устойчивость которой снижается до (Б1) в условиях водонасыщения и пересечения геологических нарушений.

Основная кровля среднеобрушаемая (А2). Непосредственная почва представлена преимущественно алевролитом, аргиллитом комковатой текстуры «кучерявчик». В очистных выработках почва ожидается среднеустойчивая (П2), в условиях водонасыщения и пересечения геологических нарушений склонная к пучению и размоканию неустойчивая (П2).

Газоносность пласта k_5 высокая, составляет 16,7-23,0 м³/тс.б.м. Влияние тектонических нарушений на распределение газа неоднородно, чаще всего – экранирующее. Максимальное значение газоносности приурочено к Краснолиманскому сбросу и тектоническим нарушениям с амплитудой смещения 0,2-2,0 м. При вскрытии тектонической нарушенности и трещиноватости не исключены суффлярные метановыделения и внезапное загазирование выработок.

Угольный пласт k_5 до изогипсы 700 – угрожаемый, ниже изогипсы 700 – выбросоопасный. Температура вмещающих пород составила при подготовке лавы 38,6°С. Уголь пласта k_5 не склонен к самовозгоранию. Угольная пыль пласта взрывоопасна.

В качестве объектов исследований, в которых была развернута аппаратура акустического наблюдения АК-1М, приняты следующие выработки:

- вентиляционный ходок 1-й западной лавы засбросовой части пласта l_3 ;
- конвейерный ходок 1-й западной лавы засбросовой части пласта l_3 .

За все время отработки пласта произошло 4847 выбросов угля, породы и газа. Из них:

а) по углю – 1288, в т.ч.: в очистных выработках – 556, с максимальной интенсивностью 1545т; в подготовительных выработках – 763, с максимальной интенсивностью 2000т; внезапных – 13;

б) по породе – 3538;

в) в опережении – 17.

В качестве объектов исследований, в которых была развернута аппаратура акустического наблюдения, приняты следующие выработки:

– вентиляционный ходок 3-й восточной лавы уклонного поля центрального блока (УП ЦБ) пласта h_6^1 ;

– конвейерный штрек 3-й восточной лавы УП ЦБ пласта h_6^1 .

4.3.2. Прогноз ГДЯ в вентиляционном и конвейерном штреках западной лавы засбросовой части пл. l_3

Обработка информации заключалась во взаимной увязке всех накопленных данных с целью получения целостной картины процесса изменения напряженного состояния массива и отбора промежутков времени, соответствующих работе механизмов в выработке, генерирующих в массив упругие колебания. Отбор производился на основании данных, взятых из журнала, заполняемого операторами службы сейсмопрогноза шахты по показаниям времени начала-окончания работ в забое с указанием вида работ.

Анализ информации заключался в наблюдении изменения уровня сигнала показаний аппаратуры АК-1М на электронном самописце с течением времени, т.е. в процессе подвигания забоя, и учета данных о текущей обстановке в забое. На рис 4.10 показаны примеры обработанных пятиминутных фрагментов записи регистрационной информации с результатами статистической обработки.

Информация, зарегистрированная с помощью регистратора, подвергалась предварительной обработке – сглаживанию (усреднению) на пятиминутном интервале.

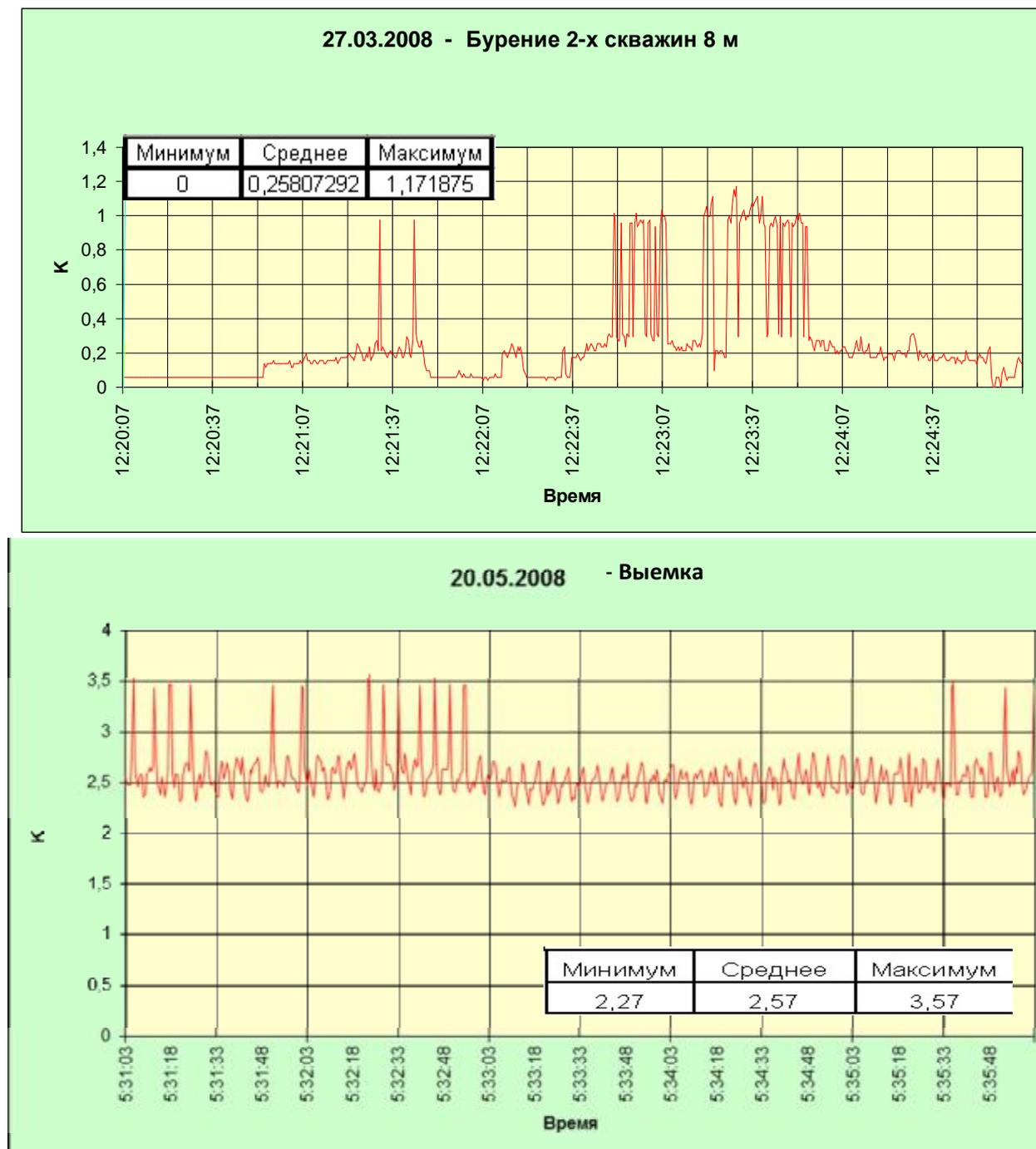


Рис. 4.10. Фрагменты пятиминутной записи регистрационной информации с результатами статистической обработки

Это позволило минимизировать флуктуации информационного сигнала, обусловленные неравномерностью воздействия рабочего органа комбайна с породным массивом, а также устранить влияние стационарных и нестационарных

помех, накладывающихся на полезный сигнал, передаваемый по линии связи. Пример такой обработки представлен на рис. 4.11.

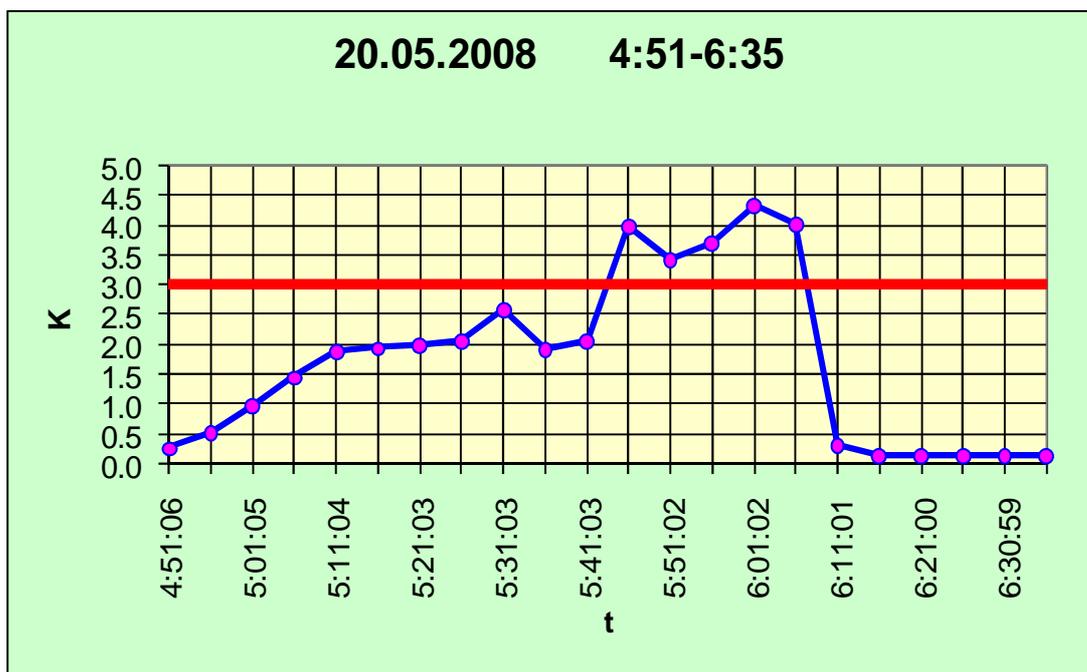


Рис. 4.11. Пример предварительной обработки записи информационного сигнала аппаратуры АК-1М

Полученные в результате обработки усредненные значения обозначены маркерами-кружочками и условно отнесены к началу анализируемого пятиминутного интервала. Для получения общей картины поведения комплексного показателя выбросоопасности K в течение времени наблюдения с 22.03.2008 по 02.06.2008 года, что соответствовало подвиганию проходческого комбайна на 290 м, были объединены все посуточные интервалы записи показателя K , характеризующего степень напряженности массива. Они были совмещены с данными выполняемых работ, что позволило осуществить отбор информативных показаний аппаратуры АК-1М.

На рис. 4.12 приведены почасовые интервалы времени записи показаний аппаратуры АК-1М в относительных единицах относительного уровня напряжений показателя K в массиве при различных видах работы (выемка, бурение, нагнетание) по мере подвигания забоя в период с 05.05.2008 по 26.05.2008 года.

Внутри суток отмечаются часовые интервалы времени, что позволяет привязать показания аппаратуры АК-1М к местоположению работающего комбайна.

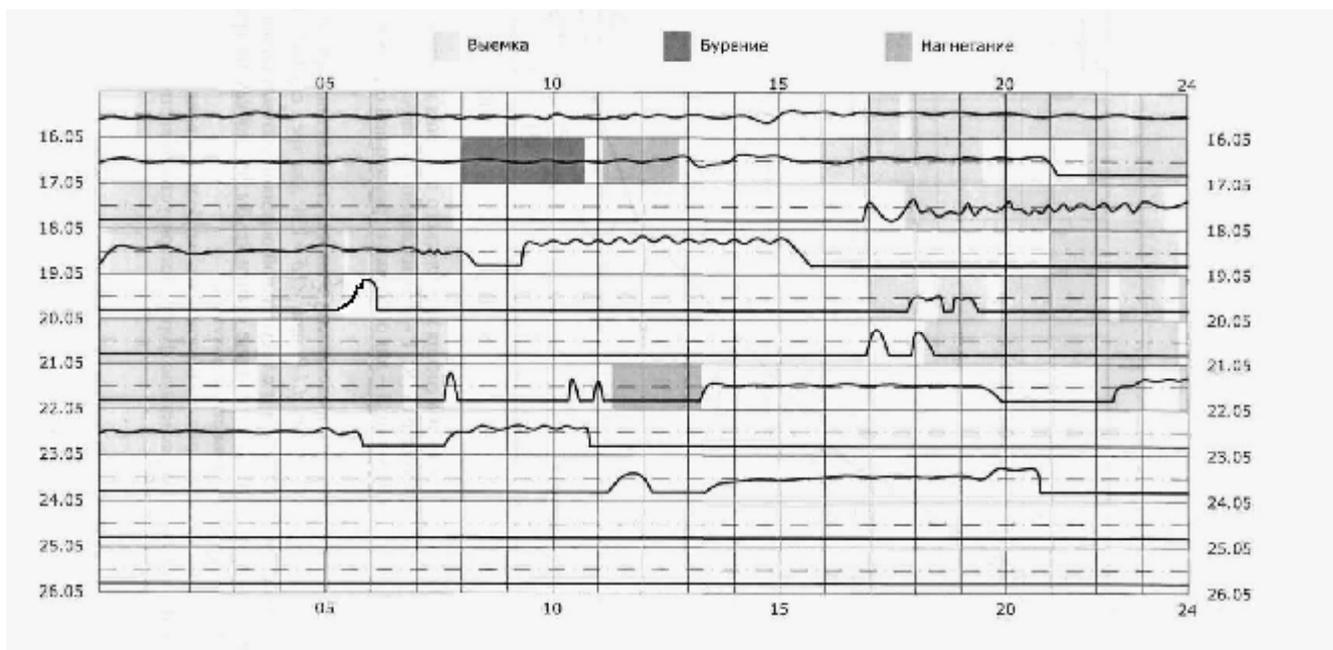


Рис. 4.12. Почасовые интервалы времени записи показаний аппаратуры АК-1М в относительных единицах относительного уровня напряжений (К)

Комплексный показатель выбросоопасности K отражает результат обработки спектрального состава акустических колебаний, которые распространя-

ются в массиве на некотором расстоянии от их источника. Изменения величины показателя K вызваны изменениями НДС на достаточном удалении от источника колебаний. Уменьшению значений K соответствует уменьшение уровня напряжений и наоборот. Пунктиром на рис. 4.11 показан уровень показателя выбросоопасности K_1 , соответствующий прогнозу “опасно”, т. е. $K=3$. Информативными считались только показания аппаратуры АК-1М, зафиксированные в процессе выемки при работающем комбайне.

На рис. 4.13 представлен результирующий график суточного прогноза на основе показаний аппаратуры АК-1М, дающего оценку общей ситуации в забое за весь период наблюдения с 22.03.2008 по 05.06.2008 года. За это время выработка, в которой проводились замеры, подвинулись на 290 м. При наличии в течение суток хотя бы одного прогноза “опасно” результирующий суточный прогноз считается “опасно”, и отображается на графике единичным столбцом. Если в течение суток не было прогноза “опасно”, то результирующий суточный прогноз считается “не опасно” и отображается на графике нулевым уровнем.

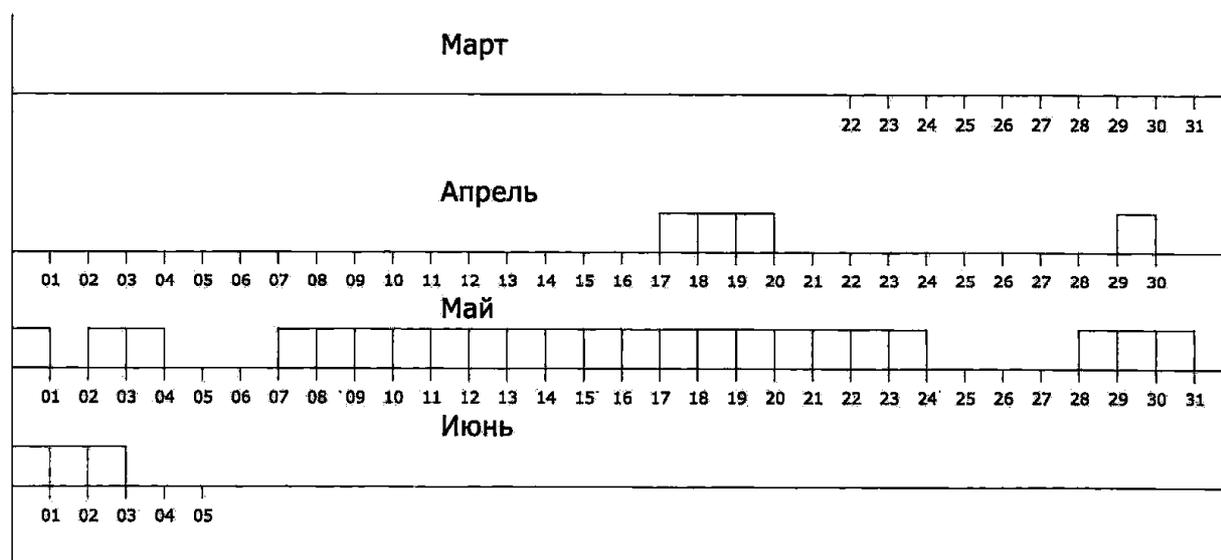


Рис. 4.13. Результирующий график суточного прогноза на основе показаний аппаратуры АК-1М, за период наблюдения с 22.03.2008 по 05.06.2008 г.г.

В период с 23.05 по 29.05 наблюдения не проводились в связи с остановкой работы шахты по причине внезапного выброса угля и газа в вентиляционном ходке 2-й Западной лавы пласта l_3 произошедшем в 03:11 23.05.2008 года.

Вследствие аварии из-за внезапного выброса угля и газа было засыпано на 80 % сечение 220 м вентиляционного ходка 2 западной лавы засбросовой части пласта l_3 гор. 845 м, и застигнуто 14 человек, из них 11 человек погибло и 3 пострадавших отправлены на медицинское обследование и лечение.

В первую смену 22.05.2008 г. в забое вентиляционного ходка 2-й западной лавы были выполнены контроль эффективности гидрорыхления по начальной скорости газовыделения. По показателям горного мастера участка «Прогноз», во время бурения шпура в левой части забоя на глубине более 2,5 м он вошел в породу. Новый шпур пробурили на 0,3 м ниже первого. На всех интервалах этого шпура начальная скорость газовыделения составляла 0,0 л / мин.

Во вторую смену 22.05.2008 г. была начата выемка угля на 1,0 м, но из-за поломки двигателя питателя она была завершена в третью смену 22.05.2008 г.

По показаниям машиниста выемочных машин после 23 часов 22.05.2008 г. он сделал в правой стороне забоя подрывку подошвы комбайном на последних двух рамах и выемку угля на 1,0 м. Далее он совершил маневр для выемки угля в левой стороне забоя. При зачистке по левой стороне «выбило» напряжение на комбайне. Загорелась красная лампочка на ТМРК и замелькали главные светильники СМС. Появились признаки повышенного давления на рамы крепления. Четыре забойные рамы были зажаты, но не деформированы. Датчик ППИ, контролирующий шаровые скопления (10-15 м от забоя), показывал 2,8-3,0 % метана. Рабочие ушли от забоя на 40 м и остановили работающий конвейер. Примерно через семь минут «выбило» напряжение забоя. Когда поставки электроэнергии были восстановлены (через 20-30 мин), горный мастер участка позволил продолжить выемку угля в левой стороне забоя. По окончании выемки угля установили две рамы арочного крепления. В нижней части забоя с правой стороны по показаниям появился «сбросик».

Анализ телеметрической информации аппаратуры КАГИ показал, что в 23 часа 55 мин 22.05.2008 г. в забое вентиляционного ходка 2-й западной лавы произошло повышение концентрации метана до 0,71 % (датчик Д2И-164), а на выходе с выработки (Д1И -164) - до 1,19%.

По сообщению оператора АГЗ в 03 часов 31 мин 23.05.2008 г. в вентиляционном ходке 2-й западной лавы пропала телеметрия от призабойного датчика Д2И-164, а на выходе из выработки (датчик Д1И-164) концентрация метана выросла до 2,5%.

Участок, на котором произошел выброс, не относился к зоне наблюдения при проведении текущего эксперимента. Учитывая, что ГДЯ характеризовалось большой мощностью, показательным является факт, достаточно длительной подготовки массива к последующей его разгрузке (показания «опасно» на протяжении последних перед выбросом 15 суток).

4.4. Прогноз ГДЯ на ГП «Шахта им. А.А. Скочинского»

4.4.1. Горно-геологические условия

Строительство «Шахта им. А.А. Скочинского» начато в 1963 году.

В 1975 году шахта сдана в эксплуатацию. Производственная мощность в 2010 500 тыс. тонн угля.

Шахта относится к «Опасной по внезапным выбросам угля, породы и газа». Относительная газообильность 109,3 м³/т, абсолютная – 38,99 м³/мин.

В период строительства 1964-1973 г.г. на шахте зафиксировано 16 выбросов угля и газа.

Первый выброс при эксплуатации шахты был в верхней нише 1 западной лавы западной панели 30.08.1975 г. на глубине 958 м.

Размер шахтного поля по простиранию 22 км, а по падению 4 км. Шахтное поле разделено на 3 блока и вскрыто 7 вертикальными стволами глубиной 944 м - 1293 м.

Подготовка шахтного поля - панельная, система разработки – сплошная и комбинированная.

Схема проветривания шахты – блочная, способ проветривания всасывающий.

Вентиляторные установки расположенные на скиповом стволе (ВЦД-31.5), восточном вентиляционном стволе № 1 (ВЦД-3.3) и западном вентиляционном стволе № 2 (ВЦД-47У). Расчетное количество воздуха на проветривание шахты составляет 17673 м³/мин, фактически в шахту подается – 21990 м³/мин.

Добыча угля ведется в 3 лавах: 5 западной лаве западной панели, 2 западной лаве уклонного поля центральной панели и 2 восточной лаве уклонного поля центральной панели.

Лавы оснащены механизированными комплексами 2КД-90, 3КД-90 и КМК-500. Для выемки угля применяются узкозахватные комбайны 2ГШ-68.

Конвейерные и вентиляционные штреки проводятся вслед за лавой с отставанием породного забоя от линии очистного забоя на 8 м.

Контроль выделения метана в горных выработках осуществляется стационарной аппаратурой УТАС, АТЗ-1 и АТ 1-1.

Комплексом мер по предотвращению внезапных выбросов угля и газа в очистных забоях предусмотрено проведение по всей длине лавы гидрорыхление угольного пласта. Для этого бурятся скважины длиной 8 м через 9.6 м по длине лавы.

Контроль эффективности осуществляется по динамике начальной скорости газовыделения контрольными шпурами длиной 3.5м.

Для гидрорыхления угольного массива используются насосные установки СНТ, высоконапорный рукав, гидрозатворы и контрольные измерительные приборы.

За время работы шахты на 01.012011 года при ведении очистных и подготовительных работ произошло 4926 газодинамических явлений. В том числе 1381 – при ведении горных работ по углю и 3545 – выбросов песчаника и газа.

Из газодинамических явлений, которые произошли при ведении горных работ по углю, в очистных забоях произошло 585 и в подготовительных 796.

15 внезапных выбросов угля и газа сопровождалось смертельными травмами, 5 из них произошли в подготовительных забоях при работе ручными инструментами после сотрясательного взрывания.

Максимальная интенсивность выброса в очистном забое – 1545 т, а в подготовительном 2000 т.

Марки угля: Г, Ж. Мощность пласта в пределах участков, намеченных к отработке, изменяется от 1,20 до 2,30 м, средняя мощность составляет 1,75 м.

Угольный пласт имеет сложное строение, сложен двумя угольными пачками: верхней – мощностью 0,06-0,27 м и нижней – мощностью 1,1-1,58 м, разделенными прослоем глинистого сланца мощностью 0,05-0,60 м. Коэффициент крепости угля по шкале проф. Протоdjяконова $f=1,0$, породных прослойков – $f=2,0$. Угол падения угольного пласта в разрабатываемой части составляет 8-14°. Технические характеристики угля: зольность пластово-промышленная – 13,2-32,4%, сера – 1,1%, выход летучих веществ – 33,3-34,2%.

Угольный пласт h_6^1 особо опасный по внезапным выбросам угля и газа, суфлярным выделениям, опасный по взрывчатым свойствам угольной пыли, по самовозгораемости отнесен к III категории по классификации НИИГД. Природная метаноносность пласта до 17-20 м³/т г.м.

Непосредственная кровля пласта представлена глинистым сланцем крепостью 4,0, мощностью в разрабатываемой части шахтного поля 2,65-8,6 м. Часто указанный слой отделен от вышележащего массива непосредственной кровли притёртой поверхностью или углисто-глинистыми прослоями, с чем связаны «ложная» кровля и обрушения пород на полную мощность слоя.

В 3 восточной лаве УПЦП в нижней части непосредственно над пластом залегает неустойчивый слой сланца глинистого мощностью 0,8-1,7 м, отделенный от массива непосредственной кровли тонким 0,03-0,05 м углистым прослоем, который имеет слабую спайность с массивом непосредственной кровли.

По устойчивости глинистый сланец непосредственной кровли относится к малоустойчивым (Бз), а в местах геологических осложнений к категории неустойчивых (Бг).

Основная кровля пласта – сланец песчаный, темносерый, горизонтальнослоистый, слабослюдистый, трещиноватый, крепостью 5-6. Мощность слоя 4,0-6,4 м. По обрушаемости сланец песчаный основной кровли относится к категории легко или среднеобрушаемым (Аг). В 3 восточной лаве УПЦП, также в основной кровле, выше сланца песчаного мощностью 7,60-17,65 м, залегает выбросоопасный песчаник мощностью 0,85-4,00 м.

Непосредственная почва пласта – сланец песчаный крепостью 3-5. Мощностью в разрабатываемой части шахтного поля 0,9-2,75 м, в начале слоя (до 0,6 м) – «кучерявчик» крепостью 3-4, пучащий, местами влажный.

По устойчивости сланец песчаный непосредственной почвы относится к среднеустойчивым (Пг), категории пучащих пород, нижележащий слой сланца песчаного характеризуется более высокой крепостью 4-5 устойчивостью Пз.

Основная почва – песчаник от светлосерого до серого, мелко-среднезернистый, кварц-полевошпатный, слюдистый, опасный по выбросам. Мощность слоя 39,6-60,0 м, крепость 7-9. Относится к категории устойчивых.

Породы кровли и почвы в естественном состоянии преимущественно сухие, т.е. гидрогеологические условия на отработываемых участках сравнительно простые. Основные водопритоки (1-4 м³/ч) связаны с дренированием воды по контактному слою «кучерявчика», а также редким капежем после осадок основной кровли и обводнениями горных выработок от технологических операций, хотя в целом по шахте из-за поступлений воды из выше лежащих шахт Кировская, Петровская, №29 с дополнительным притоком до 211 м³/ч. Суммарный приток составляет 293 м³/ч.

Совместным приказом ГП «ДУЭК» и Донецкого территориального управления Госпромгорнадзора Украины №262 от 23.11.07г. и № 1082 от

01.12.07г. пласт h_6^1 «Смоляниновский» отнесен к категории особо выбросоопасных.

Глубина ведения горных работ по программе на 2008 г. – 1298 м.

4.4.2. Прогноз газодинамических явлений

В условиях шахты им. А.А. Скочинского наблюдения проводились также, как и на ш. «Краснолиманская» в подготовительной выработке, расположенной в 2 км от лавы, в которой произошло ГДЯ. Допустимое расстояние от забоя (до 50 м) и частота перестановки акустических датчиков обеспечивала прослушивание всех видов работ в забое выработки. Аппаратура АК-1М обеспечивала круглосуточное постоянное накопление текущей акустической информации.

06.06.2010 г. во 2-й западной лаве УПЦП в 18 часов 56 минут произошла авария – внезапный выброс угля и газа - в момент которой было застигнуто 23 человека, из них 18 человек вышло на поверхность шахты самостоятельно, 17 человек направлено на обследование в больницу профзаболеваний, один отказался от госпитализации, 5 человек травмировано со смертельным исходом. При отработке лавы было 16 выбросов угля и газа, при сотрясательном взрывании интенсивностью 50 – 850 т.

2 западная лава УПЦП отрабатывает особо выбросоопасный пласт на глубине 1290 м. Лава оснащена комбайном 2ГШ-68, конвейером СП-301, механизированной крепью ЗКД-90.

По всей длине лавы выполняются противовыбросные мероприятия (гидрорыхление с контролем эффективности) на концевых участках ведутся взрывные работы в сотрясательном режиме.

Отрабатывается столб 2400 м прямым ходом, длина лавы 225 м. Выдача горной массы осуществляется ленточным конвейером от лавы до скипового ствола.

По заключению экспертной комиссии в результате аварии количество выброшенной горной массы составило 940 тонн и было выделено 64,5 тыс. м³ метана. Горловина полости выброса находилась в районе секций мех. крепи №42-№44 и ширина полости выброса составила 30 м, а длина с учетом повторного выброса, происшедшего 30.06.2010 г. – 46,0 м.

Моменту развития ГДЯ на шахте соответствовала ремонтная смена в наблюдаемой подготовительной выработке. Отсутствие регулярной работы механизмов в это время позволило выделить фрагмент записи акустических сигналов, пришедших из массива от очага ГДЯ (за 1,5 часа до и после него) без мешающих сигналов. На рис. 4.14 приведена запись этих сигналов в координатах «амплитуда-время». Время начала ГДЯ, измеренное по показаниям аппаратуры сейсмоконтроля шахты, определено как 10 час 05 мин плюс 27 сек. Этому времени соответствует начало второго графика на рис. 4.15.

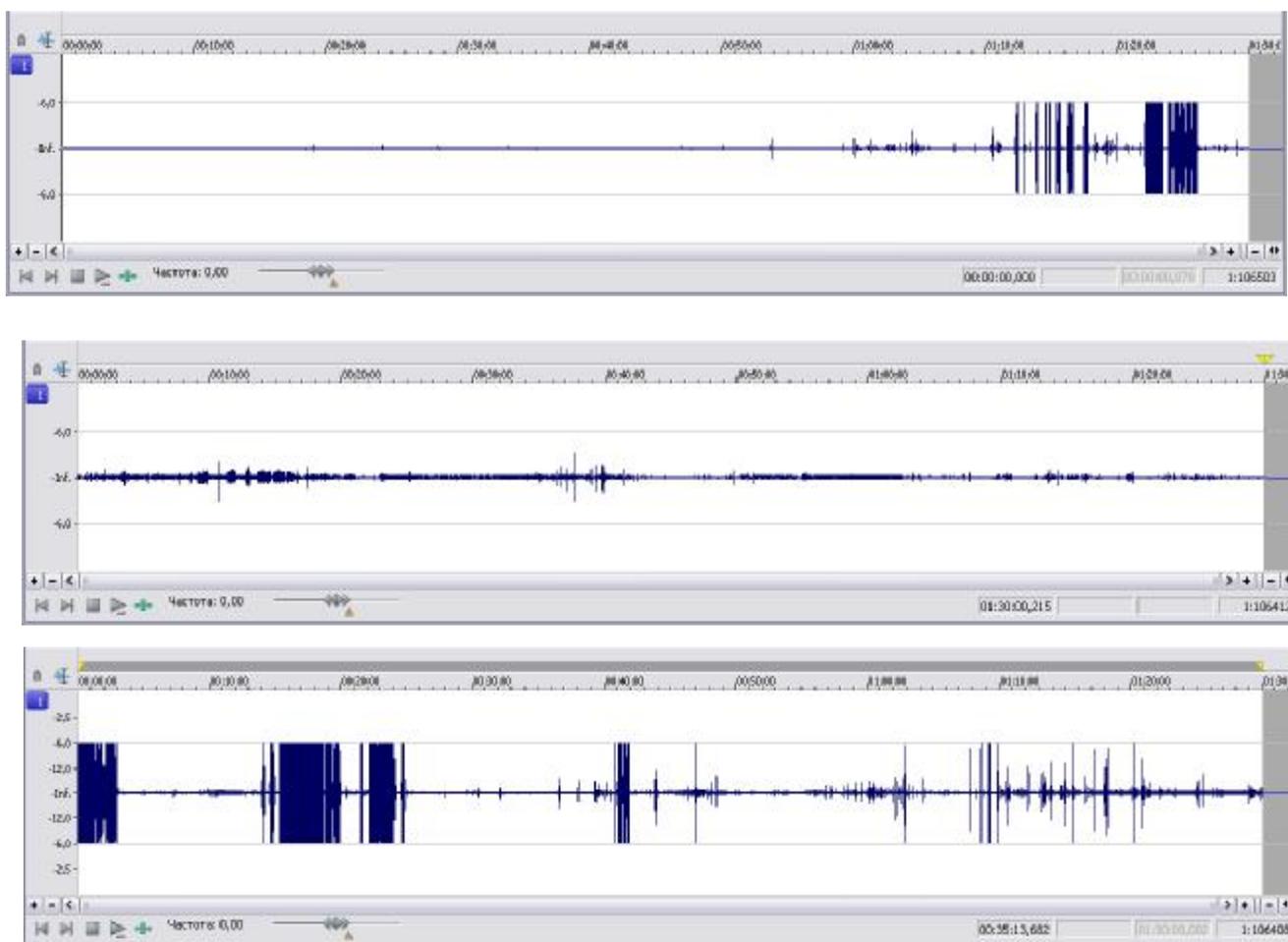


Рис. 4.14. Запись акустических сигналов, пришедших из массива от очага ГДЯ

Анализ приведенной записи показывает, что:

1) началу развития процесса разрушения породного массива предшествовала подготовка его, зарегистрированная за 30 мин. до ГДЯ (график 1 на рис. 4.14) и выразившаяся в виде серии тресков;

2) ГДЯ происходило поэтапно с паузами (график 2 на рис. 4.14) и носило затухающий характер;

3) уровень сигналов, зарегистрированных аппаратурой АК-1М на значительном удалении от очага ГДЯ, оказался соизмеримым с сигналами от работающих ранее механизмов вблизи от приемных датчиков (в среднем 50 м) для нормальных условий поведения массива, что позволяет производить последующий их спектральный анализ и свидетельствует об аномально высокой акустической проводимости массива в случае «опасной» ситуации.

4.5. Прогноз ГДЯ на шахте «Красноармейская-Западная № 1»

4.5.1. Горно-геологические и горно-технические условия добычи угля на шахте «Красноармейская-Западная № 1»

Шахта "Красноармейская-Западная №1" сдана в эксплуатацию в декабре 1990 года. В марте 1992 года был выдан на-гора первый миллион тонн угля, а в декабре 1993 года была освоена проектная мощность – 1,5 миллионов тонн угля в год. В 2000 г. впервые в Украине шахта перешагнула 4 - миллионный рубеж угледобычи.

Максимальная суточная добыча - 20,2 тыс. тонн. Объем проведения горных выработок превышает 22 км в год.

Размеры шахтного поля по простиранию 16 км, по падению до 7 км. В его пределах один пласт d_4 мощностью 0,9-2,15 м с промышленными запасами около 90 млн. тонн, угол падения пласта $2-8^0$, марка угля К.

Шахтное поле вскрыто центрально-сдвоенными главным и вспомогательным стволами и капитальными квершлагами с организацией основного откаточного горизонта на глубине 593 м и дренажного вентиляционного горизонта на глубине 708 м. Размеры блоков составляют – 3,5 x 5,0 км. (рис. 4.15).

Система разработки - длинными столбами по простиранию и восстанию. Длина столбов 1,6-2,2 км. Схема проветривания комбинированная. Обеспеченность шахты воздухом составляет 108,4%, в шахту на проветривание горных выработок поступает 590 м³/с воздуха.

Выемочные участки шахты обеспечены расчетным количеством воздуха на 109%, обособленные забои подготовительных выработок - на 121,6%. Пласт опасен по внезапным выбросам угля, породы и газа, по взрывам угольной пыли.

Разработка в пределах шахтного поля только одного пласта приводит к увеличению удельного объема проведения вскрывающих и подготовительных выработок на 1000 тонн добычи. При этом снижается степень концентрации горных работ, что обуславливает большой объем поддержания горных выработок.

Поле шахты «Красноармейская-Западная №1» характеризуется высокой степенью деформации горного массива и активного проявления разломно-блоковых движений на всем протяжении его геологического формирования.

По степени сложности шахтное поле относится ко 2-ой группе сложности месторождений. Промышленная угленосность поля шахты «Красноармейская-Западная №1» приурочена к отложениям нижнего карбона и насчитывает до 46 угольных пластов и прослоев, из которых только пласты d_4 и d_6 достигают рабочей мощности.

Промышленное значение имеет пласт d_4 , так как сохраняет рабочую мощность на основной части шахтного поля. Пласт d_6 невыдержанный, рабочую мощность сохраняет на двух обособленных небольших площадях. По марочному составу уголь пласта d_4 относится к марке K – коксующийся. Водоприток шахты составляет 270 м³/час. Выделение воды при проходке капитальных и подготовительных горных выработок происходит преимущественно из песчаника, залегающего в почве пласта d_4 и реже из песчаника, залегающего в кровле.

Условия отработки пласта d_4 классифицируются как сложные и зависят от ряда факторов. Для угольного пласта d_4 характерно значительное количество

мелкоамплитудных тектонических нарушений и размывов. Все тектонические нарушения сопровождаются зонами повышенной трещиноватости горных пород. На этих участках часто происходят вывалы из кровли и боков выработок.

При проходке горных выработок встречаются зоны высокой степени трещиноватости, приуроченные к зонам пликативных нарушений и высокого горного давления. При этом положение может усугубиться залеганием над пластом или непосредственной близости от кровли выработки песчаников. Песчаники, залегающие в кровле, имеют высокий предел прочности на одноосное сжатие, но при этом состоят из ряда отдельных пачек мощностью 0,5-1,2 м, не имеющих устойчивой связи между собой.

Песчаники способны создавать относительно устойчивые обнажения в забое горной выработки, однако по мере удаления забоя на расстояние 20-50 м может происходить их расслоение под воздействием горного давления и приводить к увеличению нагрузки на крепь горных выработок и дальнейшей ее деформации.

Следует отметить, что для условий шахтного поля характерно интенсивное проявление горного давления в выработках пройденных по падению-восстанию и минимальное – пройденных по простиранию. Наиболее интенсивные проявления горного давления отмечены в выработках: по падению-восстанию в блоке № 8, северном крыле блока № 2 и южной части блока № 6.

Углевмещающие породы на площади шахтного поля представлены переслаивающейся толщей аргиллитов, алевролитов, песчаников и известняков.

Анализ прочностных характеристик вмещающих пород показал, что изменение их происходит в довольно широких пределах. Породы комковатой текстуры с поверхностями скольжения или «кучерявые» с отпечатками обуглившейся растительности, имеют в 2-3 раза ниже прочность, чем монолитные. Устойчивость пород кровли зависит также от мощности слагающих слоев и наличия сцепления между ними, грубослоистые породы более устойчивые, чем тонкослоистые с наличием углистого или слоистого материала по наслоению.

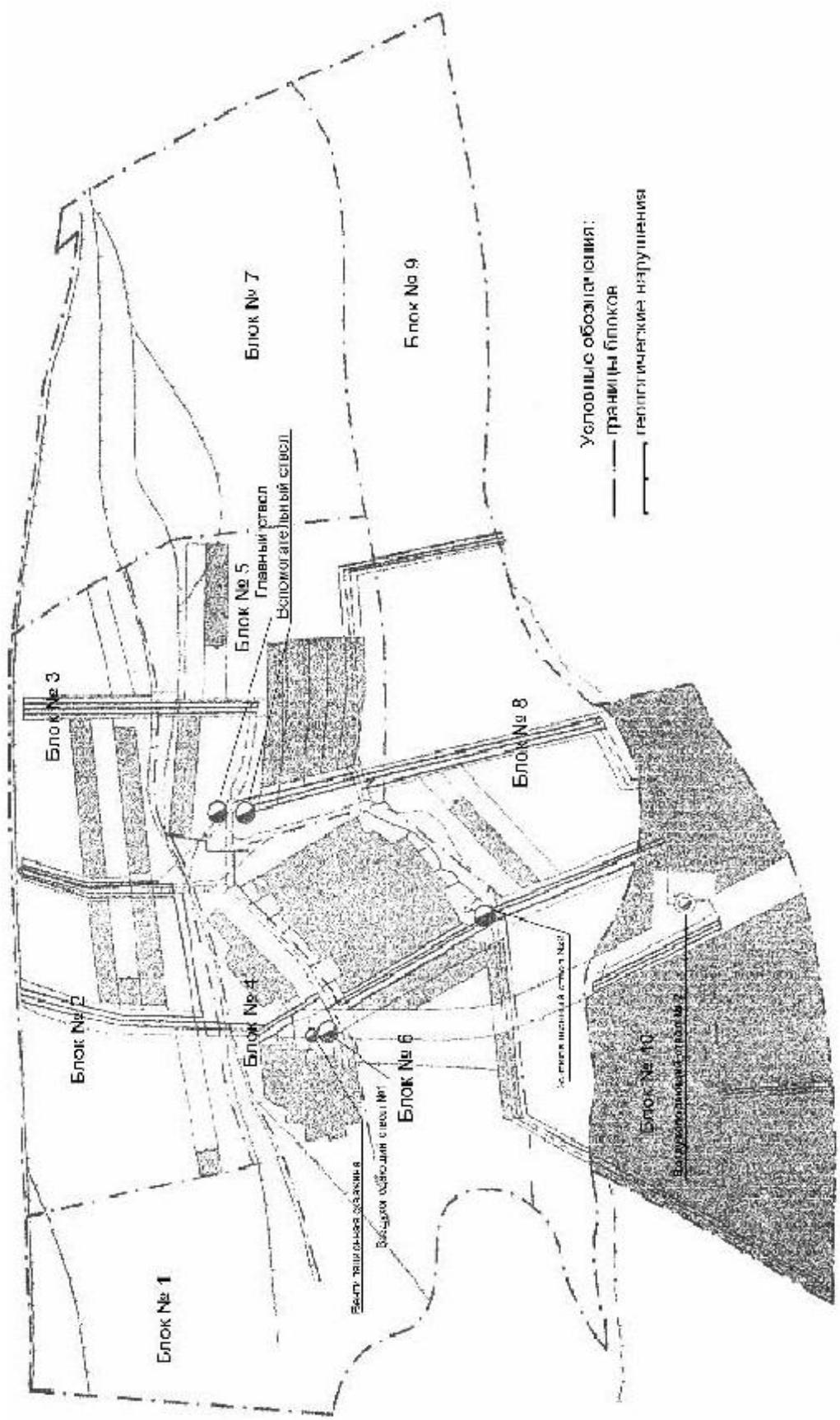


Рис. 4.15. Раскройка шахтного поля

Результаты исследований физико-механических свойств пород кровли и почвы пласта d_4 представлены в табл. 4.1.

В горных выработках снижение прочностных свойств наблюдается в зонах трещиноватости и тектонических нарушений, а также на участках увлажнения.

В поле шахты «Красноармейская-Западная №1» по данным геологической службы характерно развитие зон эндогенной трещиноватости. Как правило, в горных породах отчетливо проявляются 2-3 системы, в том числе расположенных вертикально. Зоны повышенной трещиноватости оказывают негативное влияние на состояние выработок, что способствует активному вывалообразованию и требует последующего их укрепления.

4.5.2. Прогноз выбросоопасных ситуаций

Разрабатываемые угольные пласты склонны к газодинамическим явлениям. Перечень произошедших ГДЯ за последние 25 лет приведены в табл. 4.2.

Аппаратура АК-1М была установлена в забое вентиляционного штрека 1-й южной лавы блока 10. Характеристика выработки приведена в табл. 4.3.

С целью обеспечения большей устойчивости крепи выработки, сечение выработки применяем арочное. Исходя из характеристики крепи, применяем металлическую 3-х звенную крепь из спец. профиля СВП-33. Этим требованиям отвечает крепь типа КШПУ-14,4.

Выработка проводится сечением в проходке $S_{пр}=17,9 \text{ м}^2$, крепится крепью КШПУ-14,4, сечением в свету $S_{св.}=14,4 \text{ м}^2$, затяжка выработки – сетка-затяжка сплошную. Шаг установки рамной крепи – 0,8 м.

Проведение вентиляционного штрека 1 южной лавы блока 10 осуществляется с помощью буро-взрывных работ (с ПК150) с проведением разгрузочной угольной полости. Опережающая выемка угольного пласта осуществляется ОМ на безопасную глубину, определенную прогнозом (не более 2,0). Разгрузочная полость крепится деревянной временной крепью (стойки $\text{Ø}16-18 \text{ см}$ под брус). Уголь, полученный при выемке полости, двойной перекидной грузится на питатель породопогрузочной машины. Заблокированная и обесточенная машина 2ПНБ-2Б находится на начало цикла на расстоянии 2-5м от забоя.

Пределные значения физико-химических свойств пород кровли и почвы пласта d_4

Положение относительно пласта	Наименование пород	Плотность, г/см ³ , от-до /среднее		Предел прочности, $n \times 10^5$, Па, от-до/среднее			
		Кажущаяся	Действительная	На сжатие	На разрыв		
				В естественном состоянии	После водонасыщения	Перпендикулярно слоению	Параллельно слоению
Основная кровля	Аргиллит	2,26-2,66/2,61	2,56-2,8/2,67	198-682/343	222	—	30-60/42
	Алевролит	2,44-2,72/2,62	2,62-2,82/2,79	320-1514/501	120-528/279	11-65/29	29-163/94
	Песчаник	2,0-2,8/2,54	2,59-2,82/2,71	472-2156/795	138-1372/605	16-92/37	20-179/57
	Известняк	2,8	2,82	1548-1637/1593	—	—	—
Непосредственная кровля	Аргиллит	1,42-2,6/2,03	2,34-2,85/2,64	209-302/257	199	—	36-66/51
	Алевролит	2,19-2,74/2,64	2,45-2,87/2,75	246-950/513	97-708/291	18-66/33	25-133/65

Положение относительно пласта	Наименование пород	Плотность, г/см ³ , от-до /среднее		Предел прочности, п х 10 ⁵ , Па, от-до/среднее			
		Кажущаяся	Действительная	На сжатие		На разрыв	
				В естественном состоянии	После водонасыщения	Перпендикулярно слоению	Параллельно слоению
Почва	Песчаник	2,16-	2,6-	380-	195-872/509	29-60/36	9-132/52
		2,70/2,52	2,86/2,72	1331/627			
	Аргиллит	2,57-	2,67-	79-745/372	116-207/189	—	33-56/44
		2,79/2,66	3,04/2,82				
	Алевролит «кучерявичик»	2,52-	2,63-	133-744/320	79-341/177	—	11-62/44
		2,69/2,6	2,81/2,72				
	Алевролит	2,38-	2,63-	189-938/528	62-794/338	15-76/32	33-100/55
		2,76/2,58	2,8/2,68				
	Песчаник	2,14-	2,21-	202-	214-1058/484	14-56/29	9-165/43
		2,68/2,38	2,78/2,63	1999/593			

Газодинамические явления, зарегистрированные в ПАО «ШУ «Покровское»

№ п/п	Наименование газодинамического явления	Название выработки, место газодинамического явления	Дата газодинамического явления	Название и символ пласта, горизонт	Интенсивность газодинамического явления	Работы выполнявшиеся перед газодинамическим явлением
1	Внезапный выброс угля и газа	Южный вентиляционный штрек блока №8	12.10.1985 г.	d ₄ , горизонт 708м	уголь – 50т, газ – не подсчитывался	Выемка горной массы комбайном 4ПП-5
2	Выдавливание угольного пласта с попутным газовыделением	2-й южный конвейерный штрек центральной панели блока №8	3.07.2002 г.	d ₄ , горизонт 708м	уголь – 4т, метан – 335м ³	Выемка горной массы комбайном КСП-32
3	Внезапный выброс угля и газа	3-й южный конвейерный штрек центральной панели блока №8	17.06.2004 г.	d ₄ , горизонт 708м	уголь – 20т, метан – 1400м ³	Выемка горной массы комбайном КСП-42
4	Обрушение пород и угля	Вентиляционный ходок блока №8	20.12.2004 г.	d ₄ , горизонт 708м	уголь – 20-30т, порода – 300м ³ метан – 3650м ³	Не проводились

После выемки угольной полости вручную на ОМ производится бурение шпуров по породе машиной 2ПНБ-2Б. Глубина шпуров определяется согласно паспорта БВР, при этом опережение угольным забоем концов шпуров заходки по породе должно быть не меньше 0,5м. Величина заходки и глубина шпуров должна быть не более 1,5м. (Например: при глубине разгрузочной полости - 2,0м, а также учитывая неснижаемое опережение угольным забоем породного - 0,5м, глубина бурения шпуров по породе равна - $2,0 - 0,5 = 1,5$ м, не зависимо от КИШ.

Далее, зарядание и взрывание шпуров, проветривание выработки, проверка забоя на наличие отказов, уборка отбитой горной массы при помощи машины 2ПНБ-2Б, крепление и затяжка выработки.

Транспортировка горной массы из забоя осуществляется по следующей схеме:– скребковый конвейер СП-202 (2 шт.) по вентиляционному штреку 1 южной лавы блока 10;

– ленточный конвейер ЛТП-1000КП по вентиляционному штреку 1 южной лавы блока 10;

– ленточный конвейер 1Л-1000 по вентиляционному штреку 1 южной лавы блока 10;

– ленточный конвейер 1Л-1000 по вентиляционному бремсбергу блока 10;

– ленточный конвейер 1Л-1000 по промышленному штреку блока 10 и далее по общешахтной транспортной цепочке в угольную яму главного ствола.

Горная масса, поступившая в угольную яму главного ствола, скипами выдается на поверхность.

Лунки под стойки крепи разрабатываются при помощи отбойного молотка. Дробление крупногабаритных кусков горной массы ($V > 1\text{м}^3$) в забое производится при помощи ОМ. Куски горной массы меньшего размера разбиваются при помощи молота, при этом обязательно для предохранения органов зрения и рук рабочий должен находиться в защитных очках и рабочих рукавицах.

Доставка материалов и оборудования производится с промплощадки воздухоподающего ствола №2 по ВПС№2 на горизонте 815 м по следующему маршруту:

- грузовая ветвь – локомотивной откатки (Р-35(70));
- южный полевой воздухоподающий штрек – локомотивной откатки (Р-35(70));
- южный полевой воздухоподающий штрек – подвесная дорога ДП-155У;
- обгонная выработка 2 – подвесная дорога ДП-155У;
- южный параллельный ползок возд/под. штреку– подвесная дорога ДП-155У;
- вспомогательный бремсберг блока 10 – подвесная дорога ДП-155У;
- вентиляционный штрек 1 южной лавы блока 10– подвесная дорога ДП-155У;
- к месту проведения выработки – подвесная дорога ДП-155У.

Пункт перегруза с рельсового пути на подвесную дорогу ДП-155У находится на южном полевым воздухоподающем штреке.

Для проветривания выработки применяют вентиляторы местного проветривания ВМЭ-2/10.

Пункт перегруза материалов, места пересыпов конвейеров, установки ВМП должны быть освещены и оборудованы телефонной связью в соответствии с нормами, приведенными в «Правилах технической эксплуатации угольных шахт».

Разгрузка и погрузка материалов производится при помощи талей грузоподъемностью 3,2 – 5 т. Доставка материалов осуществляется с применением пакетов и контейнеров.

Выработка проводится в непосредственной близости от Котлинского надвига (12-30⁰, Н = 36-40 м). В этой связи ГДЯ при ее проведения достаточно высокая.

Прогноз выполняется в течении октября, ноября и декабря 2010 года по трем факторам K_1 , K_2 , K_3 . Максимальные их значения в виде комплексного показателя K приведены на рис. 4.16. В период с 07 по 11 ноября аппаратура показала возможность выброса. Проходка была остановлена и в течение 5 суток после проведения противовыбросных мероприятий геомеханическая ситуация пришла в норму, после чего проходка была продолжена. В настоящее время эксперимент продолжается в вентиляционном штреке северной лавы № 2 блока 10.

Таким образом, можно считать, что аппаратура АК-1М представляет собой достаточно надежный акустический комплекс, с помощью которого с большой степенью вероятности можно вести прогноз ГДЯ.

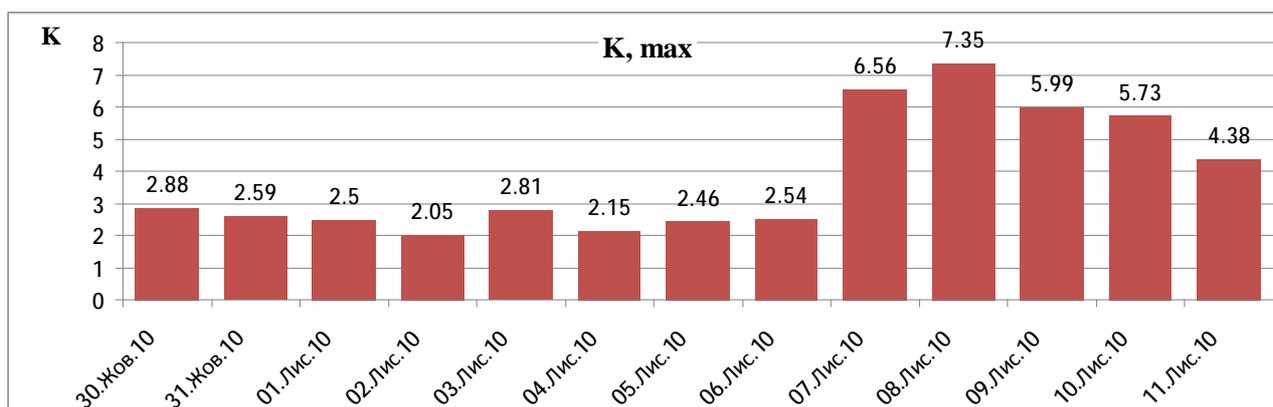


Рис. 4.16 Показания комплексного критерия K в период наблюдений

Таким образом, анализ акустического сигнала одновременно по трем независимым параметрам позволяет повысить надежность аппаратуры АК-1М до 0,875, что является достаточным для прогноза ГДЯ.

Основным параметром, по которому ведется прогноз ГДЯ, является безразмерный параметр K_1 , равный отношению амплитуды высоких частот к амплитуде низких частот. Его предельное значение равно 3.

Дополнительные безразмерные параметры K_2 и K_3 имеют слабую функциональную связь с основным параметром K_1 и между собой с коэффициентом

корреляции не превышающим 0,35, что позволяет вести прогноз ГДЯ с вероятностью, не ниже 0,875.

Чувствительность аппаратуры АК-1М такова, что зоны развития и реализации ГДЯ фиксируются на расстоянии от 800 (ш. «Краснолиманская») до 2400 м (ш. им. А.А. Скочинского).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа структуры искусственного акустического сигнала, генерирующего в забое выработки, выделены новые параметры оценки степени выбросоопасности угольных пластов, что позволило решить актуальную научно-техническую задачу прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах.

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем.

Впервые выполнена комплексная оценка влияния глубины и интенсивности разработки газонасыщенности угольных пластов на количество газодинамических явлений в шахтах, что позволяет оценивать степень опасности их реализации.

Выполнены натурные измерения геомеханических проявлений горного давления в шахтах, разрабатывающих выбросоопасные пласты, с применением акустической аппаратуры АК-1, что позволило улучшить конструкцию ее отдельных блоков, разработать новое программное обеспечение, усовершенствовать методику прогноза газодинамических явлений.

В структуре искусственного акустического сигнала выделены два дополнительных параметра, которые рекомендованы использовать в качестве дополнительной информации о возможном развитии газодинамического явления.

Предложена статистическая модель анализа акустического сигнала со стохастической природой, что позволило организовать новую архитектуру аппаратуры АК-1, позволяющую вести прогноз с вероятностью, близкой к 0,875.

Установлено, что акустическая система АК-1 обладает высокой чувствительностью, позволяющей определить источник ГДЯ на расстоянии от 800 м (ш. Краснолиманская) до 2500 м (ш. им. А.А. Скочинского).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полтавец В.И. Альтернативы реформирования угольной промышленности Украины / В.И. Полтавец, Б.А. Грядущий, Г.Л. Майдуков // Уголь. – 2008. – № 7. – С. 10 – 16.
2. Выступление Министра угольной промышленности Украины В.И. Полтавца на совещании у Премьер-министра Украины Ю.В. Тимошенко по вопросам состояния, перспектив развития и реформирования угольной отрасли.
3. Бурлака Г. Перспективы развития угольной отрасли в Украине и странах ОЭСР / Г. Бурлака // ТЭК. – 2008. - № 9. – С. 77 – 85.
4. Красник В.Г. Программы перспективного развития угольной промышленности Украины / В.Г. Красник // Уголь Украины. – 2006. – № 12. – С. 6 – 8.
5. Концепція розвитку вугільної промисловості // Уголь Украины. – 2005. – № 9. – С. 3 – 4.
6. Ляшенко О.Ф. Першочергові заходи з оздоровлення вугільної промисловості / О.Ф. Ляшенко, М.М. Кулик // Уголь Украины. – 2006. – №1. – С. 6 – 9.
7. Степанов А., Ковтун Г., Матусевич Г. Производство моторных топлив и комплексное использование углей. Роль бурых углей в новых планах развития ТЭК / А. Степанов, Г. Ковтун, Г. Матусевич // ТЭК. – 2008. - № 2. – С. 66 – 71.
8. Круть А.А. Водугольное топливо – альтернатива природному газу и жидким нефтепродуктам / А.А. Круть // Уголь Украины. – 2008. - № 10. – С. 10 – 13.
9. Кондырев Б.И. Перспективы применения технологии подземной газификации угля на месторождениях Дальнего Востока с получением газа-сырья для синтеза жидкого топлива / Б.И. Кондырев, А.В. Белов, И.В. Гребенюк // Уголь. – 2008. - № 10. – С. 36 – 37.

-
10. Вертинская Н.Д. Исследование и разработка электрохимического способа экстракции углей с применением математического моделирования / Н.Д. Вертинская, А.П. Вертинский, Н.П. Герасимова // Уголь. – 2008. – № 1. – С. 66 – 67.
 11. Волошин Н.Е. Выбросы угля, пород в шахтах. /Н.Е. Волошин, Л.А. Вайнштейн, А.М. Брюханов и др. [Справочник] – Донецк: Кассиопея, 2007.- 908 с.
 12. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа / Ходот В.В. - М.: Госгортехиздат, 1961. – 362 с.
 13. Ходот В.В. Горноспасательное дело / Ходот В.В. - Л.: Углетехиздат, 1951.- 431 с.
 14. Брюханов А.М. К 100-летию первого внезапного выброса угля и газа в Донбассе / А.М. Брюханов, А.А. Рубинский, Э.И. Тимофеев // Уголь Украины, 2006. – № 11. – С. 28 – 29.
 15. Парфенчук А.М. О вскрытии пластов зонах повышенных напряжений / А.М. Парфенчук, В.Л. Божко, Ю.Т. Хорунжий // Уголь Украины, 1970. – №5. – С. 35 – 38.
 16. Божко В.Л. Внезапный выброс угля и газа на шахте им. А.А. Скочинского / В.Л. Божко, Ю.Т. Хорунжий // Уголь Украины, 1981 – № 9. – С. 29 – 31.
 17. Божко В.Л. Внезапный выброс угля и газа в шахте № 3 / В.Л. Божко, В.И. Николин, Ю.Т. Хорунжий // Уголь, 1976. – №10. – С. 22 – 27.
 18. Спорудження виробок у складних умовах / С.П. Мінеєв, І.І. Усик, О.М. Брюханов, О.О. Рубінський. – Дніпропетровськ: НГУ – МакНДІ, 2005. – 65 с.
 19. Шатилов В.А. Внезапные поднятия и выбросы пород в шахтах / Шатилов В.А. – Киев: Техника, 1972. – 75 с.
 20. Минеев С.П. Проведение выработок проходческими комбайнами по выбросоопасным пластам и породам / С.П. Минеев, А.А. Рубинский – Днепропетровск: Дніпро, 2006. – 384 с.

-
21. Шевелев Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Шевелев Г.А. – Киев: Наукова думка, 1989. – 160 с.
 22. Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах /Петухов И.М. – М.: Недра, 1972. – 229 с.
 23. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: Стандарт Мінвуглепрому України: СОУ 10.1.00174088.011- 2005: Видання офіційне.- Київ: Мінвуглепром України, 2005.- 221 с.
 24. Минеев С.П. Активация десорбции метана в угольных пластах / С.П. Минеев, А.А. Прусова, М.Г. Корнилов. – Днепропетровск: Вебер, 2007. – 252 с.
 25. Минеев С.П. О методологии классификации газодинамических явлений / С.П. Минеев, А.М. Брюханов, А.А. Рубинский [и др.] // Науковий вісник НГА України. – Днепропетровск. – Вип. 10 – 2003. – С. 14 – 21.
 26. Минеев С.П. О закономерностях проявления мощных газодинамических явлений в угольных шахтах / С.П. Минеев, А.А. Рубинский // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників -2008»: Секція Геомеханіка і геомеханічний моніторинг при підземному будівництві» -Д.: НГУ, 2008. – С.84 – 91.
 27. Король В.И. Газодинамические явления в угольных шахтах: история и современное состояние проблемы / В.И. Король // Форум гірників – 2007. Матеріали міжнародної конференції. – Д.: Національний гірничий університет, 2007. – С. 60 – 63.
 28. Шашенко А.Н. Механика горных пород: учебник для вузов / Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. – К.: Новий друк, 2004. – 400 с.
 29. Ходот В.В. Основные направления научного поиска в области борьбы с газодинамическими явлениями в шахтах / В.В. Ходот // Вопросы теории выбросов угля, породы и газа. – Материалы семинара (Днепропетровск, июнь 1970 г.). – К.: Наук. думка, 1973. – С. 3–18.

-
30. Выбросы угля, породы в шахтах Донбасса (1906 – 2007 г.г.): Справочник / [авт. текста Н.Е. Волошин, Л.А. Вайнштейн, А.М. Брюханов и др.]. – Донецк: СПД Дмитренко, 2008. – 920 с.
31. Механизм инициирования динамических явлений в подготовительных забоях / [авт. текста Ж.С. Ержанов, Ю.А. Векслер, Н.А. Жданкин и др.]. – Алма-Ата: Наука, 1984. – 224 с.
32. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа / Ходот В.В. – М.: Гос. Научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1961. – 364 с.
33. Ходот В.В. Развитие теории внезапных выбросов и совершенствование способов борьбы с ними / В.В. Ходот // Уголь Украины. – 1979. – №4. – С. 26–30.
34. Петухов И.М. Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа / И.М. Петухов, А.М. Линьков // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М., 1978. – С. 62–91.
35. Петухов И.М. Теоретические основы борьбы с выбросами угля, породы и газа / И.М. Петухов, А.М. Линьков // Уголь. – 1975. – №9. – С. 9–15.
36. Петросян А.Э. Причины возникновения внезапных выбросов угля и газа / А.Э. Петросян, Б.М. Иванов // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М., 1978. – С. 3–61.
37. Кузнецов С.В. К вопросу о внезапных выбросах угля и газа / С.В. Кузнецов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1966. – №4. – С. 14–18.
38. Кузнецов С.В. Распространение волны разгрузки в призабойной зоне угольного пласта и ее связь с выбросами угля и газа / С.В. Кузнецов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1970. – №4. – С. 82–87.
39. Кузнецов С.В. Распространение волны разгрузки вблизи свободной поверхности разрабатываемого пласта с учетом сближения боковых пород / С.В. Кузнецов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1971. – № 5. – С. 3–12.

-
40. Борисенко А.А. О причинах возникновения и механизме внезапных выбросов угля и газа / А.А. Борисенко // Уголь. – 1975. – №9. – С. 22–25.
41. Некоторые аспекты теории выбросов угля, породы и газа / Ф.А. Абрамов, А.Н. Зорин, Э.И. Ефремов [и др.] // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М., 1978. – С. 92–121.
42. Бабич И.Ю. Потеря устойчивости как возможный механизм образования выбросов / И.Ю. Бабич, А.Н. Гузь // Прикладная механика. – 1977. – Т.13, №5. – С. 23–26.
43. Николин В.И. Представления (гипотеза) о природе и механизме выбросов угля, породы и газа / В.И. Николин // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. – М., 1978. – С. 122–140.
44. Ержанов Ж.С. О механизме внезапных выбросов угля и газа / Ж.С. Ержанов, А.С. Сагинов, Ю.А. Векслер // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1973. – №4. – С. 3–6.
45. Зорин А.Н. Управление динамическими проявлениями горного давления / Зорин А.Н. – М.: Недра, 1978. – 175 с.
46. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов / Фридман Я.Б. – М., 1974. – Т.1. – 276 с.
47. Саранчук В.И. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля / Саранчук В.И., Айруни А.Т., Ковалев К.Е. – К.: Наук. думка, 1988. – 190 с.
48. Эттингер И.Л. Газоёмкость ископаемых углей / Эттингер И.Л. – М.: Недра, 1966. – 223 с.
49. Бобин В.А. Сорбционные процессы в природном угле и его структура / Бобин В.А. – М.: ИПКОН АН СССР, 1987. – 136 с.
50. Алексеев А.Д. Прогноз и управление состоянием горного массива / А.Д. Алексеев, Н.С. Сургай. – К.: Наук. думка, 1994. – 200 с.
51. Минеев С.П. Активация десорбции метана в угольных пластах / Минеев С.П., Прусова А.А., Корнилов М.Г. [под ред. С.П. Минеева]. – Днепропетровск: «Вебер» (Днепропетровское отделение), 2007. – 252 с.

-
52. Исследование процессов возникновения внезапных выбросов угля и газа [авт. текста А.Э. Петросян, М.Ф. Яновская, Б.М. Иванов и др.]. – М.: Наука, 1978. – 112 с.
53. Николин В.И. Прогноз выбросоопасности угольных пластов / Николин В.И., Лысиков Б.А., Ткач В.Я. – Донецк: «Донбасс», 1972. – 126 с.
54. Николин В.И. Выбросы породы и газа / Николин В.И., Меликсетов С.С., Беркович И.М. – М.: Недра, 1967. – 81 с.
55. Степанович Г.Я. Газодинамические явления при подготовке глубоких горизонтов / Степанович Г.Я., Николин В.И., Лысиков Б.А. – Донецк: «Донбасс», 1970. – 110 с.
56. Николин В.И. Выбросоопасные породы больших глубин / Николин В.И., Лысиков Б.А., Ярембаш И.Ф. – Донецк: «Донбасс», 1968. – 80 с.
57. Предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах / [авт. текста М.И. Зборщик, В.В. Осокин, Н.М. Соколов]. – К.: Техніка, 1984. – 148 с.
58. Колесов О.А. Региональный прогноз выбросоопасности угольных пластов Донецкого бассейна / О.А. Колесов, В.И. Николин, Г.Я. Степанович [и др.] // Уголь Украины. – 1971. – №5. – С. 42 – 44.
59. Зорин А.Н. Механика управления гетерогенным упруго-наследственным горным массивом / Зорин А.Н., Долинина Н.Н., Колесников В.Г. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
60. Волошин Н.Е. Внезапные выбросы и способы борьбы с ними в угольных шахтах / Волошин Н.Е. – К.: Техніка, 1985. – 127 с.
61. Гзовский М.В. Тектонические поля напряжений и очаги землетрясений // Земная кора сейсмоопасных зон / М.В. Гзовский – М., 1973. – С. 38–55.
62. Влияние катагенеза горных пород и метаморфизма углей на их выбросоопасность / [авт. текста В.Е. Забигайло, В.И. Николин]; [Отв. ред. Широков А.З.]. – ин-т геологии и геохимии горючих ископаемых. – К.: Наук. думка, 1990. – 168 с.

-
63. Бобров И.В. Выбросы породы при проведении горных выработок в Донецком бассейне / Бобров И.В. – Макеевка: МакНИИ, 1963. – 18 с.
64. Волошин Н.Е. Борьба с выбросами породы в шахте / Н.Е. Волошин, В.И. Тарасьев. – Донецк: Донбасс, 1968. – 64 с.
65. Шатилов В.А. Внезапные поднятия и выбросы пород на шахтах / Шатилов В.А. – К.: Техніка, 1972. – 137 с.
66. Метан в угольных пластах / [авт. текста А.А. Скочинский, В.В. Ходот, В.Г. Гмошинский и др.]. – М.: Углетехиздат, 1958. – 256 с.
67. Бобров И.В. Борьба с внезапными выбросами угля и газа / И.В. Бобров, Р.М. Крический. – К.: Техніка, 1964. – 328 с.
68. Бобров И.В. Внезапные выбросы угля и газа на шахтах Донбасса / Бобров И.В., Крический Р.М., Михайлов В.И. – М.: Углетехиздат, 1954. – 515 с.
69. Ольховиченко А.Е. К вопросу влияния остаточных тектонических напряжений на возникновение внезапных выбросов угля и газа / А.Е. Ольховиченко, О.Ц. Сирота // Вопросы инженерной геологии при проектировании строительства и эксплуатации подземных сооружений. – 1969. – Вып. 1. – С. 64 – 68.
70. Бобров И.В. Процессы, происходящие в глубине массива при внезапном выбросе угля и газа / Бобров И.В. // Сб. н. тр. МакНИИ. – 1961. – №17. – С. 2 – 10.
71. Громов Ю.В. Обеспечение устойчивости угольного забоя в лавах мощных пологих пластов / Ю.В. Громов, М.В. Павловский // Горная геомеханика: Сб. научн. тр. – Л.: ВНИМИ, 1988. – С. 56 – 64.
72. Котлов Э.С. Изменение величины зоны отжима как метод определения выбросоопасности участков очистного забоя / Э.С. Котлов, Б.Т. Сорочинский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1965. – №3. – С. 35 – 42.
73. Кравченко В.И. Отжимы угля при разработке пологопадающих пластов Донбасса / Кравченко В.И. – М.: Углетехиздат, 1951. – 50 с.

-
74. Упругие свойства горных пород и безопасность подземной разработки / [авт. текста В.Г. Аршава, С.Н. Осипов, П.К. Кучеба и др.]. – К.: Техніка, 1979. – 158 с.
75. Кузяра В.И. Об особенностях сближения горных пород в длинных очистных забоях / В.И. Кузяра, А.И. Суло, С.Н. Осипов // Уголь Украины. – 1989. – №1. – С. 12–15.
76. Козловчунас Е.Ф. Оценка проявления выбросоопасности на пологих пластах Донецкого бассейна / Е.Ф. Козловчунас // Вопросы предотвращения внезапных выбросов. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1989. – С. 67–93.
77. Коваленко Ю.Ф. Элементарный акт явления внезапного выброса: Выброс в скважину / Ю.Ф. Коваленко // Препринт ИПМ АН СССР, 1980. – №145. – 44 с.
78. Внезапные выбросы угля и газа и структура угля / [авт. текста Эттингер И.Л.]. – Л.: Недра, 1969. – 160 с.
79. Глушко В.Т. Выбросы пород в горных выработках глубоких шахт Донбасса / В.Т. Глушко, А.Н. Зорин. – К.: Наук. Думка, 1972. – 114 с.
80. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / Мосинец В.Н. – М.: Недра, 1976. – 271 с.
81. Вереда В.С. Современные тектонические напряжения как возможная причина внезапных выбросов угля и газа и некоторые следствия из этой гипотезы / Вереда В.С. – Донецк: Европ. экон. комис., 1974. – 6 с.
82. Божко В.Л. Особенности решения отдельных задач прогноза выбросоопасности и предотвращения выбросов угля и газа в условиях Донбасса / В.Л. Божко, В.И. Николин. – Донецк: Европ. экон. комис., 1974. – 13 с.
83. Лидин Г.Д. Прогнозирование внезапных возможных выделений метана в угольных шахтах по геологоразведочным данным / Г.Д. Лидин // Охрана и оздоровление воздушной среды в шахтах. – М.: Наука, 1978. – С. 3–35.

-
84. Механика и физика динамических явлений в шахтах / [авт. текста А.Н. Зорин, В.Г. Колесников, К.К. Софийский и др.]. – К.: Наук. Думка, 1979. – 166 с.
85. Поляков Н.С. Внезапные выбросы пород и газа, проведение выработок по выбросоопасным породам / Н.С. Поляков, Ф.А. Абрамов // Уголь Украины. – 1974. – №9. – С. 7 – 11.
86. Пермяков Р.С. Внезапные выбросы соли и газа / Р.С. Пермяков, Н.М. Проскуряков. – Л.: Недра, 1972. – 180 с.
87. Ефремов Г.Д. Влияние горного давления на образование выбросов / Г.Д. Ефремов // Уголь Украины. – 1974. – №9. – С. 15 – 16.
88. Чернов О.И. Прогноз внезапных выбросов угля и газа / О.И. Чернов, В.Н. Пузырев. – М.: Недра, 1979. – 296 с.
89. Батугин С.А. Изменение напряженного состояния нетронутого массива горных пород в пространстве и во времени / С.А. Батугин, И.М. Батугина // Напряженное состояние земной коры. – М., 1973. – С. 15–20.
90. Белоцерковский Д.Ю. Об измерениях скорости вращения Земли по данным анализа астрономических наблюдений с использованием квантовомеханических реперов частоты кварцевых часов / Д.Ю. Белоцерковский // Вращение Земли и определение времени. – М., 1969. – С. 35–37.
91. Угленородный массив Донбасса как гетерогенная среда / [авт. текста А.Ф. Булат, Е.Л. Звягильский, В.В. Лукинов и др.]. – К.: Наук. думка, 2008. – 412 с.
92. Забигайло В.Е. К вопросу разграничения песчаников на выбросоопасные и невыбросоопасные методом дискриминантов / В.Е. Забигайло, Л.И. Колесниченко // Автоматизация контроля параметров рудничной атмосферы и упр. проветриванием шахт. – 1974. – Вып. 1. – С. 140 – 148.

-
93. Геологические факторы выбросоопасности пород Донбасса / [авт. текста В.Е. Забигайло, А.З. Широков, И.С. Белый и др.]. – К.: Наук. думка, 1974. – 270 с.
94. Николин В.И. Некоторые вопросы методологии исследования выбросов породы и газа / Николин В.И. // Выбросы породы и газа. – К.: Наук. думка, 1971. – С. 76.–78.
95. Коллекторские свойства, газопроницаемость выбросоопасных пород / [авт. текста В.Е. Забигайло, Г.А. Шевелев, В.И. Мякенький и др.]. // Выбросы породы и газа. – К.: Наук. думка, 1971. – С. 141–146.
96. Забигайло В.Е. Соотношение влага – газ в порах пород как показатель их выбросоопасности / В.Е. Забигайло, Б.П. Рудометов, В.В. Лукинов // Техника безопасности, охрана труда и горноспас. дело. – 1973. – №3. – С. 25–26.
97. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. – М., 1989. – 192 с.
98. Снижение выбросоопасности при динамическом воздействии на угольный массив [отв. ред. А.Э. Петросян]. – М.: Наука, 1985. – 184 с.
99. Осипов С.И. О вибрационно-волновом механизме внезапных выбросов угля и газа / С.И. Осипов // Уголь Украины. – 1975. – №10. – С. 37 – 41.
100. Перекрестов Н.А. Разработка новых мероприятий по борьбе с выбросами / Н.А. Перекрестов // Уголь Украины. – 1964. – №10. – С. 43 – 45.
101. Пикалов В.И. К вопросу о разрушении адсорбированных пористых тел / В.И. Пикалов // Тр. Ин-та горн. дела АН КазССР, 1979. – №58. – С. 45 – 51.
102. Шумилова Е.В. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на систему газ-уголь / Е.В. Шумилова, В.В. Семенов // Технология подземной разработки месторождений. – К.: Техника, 1974. – №35. – С. 37 – 39.
103. Эттингер И.Л. Необъятные запасы и непредсказуемые катастрофы / Эттингер И.Л. – М.: Наука, 1988. – 174 с.

-
104. Норель Б.К. Об описании явления внезапного выброса отдельными термодинамическими процессами / Б.К. Норель // Уголь. – 1977. – № 10. – С. 42 – 44.
105. Зенин В.И. О характере деформаций угольного массива в зонах, опасных по выбросам / В.И. Зенин // Сб. научных ст. МакНИИ. – М., 1959. – №11. – С. 15 – 18.
106. Вылегжанин В.Н. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов / В.Н. Вылегжанин, П.В. Егоров, В.И. Мурашев. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 295 с.
107. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Безухов Н.И. – М.: Высш. шк., [изд. 2-е испр. и доп.], 1968 – 512 с.
108. Рогов Е.И. Математические модели адаптации процессов и подсистем угольной шахты / Рогов Е.И., Грицко Г.И., Вылегжанин В.Н. – Алма-Ата, 1979. – 240 с.
109. Анцыферов М.С. Сейсмоакустические исследования в угольных шахтах / Анцыферов М.С., Константинова А.Г., Переверзев Л.В. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 104 с.
110. Мысина Л.Г. О длительности внезапных выбросов угля и газа / Л.Г. Мысина // Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского, 1968. – №43. – С. 21 – 28.
111. Петухов И.М. Геофизические исследования горных ударов / Петухов И.М., Смирнов С.А., Винокур Б.М. [и др.]. – М.: Недра, 1975. – 232 с.
112. Ставрогин А.Н. Статистические основы прочности и деформации горных пород при сложных напряженных состояниях / А.Н. Ставрогин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1974. – №4. – С. 41 – 47.
113. Докукин А.В. Моделирование предельно-напряженного состояния угольных пластов / Докукин А.В., Чирков С.Е., Норель Б.К. – М.: Наука, 1981. – 134 с.

-
114. Петухов И.М. Механика горных ударов и выбросов / И.М. Петухов, А.М. Линьков. – М.: Недра, 1983. – 279 с.
115. Фейт Г.Н. Выбор способов предотвращения внезапных выбросов на основе комплексного критерия потери устойчивости и лавинного разрушения пласта / Г.Н. Фейт // Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского, 1980. – № 186. – С. 44 – 51.
116. Шестопапов А.В. Фрактально-синергетическая модель системы «горный массив-выработка» сильно удаленной от своего механического равновесия / А.В. Шестопапов // Сб. ФиПС-01: Фракталы и прикладная синергетика (Тезисы докладов Второго международного междисциплинарного симпозиума, г. Москва, ИМЕТ РАН, 26 – 30.11. 2001 г.). – М.: изд-во МГОУ, 2001. – С. 130–132.
117. Лепихов А.Г. Опыт совершенствования технологии горных работ при отработке свит выбросоопасных пластов / Лепихов А.Г. – М.: ЦНИИЭИуголь, 1989. – 41 с.
118. Мирер С.В. О вероятных условиях возникновения выбросоопасной ситуации в очистной выработке / С.В. Мирер // Уголь. – 1976. – №5. – С. 32 – 53.
119. Столпинская Т.Ю. Влияние состояния пород кровли на выбросоопасность угольных пластов в очистных выработках / Т.Ю. Столпинская // Уголь Украины. – 1980. – №6. – С. 8 – 9.
120. Шестопапов А.В. О необходимости написания принципиально нового раздела механики горных пород / А.В. Шестопапов // Горн. Информ.-аналит. бюл. – Моск. горн. ун-т. – 2001. – № 5. – С. 61 – 68.
121. Шестопапов А.В. Исследование механизма газодинамических и деформационных процессов в краевой части разрабатываемого угольного пласта / А.В. Шестопапов // Физико-технические и технологические проблемы разработки и обогащения твердых полезных ископаемых. – М.: ИПКОН АН СССР, 1982. – С. 39 – 44.

-
122. Шестоपालов А.В. О неадекватности одномерной модели выброса угля и газа С.А. Христиановича натурным наблюдениям при ее двумерной постановке / А.В. Шестоपालов // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках // Сб. научн. тр. 9-й междунар. научной школы. – Симферополь: ТНУ, 1999. – С. 87 – 88.
123. Фейт Г.Н. Вероятность внезапных выбросов угля и газа в различных горно-геологических условиях / Г.Н. Фейт // Внезапные выбросы в угольных шахтах. – М.: Недра, 1970. – С. 206 – 213.
124. Агафонов А.В. Способы и средства обеспечения безопасности проведения подготовительных выработок по выбросоопасным пластам / Агафонов А.В. – Донецк: Донбасс, 1998. – 238 с.
125. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтопластах, разрабатывающих пласты, склонные к горным ударам. – Л., 1988. – 122 с.
126. Инструкция по прогнозу и предупреждению внезапных прорывов метана из почвы горных выработок. – Макеевка-Донецк, 1987. – 29 с.
127. Руководство по применению на шахтах Донбасса способа текущего прогноза внезапных прорывов метана из почвы горных выработок. – Макеевка, 1993. – 43 с.
128. Петросян А.Э. Теория внезапных выбросов / Петросян А.Э., Иванов Б.М., Крупеня В.Г. – М.: Наука, 1983. – 152 с.
129. Забигайло В.Е. Геологические основы теории прогноза выбросоопасности горных пород и угольных пластов / Забигайло В.Е. – К.: Наук. Думка, 1978. – 178 с.
130. Технологические аспекты отработки выбросоопасных угольных пластов крутого падения: Монография [под. ред. Шаповала Н.А.] / [авт. текста Н.А. Шаповал, Н.А. Алышев, Д.М. Житленок и др.]. – Донецк: ОАО «УкрНТЭК», 2000. – 144 с. 104. Шатилов В.А. Зональность внезапных выбросов

угля и газа в шахтах Донбасса / Шатилов В.А. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 120 с.

131. Вереда В.С. К вопросу о возможных причинах выбросов угля, газа и пород в Донецком бассейне / В.С. Вереда, Б.К. Юрченко // Вопросы теории выбросов угля, породы и газа. – К.: Наук. думка, 1973. – С. 301 – 308.

132. Вольпова Л.С. Влияние генетического типа по восстановленности на выбросоопасность угольных пластов / Л.С. Вольпова // Прогноз выбросоопасности угольных пластов и вмещающих пород на стадии геологоразведочных работ: Тез. докл. к Всес. науч. – техн. семинару в г. Днепропетровске, 22 – 24 февраля 1977 г. М.: Центр. правление НТГО М-ва геологии СССР. – С. 121 – 122.

133. Геолого-углехимическая карта Донецкого бассейна. – М.: Углетехиздат, 1954. – Т.8. – С. 120 – 126.

134. Иванов Б.М. Механические и физико-механические свойства выбросоопасных угольных пластов / Иванов Б.М., Фейт Г.Н., Яновская М.Ф. – М.: Наука. 1979. – 195 с.

135. Физикохимия газодинамических явлений в шахтах [под ред. В.В. Ходота]. – М.: Наука, 1973. – 140 с.

136. Фейт Г.Н. Влияние способов управления давлением на выбросоопасность угольных пластов в центральном районе Донбасса / Г.Н. Фейт, Э.И. Гайко, А.К. Гробунов // Вопросы предотвращения внезапных выбросов: Научн. сообщ. – 1987. – С. 107 – 114.

137. Фейт Г.Н. Результаты моделирования процесса разрушения угля при внезапных выбросах / Г.Н. Фейт // Создание способов и средств для разработки выбросоопасных угольных пластов. Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского – М., 1978. – Вып. 169. – С. 41 – 47.

138. Использование вибрационных и волновых эффектов при отработке выбросоопасных пластов / [авт. текста В.Н. Потураев, С.П. Минеев]; [отв. ред. Булат А.Ф.]; АН Украины. Ин-т геотехн. механики. – К.: Наук. думка, 1992. – 200 с.

-
139. Борисенко А.А. Теоретические основы гидроотжима и гидрорыхления на угольных пластах / Борисенко А.А. – М.: Недра, 1966. – 114 с.
140. Минеев С.П. Проведение выработок проходческими комбайнами по выбросоопасным угольным пластам и породам / С.П. Минеев, А.А. Рубинский. – Днепропетровск: «Дніпро», 2006. – 384 с.
141. Индыло С.В. Разработка методики прогноза выбросоопасности и управления газодинамическим режимом призабойного массива при проведении подготовительных выработок: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 25.00.20 «Геомеханика, разрушении е горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» / С.В. Индыло. – М., 2008. – 21 с.
142. Куликов А.П. Прогнозирование выбросоопасности угольных пластов по геологическим факторам: Обзор. / А.П. Куликов, Б.М. Иванов // Геол. методы поисков и разв. м-ний тверд. горюч. ископаемых. – М. ВИЭМС, 1975. – 37 с.
143. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства / Ямщиков В.С. – М.: Недра, 1989. – 445 с.
144. Булат А.Ф. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов / А.Ф. Булат, В.К. Хохолев – К.: Наук. думка, 1990. – 165 с.
145. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1989. – 192 с.
146. Николин В.И. Борьба с выбросами угля и газа в шахтах / Николин В.И., Балинченко И.И., Симонов А.А. – М.: Недра, 1981. – 300 с.
147. Фейт Г.Н. Расчет изменения потенциальной энергии и прогноз выбросоопасности угольных пластов при разработке на больших глубинах / Г.Н. Фейт, О.Н. Малинникова // Внезапные выбросы угля и газа, рудничная аэрология: Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – 1990. – С. 23–28.

-
148. Фейт Г.Н. Современный уровень и перспективы развития методов прогноза, контроля и управления состоянием массива горных пород / Г.Н. Фейт, О.И. Хмара, А.Г. Хейфец // Проблемы разработки угольных месторождений: Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 1997. – Вып. 306. – С. 203 – 211.
149. Сахаров Г.Д. О влиянии упругих волн на процесс хрупкого разрушения призабойной части угольного пласта и связи этого влияния с выбросоопасностью / Г.Д. Сахаров // Материалы 2-й конф. молодых ученых. – Днепропетровск, 1981. – С. 52 – 81.
150. Теория защитных пластов / [авт. текста И.М. Петухов, А.М. Линьков, В.С. Сидоров, И.А. Фельдман]. – М.: Недра, 1976. – 223 с.
151. Петросян А.Э. Об условиях проявления энергии метана при внезапных выбросах угля и газа / А.Э. Петросян, Б.М. Иванов, М.Ф. Яновская // Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского, 1975. – Вып. 127. – С. 10 – 18.
152. Петухов И.М. Использование природных сил и особенностей строения угольного пласта для облегчения его выемки / И.М. Петухов, А.М. Линьков. – Л.: ВНИМИ, 1960. – 43 с.
153. Авершин С.Г. Горные удары / Авершин С.Г. – М.: Углетехиздат, 1955. – 236 с.
154. Николин В.И. Анализ применения врубовых машин при разработке выбросоопасных пластов / В.И. Николин, О.А. Колесов, И.И. Балинченко [и др.] // Уголь Украины. – 1979. – №3. – С. 33 – 34.
155. Алексеев А.Д. Работы институтов АН УССР по проблеме «Выбросы угля, породы и газа» / А.Д. Алексеев, Н.С. Поляков. – Донецк: Европ. экон. комис., 1974. – 10 с.
156. Найдыш А.М. Струговая выемка на пластах с большим газовыделением / А.М. Найдыш, Э.С. Котлов. – М.: Недра, 1975. – 169 с.
157. Божко В.Л. Новое направление в решении проблемы борьбы с внезапными выбросами угля и газа / В.Л. Божко, М.И. Большинский, Н.И. Балинченко // Уголь Украины. – 1979. – №6. – С. 35 – 36.

-
158. Розанцев Е.С. Предотвращение внезапных выбросов угля и газа в подготовительных выработках с использованием локальных способов / Розанцев Е.С. – Донецк: Европ. экон. комис., 1974. – 8 с.
159. Большинский М.И. Оптический метод определения выбросоопасности песчаников / М.И. Большинский, Е.С. Матлак, А.Е. Федченко // Уголь Украины. – 1974. – № 9. – С. 17 – 18.
160. Кравченко В.И. Безопасность при управлении горным давлением в лавах пологих пластов / Кравченко В.И. – М.: Недра, 1975. – 221 с.
161. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом / Ханукаев А.Н. – М.: Недра, 1974. – 223 с.
162. Николин В.И. Основные решения проблемы прогноза выбросоопасности и борьбы с выбросами породы и газа на глубоких шахтах Донбасса / В.И. Николин, М.И. Большинский. – Донецк: Европ. экон. комис., 1974. – 11 с.
163. Анализ проведения выработок по выбросоопасным породам с опережающим врубом / [авт. текста Ф.А. Абрамов, М.Ф. Друкованый, Г.А. Шевелев и др.]. – Разраб. месторождений полезных ископаемых: Респ. межвед. науч. – техн. сб., 1971, Вып. 25. – С. 47–51.
164. Временная инструкция по применению микрокапиллярного увлажнения массива угля с целью снижения пылеобразования и предупреждения внезапных выбросов угля и газа. – Донецк, 1973. – 30 с.
165. Шаповал Н.А. Предупреждение внезапных обрушений угля в очистных забоях крутых пластов / Н.А. Шаповал, Ю.Г. Литвинов, Б.И. Курицин // Уголь Украины. – 1989. – №11. – С. 32 – 33.
166. Паршиков Н.Б. Влияние на крепость режима проветривания призабойного пространства / Н.Б. Паршиков, Ю.В. Мегель // Уголь Украины. – 1988. – №7. – С. 6 – 7.
167. Ведение горных работ в нарушенных зонах / [авт. текста С.П. Минеев, А.А. Рубинский, А.Ю. Афанасьев и др.] // Безопасность труда в пром-сти. – 1989. – №4. – С. 55 – 58.

-
168. Физико-химические методы управления состоянием угольно-породного массива / [авт. текста Забигаило В.Е., Васючков Ю.Ф., Репка В.В.]; [отв. ред. А.З. Широков]; АН УССР. – Ин-т геологии и геохимии горючих ископаемых. – К.: Наук. думка, 1979. – 192 с.
169. Миронов К.В. Справочник геолога-угольщика / Миронов К.В. – М.: Недра, 1982. – 310 с.
170. Скафа П.В. Подземная газификация углей / Скафа П.В. – М.: Госгортехиздат, 1969. – 322 с.
171. К симпозиуму ЭКЕ по газификации и сжижению угля. // Глюкауф. – 1976. – № 1. – С. 4 – 24.
172. Ржевский В.В. О нетрадиционных технологиях в угледобывающей промышленности / Ржевский В.В., С.В. Ржевская // Будущее горной науки. – М.: Наука, 1989. – С. 94 – 105.
173. Юркевич Я. Угলেখимия / Я. Юркевич, С. Росинский. – М.: Металлургия, 1973. – 430 с.
174. Баранов С.М. Интенсификация растворимости углей в органических растворителях / С.М. Баранов, Н.К. Неволин, Г.В. Самойленко // Изменения свойств угля при химических и физических воздействиях. – К.: Наук. думка, 1984. – С. 102 – 110.
175. Баранов С.М. Современные проблемы угলেখимии / С.М. Баранов // Вісник АН УРСР, 1976. – № 4. – С. 53 – 59.
176. Русьянова Н.Д. Взаимодействие угля с растворителями в процессе экстракции / Н.Д. Русьянова, Н.Е. Максимова, И.А. Полякова // Химия твердого топлива. – 1988. – №1. – С. 33 – 36.
177. Дембовская Е.А. Жидкое топливо и химические продукты из угля / Е.А. Дембовская // Химия и переработка топлив. Т.ХХХ11. – М.; 1977. – С. 24 – 43.
178. Аренс В.Ж. Сквацинная гидродобыча угля / Аренс В.Ж., Брюховецкий О.С., Хчян Г.Х. – М., 1995. – 140 с.

-
179. Васючков Ю.Ф. Роль нетрадиционных экологически чистых технологий добычи угля в развитии топливно-сырьевой базы России и стран СНГ / Ю.Ф. Васючков // Междунар. симп. «Топливо-энерг. Ресурсы России и др. стран СНГ», СПб, 24-26 апр.1995. – СПб,1995. – С. 229 – 233.
180. Гейхман И.Л. Нетрадиционные решения в проблеме добычи угля / И.Л. Гейхман, А.А. Кузнецов // Уголь. – 1997. – №9. – С. 44 – 47.
181. Состояние и перспективы скважинной гидродобычи полезных ископаемых // Обзорная информация, НИИ ТЭХИМ. – М.:1987. – 67 с.
182. Зорин А.Н. Импульсно-волновое возмущение в скважине при пневмогидравлическом способе добычи угля / А.Н. Зорин, В.Г. Колесников, А.Т. Диденко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1984. – №4. – С. 88 – 92.
183. Софийский К.К. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля / К.К. Софийский, Калфакчян А.П. , Воробьев Е.А. – М.: Недра, 1994. – 191 с.
184. Нетрадиционные технологические процессы добычи угля / [авт. текста Потураев В.Н. и др.]; [под ред. Потураева В.Н.]. – К.:Техника.1986. – 117 с.
185. Булат А.Ф. Управление состоянием предельно напряженного породного массива малоэнергоемкими воздействиями / Булат А.Ф., Курносов А.Т., Русанцов Ю.А. – К.: Наук. думка, 1993. – 175 с.
186. Временная инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным обрушениям (высыпаниям) угля. – Горловка – Макеевка, 1991. – 29 с.
187. Мероприятия по предупреждению несчастных случаев, профессиональных заболеваний и аварий на основании анализа обстоятельств и причин их возникновения на предприятиях угольной промышленности Украины за 1993 г. – Макеевка, 1994. – 34 с.

-
188. Лунев Н.С. Выемка выбросоопасных угольных пластов узкозахватными комбайнами по односторонней схеме / Н.С. Лунев, В.Н. Кулаковский, Ю.П. Иванов // Уголь Украины. – 1975. – №9. – С. 6 – 7.
189. Жуков В.Е. Выбор способа управления горным давлением на крутых выбросоопасных угольных пластах / В.Е. Жуков, М.Ф. Малюга // Безопасность труда в промышленности. – 1976. – №3. – С. 52 – 55.
190. Волошин Н.Е. Опережающая разработка защитных пологих пластов / Волошин Н.Е. – М.: Недра, 1968. – 56 с.
191. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа. – М.: Недра, 1977. – 158 с.
192. Зорин А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2001. – 413 с.
193. Козловчунас Е.Ф. Предотвращение выбросо- и удароопасности очистного забоя управлением напряженно-деформированного состояния массива горных пород / Е.Ф. Козловчунас, Ю.Л. Худин // Проблемы разработки угольных месторождений: Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 1997. – Вып. 306. – С. 115 – 120.
194. Корчемагин В.А. Поля напряжений и деформаций и выбросоопасность углей и пород Донецко-Макеевского района Донбасса / В.А. Корчемагин, И.О. Павлов // Наукові праці УКРНДМІ НАН України. – Вып. 5. – (часть 2); [під. заг. ред. А.В. Анциферова]. – Донецк, 2009. – С. 189 – 196.
195. Журавков М.А. Механико-математическое моделирование механизмов проявлений очагов газодинамических явлений в массивах горных пород / М.А. Журавков, А.А. Кушунин // Наукові праці УКРНДМІ НАН України. – Вып. 5. – (часть 1); [під. заг. ред. А.В. Анциферова]. – Донецк, 2009. – С. 191 – 200.
196. Захаров В.Н. Мониторинг сейсмоакустических процессов и прогноз гео- и газодинамических явлений при подземной разработке месторождений /

В.Н. Захаров // Наукові праці УКРНДМІ НАН України. – Вып. 5. – (часть 1) [під. заг. ред. А.В. Анциферова]. – Донецк, 2009. – С. 249 – 257.

197. Рубан А.Д. Комплексные исследования геомеханического и газодинамического состояния угленосного массива / А.Д. Рубан, В.Н. Захаров // Наукові праці УКРНДМІ НАН України. – Вып. 5. – (часть 1); [під. заг. ред. А.В. Анциферова]. – Донецк, 2009. – С. 327 – 334.

198. Киселев Н.Н. Применение синергетического подхода к установлению особенностей формирования выбросоопасности в условиях пологих нарушенных угольных пластов Донбасса / Н.Н. Киселев, А.Г. Радченко // Наукові праці УКРНДМІ НАН України. – Вып. 5. – (часть 1); [під. заг. ред. А.В. Анциферова]. – Донецк, 2009. – С. 373 – 382.

199. Беляева И.Ю. О предельном значении параметра упругой нелинейности структурно неоднородных сред / И.Ю. Беляева, В.Ю. Зайцев // Акустический ж. – 1998. – т. 44. – № 6. – С. 731 – 737.

200. Ларичев В.А. О едином описании релаксационных и резонансных свойств акустических сред в рамках термодинамического подхода / В.А. Ларичев, Г.А. Максимов // Акустический ж. 1998. т. 44. – №6. – С. 814 – 822.

201. Обоснование параметров метода прогноза внезапных выбросов угля и газа на шахтах Донбасса // Отчет по теме ОБ-34 (заключительный). – Днепропетровск: НГУ, 2007. – 126 с.

202. Крылов В.В. Модель развития акустической эмиссии как хаотизация переходных процессов в связанных нелинейных осцилляторах / В.В. Крылов, П.С. Ланда, В.А. Робсман // Акустический ж. – 1993. – т. 39. – №1. – С. 108 – 122.

203. Физическая акустика /под ред. У. Мэзона. – Т. 4. – Применения физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела. – Ч. Б. /Пер. с англ. под ред. Л.Г. Меркулова и В.А. Шутилова. – М.: Мир, 1970. – 440 с.

-
204. Колесников В.Г. Управление разрушением напряженных пород с позиций динамической микромеханики / В.Г. Колесников // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 1997. – №3. – С. 92 – 95.
205. Основы теории колебаний /В.В. Мигулин, В.И. Медведев, Е.Р. Мустель, В.Н. Парыгин; [под ред. В.В. Мигулина]. – 2-е изд. перераб. – М.: Наука, Гл. ред. Физ-мат. лит-ры, 1988. – 392 с.
206. Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / А.Н. Зорин, Ю.М. Халимендик, В.Г. Колесников. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2001. – 413 с.
207. Колесников В.Г., Гроссу А.И. Физические аспекты контроля деформирования и разрушения напряженных горных пород / В.Г. Колесников, А.И. Гроссу // Геотехническая механика – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 1997. – №3. – С. 97 – 100.
208. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
209. Ямщиков В.С. Волновые процессы в массиве горных пород / Ямщиков В.С. – М.: Недра, 1984. – 272 с.
210. Паламарчук Т.А. Теоретические предпосылки использования динамических характеристик акустических и электромагнитных полей для диагностики напряженного состояния массива горных пород / Т.А. Паламарчук // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 1997. – №3. – С. 53 – 56.
211. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел / Федоров В.В. – Ташкент: ФАН, 1985. – 168 с.
212. Киялбаев Д.А., Чудновский А.И. О разрушении деформируемых тел / Д.А. Киялбаев, А.И. Чудновский //Прикладная механика и техническая физика. – 1970. – №3. – С. 26 – 33.
213. Исакович М.А. Общая акустика / Исакович М.А. – М.: Наука, 1973. – 496 с.

-
214. Чабан И.А. Затухание звука в грунтах и горных породах / И.А. Чабан // Акустический ж. – 1993. – т. 39, №2. – С. 362 – 369.
215. О деятельности Сибирского отделения Российской Академии Наук в 1999 году. <http://www-sbras.nsc.ru/win/sbras/rep/99/intro.htm>
216. Король В.И. Газодинамические явления в угольных шахтах: история и современные состояние проблемы / В.И. Король // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2007». – Д.: Національний гірничий університет. 2007. С. 60 – 63.
217. А.с. 1333853 СССР. Способ акустического прогноза выбросоопасности угольных пластов и устройство для его осуществления / Мирер С.В., Масленников Е.В., Хмара О.И.
218. Пат. 43239А Україна, МКИ E21F 5/00, E21C. Спосіб діагностики гірського масиву / О.М. Шашенко, Є.В. Масленніков.
219. «Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ» С0910.1.00174088.011 – 2005, розділи 6.3.4, 6.3.5.
220. Лунев С.Г. Прогноз газодинамических явлений по параметрам акустических сигналов / С.Г. Лунев С.Г. // Науковий вісник НГУ – 2000. – № 1. – С.35 – 38.
221. Ефимова М.Р. Общая теория статистики / М.Р. Ефимова, Е.В. Петрова, В.Н. Румянцева. – М.: ИНФА-М, 1996. – 416 с.
222. Пат. на корисну модель № 41261 Україна. Спосіб акустичного прогнозування раптових викидів вугілля, породи, та газу в підземних виробках / Шашенко О.М., Масленніков Є.В., Сторчак С.О., Брюханов О.М., Король В.І.; МПК E 21 F 5/00. Заявл. 29.12.08; Опубл. 12.05.09; Бюл. № 9.
223. Шашенко А.Н. Акустическая система контроля напряженного состояния углепородного массива АК-1М / А.Н. Шашенко А.Н., Е.В. Масленников, И.В. Кондратюк, В.И. Король // Уголь Украины. – 2010. – № 11. – С. 31 – 34.

224. Мещанинов С.К. Имитационная система промышленной безопасности угольных шахт (ИСПБУШ) / С.К. Мещанинов, В.И. Король // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2010. – № 1. – С. 19-21.

225. Шашенко О.М. Резонансний ефект розповсюдження акустичних хвиль у неоднорідному вуглепорядному масиві / О.М. Шашенко, В.І. Король // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2011. – № 3. – С. 19 – 12.

Наукове видання

**Король Вячеслав Іванович
Скобенко Олександр Васильович**

**АКУСТИЧНИЙ СПОСІБ ПРОГНОЗУ
ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ**

Монографія
(Російською мовою)

Друкується у редакційній обробці авторів.

Підп. до друку 17.07.2013. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 10,1.
Обл.-вид. арк. 10,1. Тираж 50 пр. Зам. № .

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06. 2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.