

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

САХНО ИВАН ГЕОРГИЕВИЧ

УДК [622.063.23:622.831:622.13](043.5)

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ
ГОРНЫХ ПОРОД НЕВЗРЫВЧАТЫМИ РАЗРУШАЮЩИМИ
СМЕСЯМИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность

05.15.02 – «Подземная разработка месторождений
полезных ископаемых»

Диссертация на соискание ученой степени доктора
технических наук

Научный консультант: доктор
технических наук, профессор
Касьян Николай Николаевич

Красноармейск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ	8
ВВЕДЕНИЕ	9
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ГОРНЫХ ПОРОД СТАТИЧЕСКИМ ПРИЛОЖЕНИЕМ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК	20
1.1 Анализ состояния угольной промышленности Украины	21
1.2 Анализ горно-геологических и горнотехнических факторов, определяющих устойчивость горных выработок	25
1.3 Существующие способы управления устойчивостью горных выработок	34
1.4 Анализ современных представлений о разрушении горных пород	43
1.5 Современные способы статического разрушения горных пород	52
1.6 Современные представления о невзрывчатых разрушающих средствах горных пород	59
1.6.1 Природа расширения вяжущих веществ при гидратации	59
1.6.2 Технология производства и рецептура невзрывчатых разрушающих смесей	63
1.7 Методики расчета параметров разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями	68
1.8 Цель и задачи исследований	73
Выводы по разделу 1	74
2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ	76
2.1 Методика экспериментов по изучению свойств и режимов работы невзрывчатых разрушающих смесей	76
2.1.1 Техника ядерного магнитного резонанса и методика определения фазового состояния растворов невзрывчатых разрушающих смесей	76
2.1.2 Методика лабораторных исследований компрессионно-деформационных свойств расширяющихся смесей	79
2.1.3 Методика лабораторных исследований термокинетических характеристик расширяющихся смесей	88
2.1.4 Методика экспериментов по определению эксплуатационных характеристик расширяющихся смесей	90

2.1.5 Методика исследований влияния электрического поля на скорость гидратации невзрывчатых разрушающих смесей	91
2.2 Методика численного математического моделирования	93
2.2.1 Выбор метода моделирования	93
2.2.2 Численное моделирование геомеханических процессов с учетом их нелинейности	95
2.2.3 Разработка деформационных моделей геоматериалов	100
2.3 Методика лабораторных исследований на эквивалентных и структурных моделях	105
2.3.1 Выбор методов моделирования	105
2.3.2 Моделирование методом эквивалентных материалов	107
2.3.3 Структурное моделирование	108
2.4 Методика проведения шахтных натурных наблюдений	111
Выводы по разделу 2	114
3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРОВ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ	115
3.1 Частные задачи исследования	115
3.2 Кинетика гидратации и фазовое состояние раствора	116
3.3 Исследование физико-механических свойств невзрывчатых разрушающих смесей	126
3.3.1 Лабораторные исследования распорно-деформационных свойств	126
3.3.2 Лабораторные исследования термокинетических характеристик невзрывчатых разрушающих смесей	140
3.3.3 Механизм развития самопроизвольного выброса невзрывчатых разрушающих смесей из шпуров	146
3.4 Направления повышения эффективности работы невзрывчатых разрушающих смесей в условиях подземных горных выработок	149
3.4.1 Совершенствование режимов работы с помощью физических полей	149
3.4.2 Повышение эффективности работы невзрывчатых разрушающих смесей с помощью предварительного сжатия	150
3.4.3 Повышение эффективности работы невзрывчатых разрушающих смесей за счет регулирования теплообменных процессов	157

3.4.4 Повышение эффективности работы невзрывчатых разрушающих смесей с помощью электрического поля	159
3.5 Модифицированные невзрывчатые разрушающие смеси для условий подземных горных выработок	165
3.5.1 Лабораторные исследования комплексных смесей с добавками портландцементов	165
3.5.2 Лабораторные исследования комплексных смесей с добавками этановой кислоты	172
3.5.3 Лабораторные исследования комплексных невзрывчатых разрушающих смесей с добавками гумата натрия	176
3.6 Аналитико-экспериментальный метод расчета динамики роста давления расширения невзрывчатых разрушающих смесей	180
Выводы по разделу 3	183
4 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД	186
4.1 Особенности разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей	186
4.2 Разработка модели разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями с учетом существующего поля напряжений	189
4.3 Разработка способов и средств направленного разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей	197
4.4 Разработка способов разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей	207
4.5 Разработка способов проведения горных выработок и восстановления их эксплуатационного сечения	217
Выводы по разделу 4	224
5 УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НЕВЗРЫВЧАТЫМИ РАСШИРЯЮЩИМИСЯ СРЕДСТВАМИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ	226
5.1 Обеспечение устойчивости горных выработок на стадии их проведения	226
5.2 Обеспечение устойчивости выработок, поддерживаемых в зоне разрушенных пород	236
5.2.1 Обоснование управления напряженно-деформированным состоянием пород в зоне разрушенных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей	236

5.2.2 Шахтные натурные наблюдения за деформированием пород в зоне ведения ремонта горных выработок	237
5.2.3. Исследование способа повышения несущей способности разрушенных горных пород, представленных квазидискретной средой	244
5.2.4 Исследование способов повышения несущей способности разрушенных горных пород, представленных блочно-дискретной средой	249
5.3 Обеспечение устойчивости выработок, поддерживаемых за лавой	254
5.3.1 Шахтные наблюдения за деформированием горных пород в зоне влияния очистных работ	254
5.3.2 Лабораторные исследования динамики деформационных процессов и трещинообразования в массиве вокруг выработки, поддерживаемой за лавой	264
5.3.3. Результаты исследования изменения напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг выработок	266
5.3.4 Разработка и исследование способов управления напряженно-деформированным состоянием породного массива вокруг выработок, поддерживаемых за лавой	284
Выводы по разделу 5	295
6 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД В ВЫРАБОТКАХ	302
6.1 Исследования способов и средств разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей в промышленных условиях	302
6.2 Исследования способов и средств направленного разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей	308
6.3 Экспериментальные работы по изучению способов ремонта горных выработок с помощью невзрывчатых разрушающих смесей в промышленных условиях	311
6.4 Исследования способа борьбы с пучением почвы горных выработок в шахтных условиях	314
6.5 Испытания способа упрочнения горных пород с помощью НРС в шахтных условиях	316
6.6 Разработка рекомендаций по применению невзрывчатых разрушающих смесей в подземных горных выработках	318
Выводы по разделу 6	318
ВЫВОДЫ	321
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	326

ПРИЛОЖЕНИЯ	364
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Методика определения физико-механических свойств НРС по результатам испытаний на УНТС	365
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Разрешение МакНИИ на применение лазерного дальномера	368
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Разрешение МакНИИ на применение фотокамеры	369
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Характеристики модифицированных НРС	370
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Результаты моделирования МКЭ НДС породного массива вокруг выработки поддерживаемой за лавой	376
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Результаты моделирования МКЭ НДС охранного сооружения выработки поддерживаемой за лавой	386
ПРИЛОЖЕНИЕ 31 – Акт внедрения модифицированных НРС для разрушения негабаритных блоков гранита в условиях Хлебодаровского карьероуправления	389
ПРИЛОЖЕНИЕ 32 – Акт и протокол приемочных испытаний способа невзрывного разрушения горных пород в условиях Хлебодаровского карьероуправления	390
ПРИЛОЖЕНИЕ 33 – Расчет экономического эффекта от внедрения НРС для разрушения негабаритных блоков гранита в условиях Хлебодаровского карьероуправления	395
ПРИЛОЖЕНИЕ 34 – Акт и протокол приемочных испытаний способа невзрывного разрушения блоков горных пород в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8	398
ПРИЛОЖЕНИЕ 35 – Акт и протокол приемочных испытаний способа невзрывного разрушения горных пород на карьере Хлебодаровского карьероуправления	407
ПРИЛОЖЕНИЕ 36 – Акт и протокол приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения прочных пород почвы в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8	412
ПРИЛОЖЕНИЕ И – Акт и протокол приемочных испытаний способа перекрепления выработок с применением НРВ-80 ОП «Шахта «Добропольская»» ГП «Добропольеуголь»	420
ПРИЛОЖЕНИЕ К – Рекомендации по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса	431
ПРИЛОЖЕНИЕ Л – Письмо МакНИИ по согласованию «Рекомендаций по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса»	434

ПРИЛОЖЕНИЕ М – СОУ-П 10.1.00174088.031:2011 «Контроль за проведением способов и технологических процессов по параметрам акустического сигнала при вскрытии склонных к ГДЯ угольных пластов»	435
ПРИЛОЖЕНИЕ Н – Стандарт предприятия СТП (02070826) (33161769):2014 «Методика определения параметров разрушения горных пород в подземных горных выработках с помощью невзрывчатых разрушающих смесей»	437
ПРИЛОЖЕНИЕ О – Справка об использовании результатов диссертации	457

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

- ε_{ox} , ε_{oy} , ε_{oz} – смещения по осям OX, OY, OZ соответственно, мм;
- φ – угол внутреннего трения, град;
- μ – коэффициент Пуассона;
- σ_1 (S1), σ_2 , σ_3 (S3), σ_{ox} , σ_{oy} , σ_{oz} , SEQV, SINT – главные напряжения, напряжения по осям OX, OY, OZ соответственно, эквивалентные напряжения по IV и III теориям прочности, МПа;
- C – сцепление, МПа;
- c_n , c_y – жесткость охранной полосы и угольного пласта соответственно, ГН;
- E – модуль упругости, МПа;
- K_I – коэффициент интенсивности напряжений, $Па\sqrt{м}$;
- P – давление расширения НРС, МПа;
- r_0 – радиус шпура, м;
- T – температура, град;
- t – время, мин;
- v_0 – объемная деформация НРС, %;
- ВВ – взрывчатые вещества;
- ГДЯ – газодинамическое явление;
- ЗНД – зона неупругих деформаций;
- ЗРП – зона разрушенных пород;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- НАН – Национальная академия наук;
- НДС – напряженно-деформированное состояние;
- НРС – невзрывчатая разрушающая смесь;
- ПК – пикет;
- УНТС – установка неравнокомпонентного трехосного сжатия;
- ЭМ – эквивалентные материалы;
- ЯМР – ядерно-магнитный резонанс.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Подземная разработка твердых полезных ископаемых включает процессы разрушения горных пород во время различных технологических операций и управления их состоянием. Разрушение прочных горных пород осуществляется буровзрывным способом (БВР). При этом доля прочных пород, вмещающих пласты в Донбассе, составляет 25 – 30%.

Применение БВР ограничено в выработках, вмещающих выбросоопасные и угрожаемые пласты угля и песчаников. Кроме этого требуется соблюдение особого режима безопасности в выработках с исходящей струей воздуха, наличием дегазационных трубопроводов, высокой запыленностью, а также с концентрацией техники и оборудования. Поэтому разрушение негабаритных блоков и присечка прочных пород при восстановлении эксплуатационного сечения выработок затруднены или невозможны.

Одним из наиболее перспективных статических способов является разрушение невзрывчатыми разрушающими смесями (НРС). Однако применение НРС возможно только после изучения особенностей их гидратационного твердения и расширения в температурных и силовых полях, свойственных породам, вмещающим подземные горные выработки. Эти вопросы изучены недостаточно и требуют проведения исследований для установления закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород за счет расширения НРС в шпуровых и скважинных зарядах. Следует рассмотреть процессы кинетики гидратации НРС, динамику роста напряжения, конструкции заряда, физико-механические свойства породного массива для консолидации и разрушения горных пород.

Синтез целого ряда физических процессов и технологического совершенствования параметров устойчивости горных выработок на разных этапах поддержания и при восстановлении их эксплуатационного состояния является актуальной новой научно-технической проблемой, имеющей большое значение для безопас-

ного ведения горных работ в сложных горно-геологических условиях разработки месторождений.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным тематическим направлением научных исследований согласно постановлению Кабинета Министров Украины от 07.09.2011 г. № 942 «Технологии выявления и оценки полезных ископаемых, их рациональной и безопасной добычи», стратегией развития топливно-энергетического комплекса Украины до 2030 года «Угольная промышленность», а также с приоритетным тематическим направлением научных исследований ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ДонНТУ) согласно указу МОНМС Украины от 07.07.2011 г. № 535 «Высокоэффективное оборудование и ресурсосберегающие технологии в горной, геологоразведочной и нефтяной отраслях промышленности», в рамках госбюджетных тем ГВУЗ «ДонНТУ»: «Разработка и внедрение нетрадиционных ресурсосберегающих технологий управления напряженно-деформированным состоянием горного массива вокруг выработок» (государственный регистрационный номер 0110U001053); «Развитие теоретических основ управления геомеханическим состоянием дискретного породного массива для обеспечения устойчивости подготовительных выработок глубоких шахт» (г.р. № 0111U002118); Н 5-11 «Исследование напряженно-деформированного состояния и прочностных свойств горного массива в условиях шахты ОП «Шахта Стаханова» и разработка средств поддержания выработок за лавой»; Н 11-13 «Совершенствование способов повышения устойчивости горных выработок в условиях глубоких шахт» (г.р. № 0113U001787), в которых автор принимал участие в качестве исполнителя, ответственного исполнителя, руководителя. В рамках госбюджетной темы УкрНИМИ НАН Украины: № III-16/11 «Геомеханические, гидрогеологические и геологические процессы в горных массивах при консервации горнодобывающих предприятий» (г.р. № 0110U007406), в которой автор принимал участие в качестве исполнителя; хозрасчетной темы ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ» с ПАО Ш/У «Покровское» №320/10 «Разработка способа не-

взрывного разрушения негабаритных блоков горных пород в очистном забое», в которой автор принимал участие в качестве руководителя.

Идея работы состоит в использовании закономерностей формирования переходных процессов в НРС и эффекта их статического воздействия во времени на горный массив для управления напряженно-деформированным состоянием горных пород и крепежными системами горных выработок.

Научная проблема заключается в установлении закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния при применении невзрывчатых разрушающих смесей с учетом кинетики их гидратации в шпуровых и скважинных зарядах во времени, конструкции зарядов, влияния технологических физических процессов для управления состоянием горных пород при восстановлении эксплуатационного сечения горных выработок и обеспечении их устойчивости на разных этапах поддержания.

Целью работы является создание научных основ управления состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями с учетом закономерностей формирования переходных процессов в этих смесях и эффекта статического воздействия во времени на горный массив и крепежные системы горных выработок при подземной разработке месторождений.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие **задачи исследований**:

1. Разработка методики определения фазового состояния смесей НРС в процессе гидратации в условиях шпуровых и скважинных зарядов.
2. Установление влияния фазового состояния воды в растворе НРС, коэффициента расширения смеси, температуры, предварительного сжатия и электрического поля на динамику роста и величину давления расширения с помощью физических методов исследования.
3. Установление этапов развития трещин в горных породах и параметров их направленного разрушения под влиянием НРС методами математического моделирования и проведением лабораторных испытаний.

4. Разработка модели разрушения горных пород НРС с учетом существующего поля напряжений и направленного разрушения на основании силового критерия Гриффитса-Ирвина.

5. Разработка и апробация способов и средств управляемого и безопасного разрушения горных пород с помощью НРС при разрушении негабаритов, проведении и восстановлении эксплуатационного состояния выработок.

6. Установление влияния жесткости охранного сооружения и длины зависящей консоли основной кровли на локализацию в ней критических напряжений методами математического и эквивалентного моделирования.

7. Разработка принципов управления НДС горных пород при поддержании подготовительной выработки за лавой и обоснование параметров способов их охраны при принудительном обрушении консоли основной кровли НРС.

Объект исследований – процессы управления состоянием горных пород под действием полей напряжений, вызванных расширением НРС при восстановлении эксплуатационного сечения горных выработок и обрушении пород в лавах.

Предмет исследований – закономерности формирования переходных процессов в НРС и эффект их статического воздействия во времени на горный массив и крепижные системы горных выработок при управлении горным давлением в очистных забоях.

Методы исследований. В работе использован комплексный подход, включающий: анализ и обобщение ранее выполненных исследований, методы ЯМР-спектроскопии, механики разрушения, конечных элементов, экспериментальные исследования физико-механических свойств НРС в объемном неравнокомпонентном напряженном состоянии на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС), испытания НРС в различных деформационных режимах на разработанном стенде, лабораторные исследования на структурных моделях и моделях из эквивалентных материалов, шахтные инструментальные наблюдения за процессом деформирования и сдвижения горных пород; компьютерная обработка, анализ и интерпретация полученных результатов, опытно-промышленная провер-

ка и испытания разработанных способов и средств разрушения горных пород и управления их НДС.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При расширении НРС давление в горных породах изменяется по логарифмической зависимости от жесткости системы «НРС-массив», температуры и воздействия электрического поля. Управление кинетикой гидратации НРС, осуществляющееся путем его предварительного сжатия 0,26 – 17,5 МПа, увеличивает по квадратичной зависимости давление в 1,05 – 1,37 раз. Воздействие электрического поля на НРС вызывает возрастание скорости реакции гидратации по экспоненте от величины электрического напряжения до 300 раз. Это позволяет повысить эффективность разрушения горных пород при восстановлении эксплуатационного состояния горных выработок.

2. При размещении двухэлементного патрона НРС с зазором (a) между силовыми элементами 4 – 27% от диаметра шпура (d) в шпуре, на его стенках, создаются концентраторы растягивающих напряжений, коэффициент которых описывается обратной степенной зависимостью отношения a/d ($k = 1,9 - 4$), что позволяет управлять скоростью и направлением разрушения горных пород при проведении горных выработок и обеспечении их устойчивости.

3. Критические напряжения $[\sigma_{1\max}]$ в основной кровле возрастают по полиномиальной зависимости второго порядка при увеличении длины породной консоли в выработанном пространстве. Локализация $[\sigma_{1\max}]$ определяется соотношением жесткостей охранного сооружения c_n и пласта c_y , так, при $\frac{c_n}{c_y} > 1$, $[\sigma_{1\max}]$ формируются над охранным сооружением, вызывая разрушение кровли в состоянии обобщенного сдвига, при $\frac{c_n}{c_y} < 1$, место $[\sigma_{1\max}]$ и разрушения основной кровли – со стороны пласта. Это позволяет определять приоритетные направления управления НДС массива с учетом качественных изменений механизма нагружения охранной системы.

4. При помещении НРС в кровлю над охранном сооружением происходит изменение градиента и экстремума $[\sigma_{1\max}]$ в основной кровле, поддерживаемой за лавой выработки, и увеличение $[\sigma_{1\max}]$ по линейной зависимости от давления расширения P , что вызывает первичное разрушение кровли в прискважинной области при P в 1,14 раз больше прочности пород на одноосное растяжение $[\sigma_p]$, независимо от $\frac{c_n}{c_y}$, а при $P=4,3[\sigma_p]$ $[\sigma_{1\max}]$ над охранном сооружением превышают $[\sigma_p]$ в 3 раза и в 1,6-1,8 раза выше, чем со стороны пласта, что позволяет управлять временем и местом обрушения основной кровли.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые установлено, что максимальное расширение НРС происходит на третьей стадии гидратационного твердения при изменении фазового состояния воды в растворе;
- получены закономерности изменения кинетики расширения НРС от жесткости системы «НРС-массив», температуры окружающей среды, предварительного сжатия, воздействия электрического поля, введения этановой кислоты и гумата натрия, что позволяет регулировать скорость гидратации и давление расширения НРС при решении задач разрушения горных пород и управления их НДС;
- впервые установлено, что динамика роста и абсолютная величина давления расширения НРС в разных пространственных направлениях, модуль деформации НРС зависят от деформационного режима системы, а при помещении НРС в замкнутую полость давление его расширения в любом пространственном направлении определяется сопротивлением стенок полости;
- впервые установлено, что значение модуля деформации НРС при расширении смеси близком к нулю определяется по зависимости $E = 1987,3e^{0,1182 \cdot \sigma_{cp}}$, где σ_{cp} – значение средних напряжений, а при помещении НРС в полость с податливыми стенками, при расширении смеси до 13,6% модуль деформации может быть рассчитан по зависимости $E = 36,64 \ln(\sigma_{cp}) + 97,31$;

- уточнена закономерность изменения главных напряжений σ_1 вокруг шпура с НРС в процессе роста его структурных новообразований. При помещении смеси в шпуры в патронах с силовыми элементами в виде половин трубы, полученных продольным диаметральной разрезом, на стенках шпура, в одном из диаметральных направлений, совпадающем с ориентацией зазоров, возникают зоны повышенных σ_1 , что позволяет управлять направлением разрушения пород;
- разработана модель разрушения горных пород НРС с учетом существующего поля напряжений, что позволяет рассчитывать параметры разрушения горных пород на основании локального силового критерия Гриффитса-Ирвина;
- впервые разработаны принципы управления НДС массива горных пород искусственным изменением компонент напряжений в окрестности горной выработки за счет принудительного сжатия массива при расширении НРС помещенных в шпуры;
- определена зона влияния шпура с НРС в сплошной и дискретной среде, что позволило определить параметры способов крепления выработок, разработанных на основе указанных решений;
- впервые разработан аналитико-экспериментальный метод расчета динамики роста давления расширения НРС во времени в зависимости от допустимых объемных изменений, температуры и предварительного сжатия;
- впервые установлена зависимость повышения несущей способности разрушенных горных пород, представленных блочно-дискретной средой, от их распора НРС, помещенными в шпуры. Это позволяет определять необходимое для обеспечения устойчивости выработок расстояние между шпурами с НРС и длину шпуров;
- развиты представления о механизме разрушения породного массива вокруг выработки, поддерживаемой за лавой, и установлено, что ее устойчивость в значительной степени определяется длиной зависающей в выработанном пространстве консоли основной кровли и режимом работы охранного со-

оружения, которые оказывают основное влияние на место разрушения пород кровли;

– доказано, что минимизация энергозатрат на принудительное обрушение консоли основной кровли с помощью НРС, помещенных в скважины, достигается за счет изменения НДС и создания условий для разрушения пород в зоне естественных растягивающих напряжений выше нейтральной оси зависающего слоя.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций доказаны: использованием фундаментальных положений физики и механики разрушения твердого тела, положений горной геомеханики; результатами натурных наблюдений за деформационными процессами, в породном массиве вокруг выработок, поддерживаемых в различных горно-геологических и горно-технических условиях; использованием апробированных методик физического моделирования; лабораторными исследованиями более чем на ста моделях; применением метода математического моделирования МКЭ, сходимостью результатов математических, лабораторных и натурных исследований (расхождение не превышает 22%); положительными результатами испытаний способов и средств разрушения горных пород и управления их НДС.

Научное значение работы заключается в установлении закономерностей формирования переходных процессов в невзрывчатых разрушающих смесях и их статического воздействия во времени на горный массив и крепежные системы горных выработок, что позволило создать научные основы управления состоянием горных пород при подземной разработке месторождений.

Практическое значение работы заключается в следующем:

1. Разработана методика определения параметров разрушения горных пород в подземных горных выработках с помощью невзрывчатых разрушающих смесей.

2. Разработаны и утверждены МакНИИ «Рекомендации по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса».

3. Разработана методика определения параметров способа борьбы с пучением почвы горных выработок с минимальными энергозатратами на разрушение пород почвы за счет направленного локального квазистатического воздействия.

4. Разработаны и защищены патентами Украины способ крепления горных выработок, пройденных в породах, склонных к пучению, и способ повышения устойчивости почвы горной выработки.

5. Разработана методика определения параметров способа упрочнения горных пород в процессе поддержания выработки, основанного на эффекте сжатия разрушенных пород с помощью НРС.

6. Разработана методика определения параметров способа крепления горных выработок, основанного на изменении соотношения компонент напряжений в окрестности горной выработки с помощью НРС, помещенных в шпур.

7. Разработана методика определения параметров способа охраны подготовительных выработок, основанного на изменении НДС массива, путем предотвращения зависания основной кровли на границе с выработанным пространством, а также управлении временем и местом ее разрушения.

8. Разработаны, запатентованы и испытаны модифицированные НРС с добавлением этановой кислоты и гумата натрия.

9. Разработаны способы невзрывного разрушения горных пород, основанные на управлении кинетикой расширения НРС с помощью предварительного сжатия в зарядной камере, регулирования теплообменных процессов между зарядом НРС и разрушаемым объектом, воздействию на НРС электрическим полем.

10. Обоснован метод расчета параметров способа направленного разрушения горных пород с помощью НРС, основанного на создании на стенках шпура в требуемом направлении концентраторов растягивающих напряжений. Предложены конструкции патронов НРС для реализации способа, которые защищены патентами Украины.

11. Разработан и защищен патентом Украины способ проведения горных выработок, в котором за счет квазистатического воздействия на горные породы достигается их разрушение с сохранением естественной прочности и несущей

способности пород приконтурной зоны. Обоснована методика определения параметров способа.

12. Разработан и апробирован способ ремонта горных выработок, в котором за счет направленного квазистатического воздействия на породы, смещенные в полость выработки, достигается их разрушение и плавное опускание с учетом плоскостей ослабления по кливажным трещинам, при отсутствии разупрочнения приконтурных пород.

Все приведенные выше технологические решения в методиках защищены патентом Украины как способы.

Реализация результатов работы

Результаты работы внедрены на Хлебодаровском карьероуправлении, ОП «Шахта «Добропольская», ПАО Ш/У «Покровское». Разработан и утвержден стандарт предприятия СТП (02070826) (33161769):2014 «Методика определения параметров разрушения горных пород в подземных горных выработках с помощью невзрывчатых разрушающих смесей». Предложенный в работе способ разрушения с помощью НРС является одним из вариантов воздействия на призабойную часть массива в СОУ-П 10.1.00174088.031:2011 «Контроль за проведением способов и технологических процессов по параметрам акустического сигнала при вскрытии склонных к ГДЯ угольных пластов». Суммарный годовой эффект от внедрения рекомендаций составил 1,46 млн грн.

Личный вклад соискателя. Автором самостоятельно сформулированы цель и задачи исследования, идея работы, ее основные научные положения, выводы и рекомендации, программа лабораторных и шахтных экспериментов, разработаны методики и проанализированы результаты исследований, выбраны методы и проведены математические исследования. Автор принимал непосредственное участие в организации и проведении лабораторных и шахтных экспериментов, апробации результатов работы. Как руководитель, ответственный исполнитель и исполнитель автор принимал непосредственное участие в выполнении НИР, в разработке стандарта предприятия. Содержание диссертации изложено автором самостоятельно.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы в целом и отдельные ее этапы обсуждались и получили одобрение на Международных конференциях: X, XI Skola Geomechaniki (m. Gliwice-Ustron, Poland, 2011, 2013), «Неделя горняка» (г. Москва, Россия, 2008), «Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений» (г. Донецк, Украина, 2008, 2010 – 2013), Miedzynarodowe Sympozjum Geotechnika- Geotechnics (m. Gliwice-Ustron, Poland, 2010, 2012), «Новые технологии подземного строительства и добычи полезных ископаемых» (г. Алчевск, Украина, 2008); «Перспективы освоения подземного пространства» (г. Днепропетровск, Украина, 2008, 2011), «Опыт прошлого-взгляд в будущее» (г. Тула, Россия, 2011), «Устойчивое развитие горно-металлургической промышленности» (г. Кривой Рог, Украина, 2011, 2013), «Школа подземной разработки» (г. Ялта, Украина, 2012), «Перспективы развития восточного Донбасса» (г. Шахты, Россия, 2013), «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» (г. Занджан, Иран, 2013), Международном форум-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2011, 2012), на всеукраинских научно-технических конференциях: «Донбасс-2020: Перспективы развития глазами молодых ученых» (г. Донецк, 2012), «Инновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых» (г. Донецк, 2013), региональной конференции: «Проблемы горной технологии» (г. Красноармейск, 2010, 2012).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 83 научных публикациях, из которых 42 – в научных специализированных изданиях Украины, в том числе 11 без соавторов, 18 материалы конференций и симпозиумов, 20 патенты на изобретение, 2 патента на полезную модель, 1 СОУ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников из 350 наименований на 38 страницах; содержит 325 страниц основного текста, 137 рисунков, 6 таблиц, приложения на 94 страницах; общий объем диссертации составляет 457 страниц.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ГОРНЫХ ПОРОД СТАТИЧЕСКИМ ПРИЛОЖЕНИЕМ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Развитие горнодобывающей отрасли Украины является одним из определяющих факторов в обеспечении экономической и энергетической независимости. Стратегия развития страны ориентирована на использование собственных энергетических ресурсов, ведущее место среди которых занимает уголь.

Уголь является одним из наиболее распространенных видов горючих полезных ископаемых. Мировые запасы угля по энергетическому эквиваленту превышают запасы нефти и газа примерно в 5 раз. По сведениям Мирового угольного института на долю угля приходится 90% энергетического потенциала всех пригодных для разработки полезных ископаемых органического происхождения. Согласно прогнозам [1], в ближайшие три десятилетия потребление угля будет возрастать со среднегодовыми темпами 1,4 – 1,6%. По оценкам International Energy Agency's Medium-Term Coal Market Report 2011, мировой спрос на уголь будет продолжать расти. В связи с низкой текущей ценой за единицу сокращения выбросов европейские энергетические компании могут также пересмотреть ранее объявленный переход с дешевого угля на альтернативные источники энергии [2]. По сведениям Министерства энергетики и угольной промышленности Украины, в балансе запасов первичных источников органического сырья уголь занимает 97,4%; в выработке электроэнергии доля угля – 30%. Следовательно, уголь остается единственным отечественным топливно-энергетическим сырьем и надежным гарантом энергетической независимости на ближайшую и отдаленную перспективу. Украина располагает огромными ресурсами угля: до глубины 1500 м – 117,3 млрд т, из них разведанными категорий А+В+С₁+С₂ – примерно 52,6 млрд т [3]. Доказанные запасы угля в Украине составляют 33,873 млрд т, что отмечается в обзоре мировой энергетики, который подготовлен британской нефтегазовой компанией «British Petroleum» в июне 2011 г. [4], а также в отраслевом обзоре

«Уголь Украины», составленном в июле 2013 г. консалтинговой компанией «Baker Tilly International» [3].

Украина является четвертым крупнейшим производителем угля в Европе. Этого достаточно, чтобы поддерживать уровень добычи 80 млн т угля в течение более 390 лет [3]. Собственными естественными энергоресурсами Украина вполне обеспечивает свои потребности [5], при этом внутреннее потребление угля, по данным Министерства, составляет в 2012 г. – 71%. Это обстоятельство стало обоснованием фундаментального положения стратегии развития страны: ориентация на использование собственных энергетических ресурсов [6].

По оценкам академической и отраслевой науки Украине для удовлетворения потребностей собственной экономики необходимо 110-120 млн т угля в год. Этот уровень добычи отрасли заложен в «Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года и на дальнейшую перспективу» и Программе «Українське вугілля» [5, 6]. В программе предусмотрено, что итоговый потенциальный уровень добычи к 2030 г. будет на уровне 115 млн т.

Таким образом, уголь является гарантом энергетической и экономической независимости страны, оставаясь при этом основным энергоносителем в ближайшей перспективе, а, следовательно, решение проблем связанных с его добычей имеет важное народно-хозяйственное значение для государства.

1.1 Анализ состояния угольной промышленности Украины

В последнее время наблюдается тенденция увеличения доли частных шахт в общей добыче угля. Из всех государственных шахт около 70% работают без капитального ремонта либо любого рода технических обновлений уже более 30 лет. Большинство из них на данный момент являются убыточными, что делает невозможным самостоятельное финансирование шахтами инвестиционных проектов. Такое положение, вместе с недостаточным финансированием со стороны государства, создало предпосылки для постепенного перехода угледобывающих активов в частную собственность.

Шахтный фонд угольной промышленности Украины представлен старыми шахтами, которые долгое время не реконструировались, из них 40% заложены более 70 лет назад [7]. Увеличение глубины разработки, постоянное усложнение условий и увеличение объема поддерживаемых выработок повлекло за собой рост затрат на обеспечение их устойчивости. Так, например, по данным проф. К.В. Кошелева уже на начало 90-х годов из всех поддерживаемых выработок было деформировано более 50%, в том числе 20% находилось в аварийном состоянии, причем 3–4 тыс. км выработок (около 20%) ежегодно ремонтировались [8]. Это свидетельствует о том, что долгие годы одной из основных проблем угольных шахт является недостаточная эксплуатационная надежность горных выработок. Сложившееся положение с проведением и ремонтом горных выработок привело к диспропорции в распределении рабочих по отдельным видам работ. Численность проходчиков практически сравнялась с численностью горнорабочих очистного забоя, а число работников вспомогательных служб за счет рабочих по ремонту выработок превысила 70% от общей численности рабочих по добыче [8].

Ежегодно на шахтах Украины ремонтируется более 5000 км выработок, в том числе 4000 км с подрывкой пород. Анализ затрат на поддержание и ремонт протяженных выработок показывает, что наиболее трудоемкими являются работы связанные с восстановлением эксплуатационного сечения выработок. Средний объем подрывки, приходящийся на одну шахту, составляет 10 – 11 км в год [9]. В настоящее время трудоемкость таких работ составляет 12,8 чел. смен на 1000 т добытого угля, а производительность не превышает 2,3 м³/чел. смену.

Результаты оценки состояния подготовительных горных выработок, по отчетам Министерства энергетики и угольной промышленности Украины, показывают, что 19-23% из них находятся в неудовлетворительном состоянии (табл. 1.1).

Анализ выявил, что в 91% случаев возникает необходимость поддержания выработок за лавой. В качестве охранных сооружений применяются различные конструкции (табл. 1.2), среди которых 33% относятся к категории жестких и всего 6% быстро вступают в работу.

Таблица 1.1 – Эксплуатационное состояние примыкающих к лаве выработок

По состоянию на:	Общая протяженность действующих штреков, км:	Протяженность штреков, не удовлетворяющих требованиям Правил безопасности по параметрам сечения:				
		всего		в том числе, км:		
		км	%	По сечению	По высоте	По зазорам
01.01.06	530,28	102,27	19,3	54,79	13,00	34,48
01.01.07	480,15	92,70	19,3	52,64	12,43	27,63
01.01.08	455,15	93,00	19,1	52,50	12,40	28,10
01.01.09	426,07	89,69	21,0	53,78	12,17	23,74
01.01.10	419,92	93,27	22,2	55,53	12,11	25,63
01.01.11	410,20	92,80	22,6	57,10	12,10	23,60
01.01.12	402,56	93,10	23,1	56,80	11,70	24,60
01.01.13	388,25	88,90	22,8	52,40	12,40	24,10

Таблица 1.2 – Охранные сооружения, применяемые за лавой

№ п.п.	Вид охранного сооружения	% использования
1	Литая полоса	3
2	БЖБТ	20
3	Полублоки	7
4	Газобетонные блоки	3
5	Угольные целики	3
6	Бутокостры	10
7	Костры	7
8	Бутовая полоса	47

В остальных случаях после выемки угля в лаве происходит расслоение пород кровли и их обрушение на границе с выработанным пространством, что приводит к резкой потере сечения подготовительных выработок. В этих случаях

обеспечить устойчивость выработок можно только за счет искусственного изменения НДС массива и управления временем и местом обрушения пород кровли.

Потеря площади поперечного сечения подготовительных выработок вне зоны влияния очистных работ превышает 30 – 40%, а на сопряжениях с очистным забоем достигает 50 – 70%, что требует регулярного укрепления и ремонта. На современных глубинах разработки 20% всех выработок и 100% выработок, подверженных влиянию очистных работ, за период своего существования ремонтируются не менее одного раза [8]. На шахтах Украины практически не применяется техника, позволяющая механизировать процесс ремонта горных выработок, что объясняется отсутствием необходимых размеров поперечного сечения и зазоров в них, а также наличием в выработках транспортного и вспомогательного оборудования. Производство ремонтных работ, выполняемое, как правило, вручную, часто сопровождается внезапными обрушениями и вывалами. Ликвидация их последствий увеличивает сроки выполнения, повышает трудоемкость и стоимость ремонтных работ. Поэтому актуальна разработка способов повышения устойчивости пород в процессе ремонта и в послеремонтный период.

Укрепление проводится с присечкой пород кровли и почвы. Применение механического способа разрушения вмещающих пород ограничивается крепостью пород по шкале проф. М.М. Протодяконова до 6 единиц. Породы с такой крепостью залегают в кровле или почве угольных пластов в 20 – 25% случаев. Взрывное воздействие на массив приводит к развитию естественной трещиноватости, расслоениям и вывалам пород.

Ограничено применение БВР в выработках вмещающих выбросоопасные и угрожаемые пласты угля и песчаников [10]. Из таких пластов добывается до 35% угля. Кроме этого ведение БВР, даже при разрушении негабаритных блоков, невозможно или требует особого режима безопасности в выработках с исходящей струей воздуха, при наличии дегазационных трубопроводов, высокой запыленности, высокой концентрации техники и оборудования. В этих условиях необходима разработка способа разрушения, не оказывающего динамическое воздействие на массив.

Таким образом, наряду с наращиванием уровня добычи и обновлением шахтного фонда одной из важнейших задач, стоящих перед угольной отраслью Украины, традиционно является обеспечение эксплуатационного состояния горных выработок и повышение их надежности.

1.2 Анализ горно-геологических и горнотехнических факторов, определяющих устойчивость горных выработок

Изменение характера и интенсивности деформационных процессов в окружающих выработку породах на больших глубинах стало причиной того, что многие известные способы поддержания, технологические и технические решения исчерпали свои возможности в части обеспечения устойчивости выработок.

Вопросы исследования НДС, вмещающего выработку массива, изучены достаточно глубоко. Вместе с тем, в научно-технической литературе практически отсутствуют как результаты исследований степени влияния разных естественных и технологических факторов на устойчивость поддерживаемых выработок во времени, так и попытки выделить наиболее существенные факторы, которые поддаются регулированию. Вследствие этого традиционные конструкции крепления и способы охраны реализуются, как правило, на стадии сооружения выработки. Параметры данных способов поддержания выбираются без учета изменения степени влияния отдельных естественных и технологических факторов во времени на устойчивость выработки.

Анализ литературных источников позволяет выделить следующие группы факторов, влияющих на устойчивость горных выработок:

I. Геологические факторы: мощность пласта, m , м; глубина расположения, H , м; наличие ослаблений, трещин и неоднородностей в массиве; слоистость массива; наличие плоскостей скольжения; угол падения пласта α , град; литотип пород.

II. Физико-механические факторы: прочность пород, как правило, на одноосное сжатие $\sigma_{сжс}$, МПа; коэффициент структурного ослабления; объемный вес

пород, γ , т/м³; модуль упругости пород, E , МПа; коэффициент Пуассона, μ ; угол внутреннего трения, φ , град; коэффициент сцепления C , МПа; коэффициент разрыхления, k_p ; коэффициент пористости.

III. Технологические факторы: способ проведения (БВР, комбайн); форма, площадь сечения выработки и ее размеры; место расположения выработки относительно пласта; тип и плотность основной крепи; тип и плотность крепи усиления; размер пустот закрепного пространства; качество заполнения пространства за крепью; расстояние от лавы до места установки крепи усиления; способ охраны и его геометрические параметры; расстояние от контура выработки до охранного сооружения; расстояние от лавы до места выкладки охранного сооружения; время поддержания выработки; скорость подвигания очистного забоя.

Ряд авторов в качестве основных факторов, оказывающих влияние на смещения в выработке, отмечают горно-геологические условия: глубину работ, мощность пласта, прочность. Однако, три фактора из описанных: прочность пород $\sigma_{сж}$, глубину расположения H , объемный вес пород γ традиционно сводят к одному безразмерному критерию $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}}$, введенному Ю.З. Заславским. Этот показатель используется в методиках [11, 12].

Авторы, описывающие процессы вокруг горной выработки с помощью методов теории упругости, пластичности и сыпучей среды (Ю.А. Векслер, В.Т. Глушко, А.Н. Зорин, Г.А. Крупенников, Ю.М. Либерман, А.Г. Протосеня, К.В. Руппeneйт, Г.Л. Фисенко и др.), а также использующие в качестве метода исследования численное моделирование (Г.В. Бабиюк, В.И. Бондаренко, С.Н. Гапеев, И.А. Ковалевская, Е.А. Сдвижкова, А.В. Солодянкин, А.Н. Шашенко, и др.) в качестве основных критериев выделяют физико-механические факторы – модуль упругости пород, модуль сдвига, модуль деформации, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, коэффициент сцепления.

Технологические факторы являются легко управляемыми, поэтому большой объем исследований проведен в области разработки и создания новых видов крепи, ее элементов, способов охраны выработок. Значительный личный вклад

при этом внесли Ардашев К.А., Бажин М.П., Баклашев И.В., Бондаренко В.И., Булат А.Ф., Виноградов В.В., Гайко Г.И., Дружко Е.Б., Заславский Ю.З., Зборщик М.П., Ильяшов М.О., Касьян Н.Н., Ковалевская И.А., Кузнецов Г.Н., Литвинский Г.Г., Назимко В.В., Скипочка С.И., Усаченко Б.М., Шашенко А.Н., Якоби О и др.

Наибольшие смещения происходят в выработках, обслуживающих очистной забой. Геомеханические процессы вокруг этих выработок наиболее сложные. В горной практике выделяют несколько характерных этапов существования подготовительной выработки связанных, как правило, с попаданием ее в ту или иную зону влияния очистного забоя.

В основном выделяют 4 этапа поддержания выработки: вне зоны влияния очистных работ, в зоне опережающего горного давления перед подходом лавы, в зоне интенсивных смещений после прохода лавы и в зоне установившегося горного давления после прохода лавы и стабилизации интенсивных геомеханических процессов. Учитывая современные тенденции ведения горных работ и состояние выработок угольной отрасли Украины необходимо выделить еще один частный случай, который может наблюдаться в каждой из описанных зон – это этап ремонта выработки. Восстановление эксплуатационного сечения на этом этапе приводит к развитию специфических геомеханических процессов в массиве.

В зависимости от типа, назначения выработки, системы разработки в каждом отдельном случае этапы могут быть различными. Следует отметить, что при последовательном прохождении выработкой разных этапов соблюдается принцип наследственности, то есть состояние приконтурных пород и крепи на предыдущем этапе оказывает влияние на последующие деформации и режим работы. При этом ряд мероприятий для обеспечения устойчивости выработки эффективно проводить во время предыдущего этапа до наступления необратимых разрушающих деформаций.

Отдельные группы ученых изучали закономерности проявлений горного давления в различных его зонах. Поэтапный анализ проведенных исследований

позволил выделить доминирующие факторы, определяющие устойчивость выработки.

1 Этап. Поддержание выработки вне зоны влияния очистных работ. К этой категории относятся все капитальные выработки, подготовительные выработки в момент проведения и эксплуатации не подверженные очистным работам.

Существующие исследования могут быть разделены на две большие группы: 1) аналитические, использующие методы теории упругости, пластичности, ползучести и сыпучей среды; 2) экспериментальные, опирающиеся на шахтные инструментальные наблюдения.

Изучением закономерностей проявлений горного давления вне зоны влияния очистных работ занимались Ю. И. Бурчаков [13], Ю.А. Векслер [14, 15], В.Т. Глушко [16, 17], Ю.З. Заславский [18, 19], А.Н. Зорин [20, 21], Г.А. Крупенников, Ю.М. Либерман [22], А.П. Максимов [23], К.В. Руппенейт [24], Г.Л. Фисенко [25, 26], И.Л. Черняк [27, 28], Р. Феннер [29], А. Лабасс [30] и др.

По современным представлениям при поддержании выработок вне зоны влияния очистных работ, как результат концентрации напряжений вокруг них, образуется зона неупругих деформаций. Применение тех или иных методов исследований и решений задач о НДС пород обусловлено соотношением напряжений и прочности пород. По И.Л. Черняку [31] в зависимости от этого соотношения могут иметь место три типа деформирования. В первом случае напряжения не превышают предела длительной прочности пород, их смещения являются следствием упруго-вязких деформаций. Для первого типа деформирования характерны смещения контура выработки менее 50 мм, затухающие в течение 3-5 месяцев. Второй тип деформирования имеет место при напряжениях выше предела длительной прочности, но меньше мгновенной прочности. В этом случае вокруг выработки образуются зоны упруго-вязких деформаций и длительного разрушения пород. Размер зоны влияния забоя выработки достигает 15-20 м, а смещения контура – 200 мм. Смещения пород происходят более длительно. Размер зоны разрушенных пород достигает 2 м. При напряжениях выше предела мгновенной прочности пород вокруг выработки образуются три зоны: условно-мгновенного разрушения

пород, длительного разрушения и упруго-вязких деформаций. Образование зоны разрушенных пород происходит вблизи забоя выработки. Размер зоны влияния забоя может быть равен нулю, что характеризуется максимальными скоростями смещений непосредственно у забоя. В этом случае размер зоны разрушенных пород может превышать 5 м, а смещения контура выработки – 500 мм.

Из анализа исследований следует, что основное влияние на деформирование массива пород в этой зоне оказывает режим работы крепи и технология ее возведения. На образование ЗНД влияют размеры и форма выработки, ее габариты, отпор крепи, физико-механические свойства пород, геомеханический критерий, способ проведения выработки. Разрушение пород происходит при превышении возникающими напряжениями предела прочности породы. Приобретенные на этом этапе поддержания деформации оказывают существенное влияние на дальнейшее поведение пород в зоне опорного давления. Для сохранения естественной прочности пород целесообразно отказаться от динамической составляющей разрушения при проведении выработки, обеспечить надежный контакт рамы крепи с приконтурными породами, противодействовать возможному расслоению пород.

2 Этап. Поддержание выработки в зоне опережающего горного давления перед подходом лавы. К этой категории относятся участки подготовительных выработок, расположенные перед движущимся забоем и подверженные влиянию очистных работ, подготавливающие выработки при недостаточных размерах защитных целиков, а также демонтажные и вентиляционные ходки и камеры, пройденные заранее.

Закономерности проявлений горного давления в этой зоне изучались многими учеными. Основным методом исследований были шахтные инструментальные наблюдения. В работах И.Л. Черняка [27, 31, 32], Ю.И. Бурчакова [27, 32], Е.М. Серебреника [32], Б.М. Усан-Подгорного [33 – 36], И.П. Бажина [37, 38], М.А. Комиссарова [39], К.А. Ардашева [37, 40] и др. исследовались закономерности деформирования пород и взаимодействия крепей с породами кровли. Сложившееся на первом этапе НДС пород нарушается опережающей волной горного

давления, что приводит к повышению напряжений в массиве и росту ЗНД вглубь массива.

Деформирование массива пород впереди лавы происходит при нарастающих напряжениях. А.А. Борисовым установлено, что коэффициент концентрации напряжений изменяется от 1 до 5 в зависимости от структуры и состава пород кровли [41]. Исследования, проведенные Н.И. Лобковым [42] показывают, что наличие прочного породного слоя мощностью не менее 20 м в непосредственной близости от пласта, обуславливает формирование опорного давления впереди очистного забоя в 5...7 раз превышающего γH .

Инструментально этот этап фиксируется ростом конвергенции в выработку, который наблюдается обычно за 50-20 м до подхода лавы. Размер зоны разрушенных пород достигает 7-8 м и более, коэффициент расширения пород – 1,15, а смещения контура кровли – 500 мм и более. Большое влияние на смещения пород оказывают состав и свойства пород кровли, глубина разработки, мощность угольного пласта и другие факторы.

Как показывают наблюдения, с увеличением прочности пород кровли смещения уменьшаются, а размеры зоны опорного давления возрастают. При залегании в кровле мелкослоистых глинистых и песчанистых сланцев основная доля смещений проявляется в 15-20 м вблизи очистного забоя. Доля смещений на этом участке может достигать 80% от смещений на сопряжении с лавой. Как и вне зоны влияния очистных работ в породах кровли могут иметь место три типа деформирования. Для всех их характерно увеличение размеров зон деформирования и коэффициентов расширения пород.

На интенсивность развитие ЗНД на втором этапе влияют размеры и форма выработки, ее габариты, геомеханический критерий, а также величина опорного давления, которая зависит от мощности пласта, слоистости пород, мощности прочности пород основной кровли, скорости подвигания очистного забоя.

Максимальное сохранение естественной прочности и монолитности пород приконтурной зоны позволяет обеспечить устойчивость выработки на этом этапе.

3 Этап. Поддержание выработки в зоне интенсивных смещений после прохода лавы. Этот этап характерен для участков подготовительных выработок, расположенных за движущимся забоем и подверженных влиянию очистных работ.

Изучением проявлений горного давления позади очистного забоя занимались ученые институтов ВНИМИ, ДонНТУ, ДонУГИ, ИГД имени А.А. Скочинского, ИГТМ НАН Украины, ИФГП НАН Украины, Казахской АН, КузНИУИ, МГИ, НГУ, ПечорНИУИ и др. Исследования показали, что характер и величины смещений пород кровли и почвы в значительной степени зависят от способов охраны подготовительных выработок и состава пород кровли. По существующим представлениям позади очистного забоя выделяются зоны интенсивных смещений и стационарного опорного давления.

Выемка пласта в очистном забое вызывает значительные деформационные процессы над выработанным пространством. Установлено, что размер зоны интенсивных смещений зависит от состава пород кровли. Чем прочнее породы, тем больше размер зоны интенсивных смещений и наоборот. Исследования показали, что характер деформирования массива пород зависит от жесткости ограждений. При применении жестких ограждений типа литых полос и стенок из железобетонных блоков деформации кровли по своему характеру близки к выработкам, имеющим с двух сторон целики угля или массивы. Значительный рост напряжений приводит к увеличению размеров зон разрушенных пород. По данным И.Л. Черняка [32], размер зоны разрушенных пород достигает 10 и более метров. Породы непосредственной кровли обрушаются и разуплотняясь, подбучивают породы основной кровли. Последние имеют свойство зависать в выработанном пространстве и обрушаться с различным шагом. На этом этапе наблюдается значительная асимметрия смещений в поперечном сечении выработки, поскольку со стороны вынутаго пласта породы кровли лишаются опоры, интенсифицируются смещения со стороны выработанного пространства. Формирование зоны разрушенных пород происходит на небольшом расстоянии от очистного забоя (до 100 м). На этом участке наблюдается максимальный прирост коэффициента расширения пород, который достигает в отдельных случаях 1,15-1,20.

Определению параметров горного давления в этой зоне посвящены работы Ш.А. Балгожина и Ф.И. Клиновицкого [43]. Они рассматривают формирование опорного давления при работе очистного забоя от разрезной печи. На основании инструментальных наблюдений исследователи выделяют две зоны пород в кровле пласта, оказывающие влияние на величину опорного давления. Первая зона связанного сдвижения постоянно, равномерно воздействует по периметру отработанной площади. Породы во второй зоне оказывают активное и переменное воздействие.

В выработанном пространстве авторы выделяют зону размером L_2 , за пределами которой процесс расслоения замедляется, и вышележащие породы опираются на породы зоны обрушения. Процесс расслоения заканчивается позади забоя на расстоянии L_0 . Параметры L_2 и L_0 зависят от мощности пласта, состава и прочности пород.

Разработанный авторами механизм формирования опорного давления показывает, что оно является следствием:

- действия зависающих консолей в зоне расслоения пород;
- влияния массива пород до поверхности, опускающихся связно.

Исследования А.А. Борисова, С.М. Липковича, Н.П. Бажина и др. авторов показывают, что опорное давление может быть разделено на две составляющие части: 1) динамическое, связанное с работой очистного забоя и изменяющееся периодически по мере его движения; 2) статическое, связанное с опусканием массива пород без расслоений. На интенсивность и величину смещений на этом этапе влияют прочностные свойства вмещающих пород, мощность и слоистость пород основной кровли, тип охранного сооружения, возводимого за лавой и его геометрические размеры.

Резерв повышения устойчивости выработки на этом этапе заключается в оптимальном режиме работы охранного сооружения в конкретных горно-геологических условиях, предотвращении зависания консолей основной кровли со стороны выработки, предотвращении выдавливания пород почвы в полость выработки.

4 Этап. Поддержание выработки в зоне установившегося горного давления после прохода лавы и стабилизация интенсивных геомеханических процессов вокруг выработки. Этот этап также характерен для участков подготовительных выработок, расположенных за движущимся забоем и подверженных влиянию очистных работ.

На момент затухания интенсивных смещений после прохода лавы породы вокруг выработки, как правило, разрушены, и дальнейшие смещения определяются работой дискретизированных пород: процессами их разуплотнения, заклинивания, сжатия. Поэтому на величину смещения пород и нагрузки на крепь на этом этапе оказывают те же факторы что и на предыдущем этапе, что определяет применение способов охраны используемых на прошлом этапе.

5 Этап. Поддержание выработки при ведении ремонта и перекреплении выработок.

Поскольку значительные деформации контура выработки и элементов крепи, вызывающие необходимость проведения ремонтных работ, могут наступить на различных этапах существования выработок и при различных горно-геологических условиях, однозначно выделить основные факторы, определяющие устойчивость выработки в послеремонтный период сложно. К основным можно отнести искусственное нарушение сплошности приконтурных пород, величину возможного вывала из законтурной зоны, размер пустот закрепного пространства.

Известно [44, 45, 46], что нарушение равновесного состояния пород при ведении ремонтных работ вызывает активизацию роста ЗРП и смещений в полость выработки. В работах К.В. Кошелева, Ю.А. Петренко, А.О. Новикова [47, 48] на основании проведенных шахтных инструментальных наблюдений на контурных и глубинных замерных станциях установлено, что перекрепление выработок приводит к увеличению интенсивности смещений пород в кровле и боках. Наиболее существенное влияние ремонт оказывает на смещение пород кровли. Скорости смещений пород кровли после ремонта возрастают в 5-16 раз, а боков – в 2-8 раз по сравнению со средними скоростями, зафиксированными в периоды, предшествующие перекреплению.

Наблюдения за глубинными реперами на замерных станциях в выработках показали, что перекрепление приводит к увеличению размеров ЗНД в кровле выработок в 1,05-1,40 раза, а в боках – в 1,10-1,30 раза по сравнению с размерами ЗНД на контрольных станциях, причем рост размеров ЗНД сокращается после каждого последующего ремонта.

Резерв повышения устойчивости выработки на этом этапе заключается в предотвращении нарушения сложившегося вокруг выработки состояния, что может быть достигнуто минимально необходимым выпуском породы, качественной забутовкой, статическими методами разрушения пород при необходимости их присечки.

Таким образом, горная выработка за срок своего существования испытывает действие ряда зон опорного давления. Суммарные смещения пород кровли и почвы за весь срок выработки могут достигать больших величин, значительно превышающих податливость пятизвенных крепей.

Для разработки новых эффективных способов управления состоянием массива горных пород и обеспечения устойчивости выработок необходимо учитывать временной этап существования последних. Необходимость учета этапа существования выработки на выбор средств ее поддержания отмечают Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А. [49, 50], Касьян Н.Н. [51], Кошелев К.В., Петренко Ю.А., Новиков А.О. [47, 48, 52-55].

Таким образом, проведенный анализ существующих исследований и его обобщение позволили выделить пять основных этапов поддержания выработки, определить доминирующие факторы, определяющие ее устойчивость на каждом этапе и наметить пути обеспечения эксплуатационного состояния, основанные на механизме поэтапного развития деформационных процессов и особенностях каждого этапа поддержания выработки.

1.3 Существующие способы управления устойчивостью горных выработок

Устойчивость горных выработок характеризуется величиной их деформаций и степенью техногенного разрушения окружающего массива, которые опре-

деляются объемным полем напряжений, физико-механическими и структурными свойствами пород. Можно выделить два крупных традиционных подхода к обеспечению устойчивости выработок – это улучшение режима работы крепежных систем (увеличение металлоемкости и плотности крепи, предварительный распор, забутовка закрепного пространства, установка крепи усиления, новые конструкции крепления) и управление НДС вмещающего выработку массива (укрепление пород, разгрузка).

Под управлением состояния горного массива понимается управляемое воздействие на естественный ход геомеханических процессов вокруг выработки с помощью технологических и технических способов и средств для обеспечения заранее заданных параметров смещения пород [56].

Более перспективным представляется второй подход, поскольку он позволяет использовать свойства породного массива и влиять на причину смещений, а не бороться с последствиями. Управление состоянием горного массива развивается в двух направлениях – разгрузка пород и упрочнение.

Способы разгрузки основаны на уменьшении или изменении поля напряжений вокруг горных выработок. При этом выделяют региональные и локальные способы. Региональные предполагают расположение выработок в местах предварительной или последующей надработок [57] или же проведение выработок по обрушенным и уплотненным породам [58]. Эффективность этих способов достаточно высокая, однако реализация связана с необходимостью ведения очистных и подготовительных работ в определенном порядке, что вызывает значительные сложности.

Более технологичными являются способы локальной разгрузки. Их основная идея заключается в перенесении максимума напряжений вглубь массива и, соответственно, снижении за счет этого нагрузки на крепь выработки. Ряд авторов в качестве средств разгрузки предлагают использование: камуфлетных зарядов, взрывааемых в боках [59]; разгрузочных щелей, создаваемых буровзрывными или механизированными способами в боках (рис. 1.1) [60, 61], почве выработки [62-

65], за зоной опорного давления со стороны угольного массива [66], а также в кровле [67].

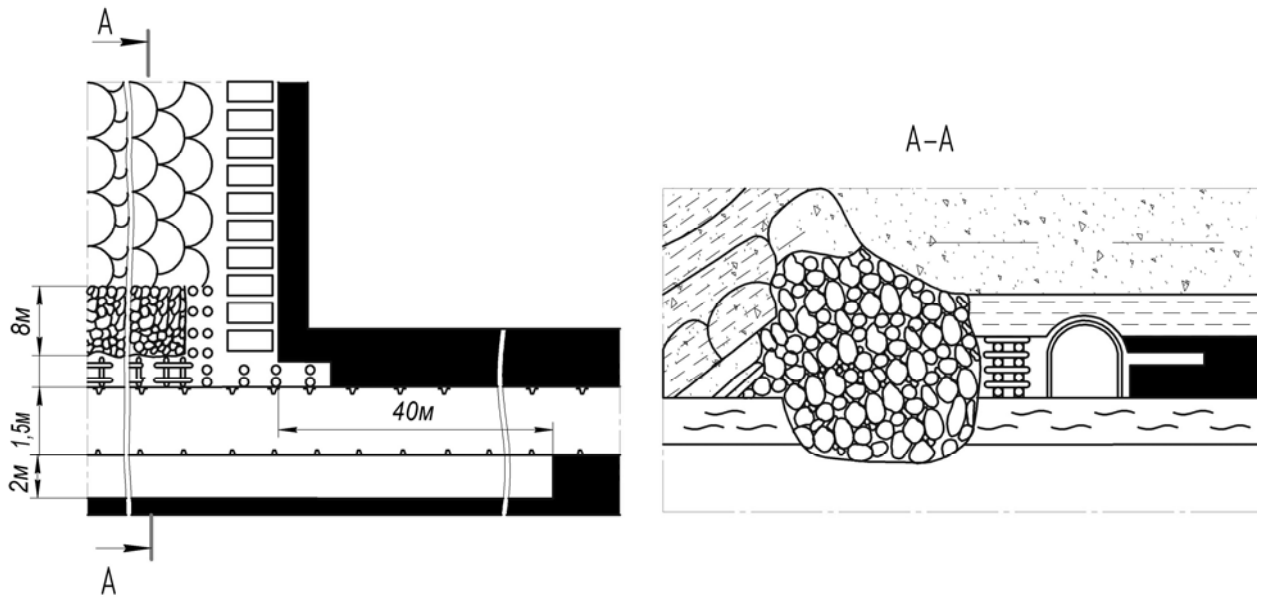


Рисунок 1.1 – Способ охраны выработки разгрузочной щелью, расположенной в боку выработки [60, 61]

Взрывание камуфлетных зарядов приводит к принудительному увеличению зоны разрушенных пород вокруг выработок, что не всегда оказывает длительный положительный эффект. Предположения о естественном затухании скорости деформирования контура выработки, связанном с самоподдержанием пород в пределах ЗРП при достижении ею значительных размеров, не подтверждаются практикой ведения горных работ. В ремонтируемых участковых выработках и выработках, восстанавливаемых по завалу, не наблюдается затухание скорости деформирования, а наоборот отмечается интенсификация смещений контура [44, 45, 68].

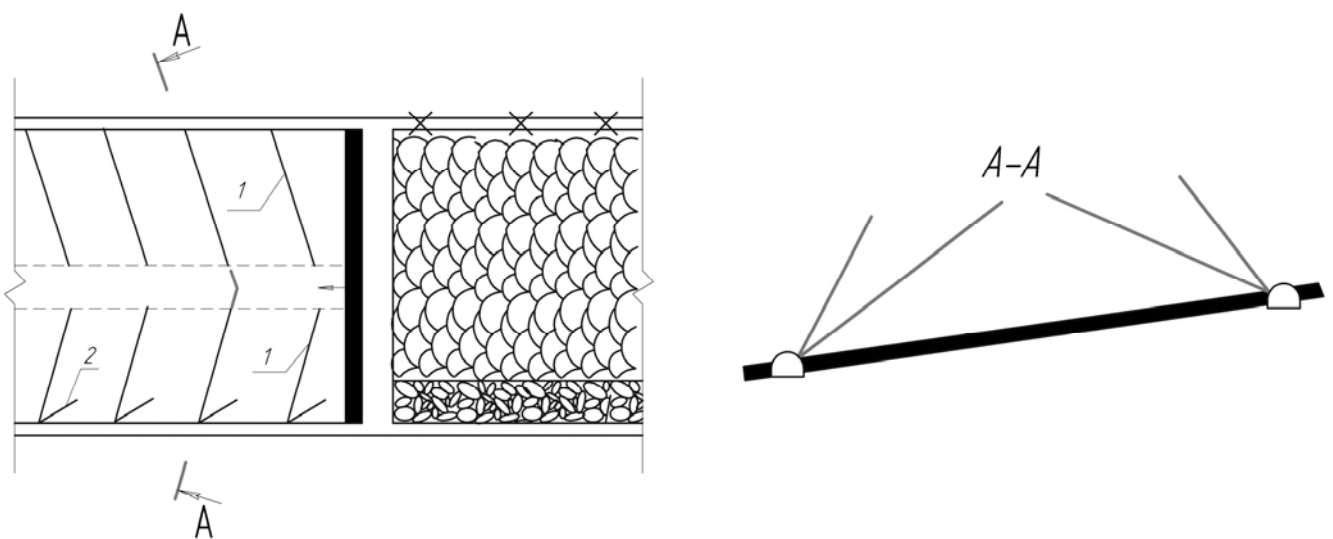
Также локальная разгрузка может осуществляться за счет выбуривания угля в боках выработки скважинами длиной 10-12 м, созданием щелей [69].

Для охраны выработок в зоне влияния очистных работ производят локальную разгрузку путем бурения скважин длиной 10 м, диаметром 250-450 мм на расстоянии друг от друга не более диаметра скважины впереди лавы при столбовой системе разработке по бокам выработки, перпендикулярно её оси по пласту

[70, 71]. Создание полостей в боках выработки уменьшает смещения почвы, но при этом приводит к увеличению смещений пород кровли на 10-15%, что существенно снижает эффективность описанных способов.

Основным недостатком всех предлагаемых способов локальной разгрузки является ограниченное их действие во времени, особенно в условиях больших глубин, что не позволяет гарантировать устойчивость выработки весь период поддержания.

Отдельная группа способов разгрузки направлена на обеспечение устойчивости выработок, находящихся в зоне влияния очистных работ, за счет снижения влияния опорного давления. Наиболее известны способы разупрочнения пород кровли передовым торпедированием, гидромикроторпедированием (рис. 1.2) [72-74].



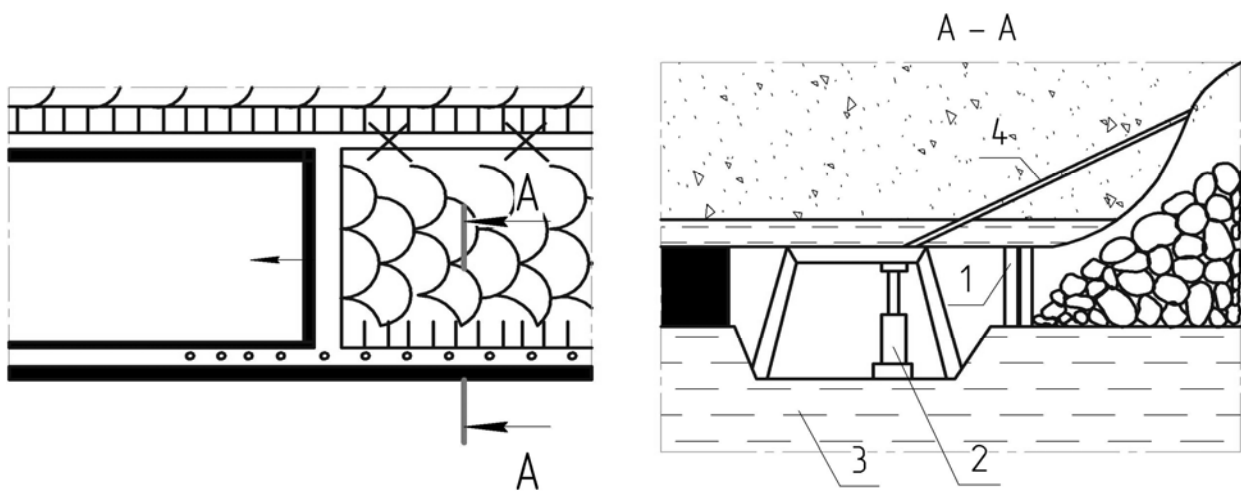
1 – разгрузочная скважина; 2 – отсечная скважина

Рисунок 1.2 – Способ разупрочнения пород кровли передовым торпедированием

Реализация способов связана с необходимостью бурения из подготовительных выработок перед очистным забоем скважин большой длины, заряданием и инициированием зарядов ВВ большой массы (до 300 кг), что вызывает технические трудности, а также связано с достаточно высокой стоимостью работ. При этом эффективность этих способов недостаточно высокая, так как область влия-

ния скважинного заряда в условиях всестороннего сжатия ограничена несколькими его диаметрами. Применение способов ограничивается пластами не опасными по ГДЯ.

Большую эффективность имеют способы принудительного обрушения пород кровли, создающие условия для её разрушения на границе с выработанным пространством, например путем бурения, вдоль выработки в кровлю отсечных скважин (рис. 1.3) [75-79]. Однако реализация этих способов возможна только в условиях негазовых шахт и пластов не опасных по ГДЯ, что практически исключает их применение в условиях Донбасса.



1 – органная крепь; 2 – гидростойка усиления; 3 – почва выработки; 4 – отсечная скважина

Рисунок 1.3 – Способ охраны выработок отсечными скважинами

Авторы [80-83] предлагают физико-химический способ ослабления труднообрушаемой кровли, который основан на нагнетании в породный массив через скважины химических растворов, размывающих и растворяющих цементирующее вещество пород. Реализация способа требует применения специального оборудования для бурения скважин, их герметизации и нагнетания растворов. Кроме того, применение агрессивных химических веществ снижает безопасность работ, повышает риск техногенных аварий.

В Германии предложен способ разупрочнения труднообрушаемой кровли с помощью механического устройства из скважин, пробуренных с поверхности.

При подходе к пласту скважины отклоняют по напластованию пород [84]. Применение способа рационально только в условиях небольшой глубины залегания пластов.

Способы упрочнения пород по виду их воздействия на породы можно разделить на механические, физические, физико-химические.

Механические способы основаны на упрочнении пористых глинистых пород взрыванием камуфлетных зарядов. Способ пригоден для слабых сжимаемых глинистых пород, то есть в условиях не характерных для шахт Украины.

Физические способы основаны на изменении физических свойств массива. К этим способам относятся электроосмотическое упрочнение и термическое упрочнение. Электроосмотическое упрочнение основано на обезвоживании обводненных горных пород за счет уменьшения водных пленок вокруг частиц и уменьшения связи между ними. Термическое упрочнение включает электроплавление, обжиг и замораживание. Электроплавление заключается в создании вокруг выработки монолитной оболочки из расплавленных пород, нагретых при пропускании тока через электроды, установленные по контуру выработки. Этот способ применяют для укрепления плавунув. Обжиг производят путем сжигания в скважине топлива с образованием продуктов горения при температуре 700-1000 °С. При этом в скважину подают сжатый воздух, способствующий проникновению раскаленных газов в массив [85]. Способ применяется для упрочнения лессов. Замораживание основано на превращении воды, находящейся в породах в лед. Способ применим в основном в условиях слабых обводненных пород. Описанные способы могут применяться в условиях отечественных шахт исключительно при проведении стволов.

Физико-химические способы включают цементизацию, глинизацию, силикатизацию, битумизацию, электрохимическое закрепление, физико-химическое упрочнение.

Цементизация основана на нагнетании в массив скважинами цементного (цементно-песчаного, цементно-глинистого) раствора с целью создания вокруг выработки прочной оболочки. Для управления свойствами раствора в него вводят

различные пластификаторы, замедлители, ускорители и т.п. [86, 87]. Глинизация представляет собой нагнетание в пустоты тонкодисперсных глинистых растворов. Применяется в основном для повышения устойчивости карстовых пород, а также для тампонажа трещин. При нагнетании раствор заполняет трещины, а вода отфильтровывается [88]. Силикатизация заключается в нагнетании в массив однокомпонентных (например, смесь раствора силиката натрия с серной кислотой или углекислым аммонием) или двухкомпонентных (силикат натрия и хлористого кальция с образованием геля кремниевой кислоты) силикатных растворов. Применяется при значительной фильтрации в выработки газа и воды [88]. Битумизация представляет собой нагнетание битумных растворов. Область применения способа ограничивается трещиноватыми породами с размером трещин более 0,2 мм с умеренной обводненностью [88].

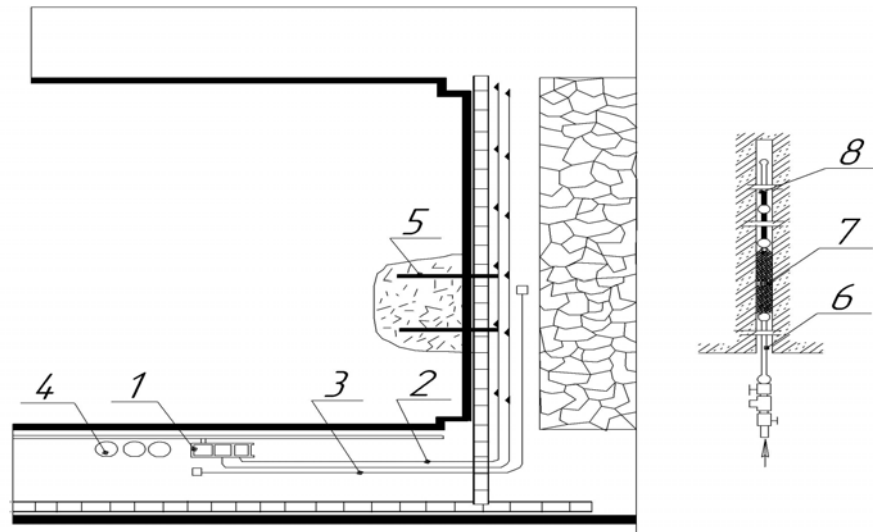
Основным недостатком способов, основанных на нагнетании различных растворов, является отсутствие возможности управления направлением упрочнения и контроля качества, что связано со случайным характером расположения трещин в массиве. Кроме этого высокая химическая активность некоторых нагнетаемых растворов требует специального режима ведения работ и приводит к повышению риска травматизма.

Для упрочнения пlyingунов применяется электрохимическое закрепление, к которому относят проводимые одновременно с проходкой выработки три процесса: электроосмос (обезвоживание и уплотнение грунтов), реакцию обмена (натрий и кальций заменяются водородом и алюминием), структурообразование (образование алюмогеля) [89]. Реализация этого способа требует применения специального оборудования, в его основе лежат сложные химические процессы, управление которыми практически невозможно, что значительно снижает область практического использования.

Наибольшее распространение получило физико-химическое упрочнение, при котором в окрестности выработки создается грузонесущая оболочка, выполняющая роль дополнительной крепи и предназначенная для защиты всей выработки или части ее контура от разрушения. Реализация этого способа производит-

ся с помощью: упрочнения нагнетанием скрепляющих составов, анкерования, набрызг-бетонирования, полимер-набрызга, упрочнения через манжетные колоны.

В качестве скрепляющих растворов применяют карбамидные, фенолформальдегидные, пенополиуретановые, магнезиальные, минерально-органические, эпоксидные, полимерные и др. При нагнетании вяжущих используют однокомпонентные и двухкомпонентные растворы, нагнетание которых производится через скважины с помощью специальных насосных установок (рис. 1.4). Отдельно следует выделить вспенивающие составы для заполнения пустот, возведения изоляционных перемычек.



1 – нагнетательная установка; 2 – высоконапорная магистраль; 3 – сжатый воздух; 4 – емкости со скрепляющим составом; 5 – скважина; 6 – загрузочная трубка со статическим смесителем; 7 – герметизатор; 8 – распределительная трубка

Рисунок 1.4 – Схема расстановки оборудования и расположения скважин при упрочнении кровли очистного забоя

Основным недостатком нагнетания скрепляющих растворов является отсутствие возможности укрепления строго в требуемой области. Нагнетание растворов производится в достаточно широком диапазоне от заданного направления, что связано с различной проницаемостью участков массива. Возможны случаи

укрепления части пород, подлежащих последующей выемке, что создает дополнительные трудности при дальнейшей эксплуатации.

Анкерование представляет собой укрепление массива металлическими, деревянными, стеклопластиковыми и др. стержнями, которые закрепляются с помощью вяжущих, как правило, полимерных, составов или механическим способом. Наибольшее распространение в последнее время получили армополимерные анкерные крепи, закрепляемые по всей длине шнура и создающие вокруг выработки упрочненный каркас [90, 91, 92].

Применение анкерной крепи в настоящее время ограничивается ненарушенными породами не ниже средней устойчивости. Высокая эффективность анкерования может быть достигнута при условии возведения крепи сразу в забое проведения и длине анкерных стержней более размера ЗРП вокруг выработок. Как правило, в условиях выработок, попадающих в зону повышенного горного давления, анкерная крепь, как самостоятельный вид крепи, не применяется, а выполняет функцию усиления основного крепления.

Набрызг-бетонирование и полимер-набрызг основаны на принципе послойного напыления скрепляющего состава на обнаженную поверхность пород для предотвращения их обрушения [89]. Высокую эффективность набрызг показал как временное крепление, так как при развитии вокруг выработки зоны разрушенных пород нагрузка на созданную набрызгом оболочку существенно превышает прочность последней, что не позволяет обеспечить устойчивость выработки.

Упрочнение через манжетные колоны представляет собой пропитку массива через систему длинных скважин, оборудованных длинными сборными трубчатými колонами. Трубы перфорированы по всей длине, а снаружи закрыты манжетами (как правило, из пористой резины) [89]. Способ имеет достаточно узкую и специфическую область применения, технически сложно реализуем, что ограничивает его практическое использование.

Таким образом, анализ показывает, что существующие способы управления состоянием массива горных пород и обеспечения устойчивости горных выра-

боток не позволяют создать условия для безопасного и безремонтного ведения работ в современной горно-геологической обстановке. Особенно это касается выработок, эксплуатируемых в сложных условиях: вблизи геологических нарушений, зонах повышенного горного давления, зонах влияния очистного забоя, поддерживаемых за лавой. Применение ряда способов существенно ограничивается высокой газообильностью и опасностью ГДЯ, характерных для угольных пластов Донбасса. В этих условиях НРС могут обеспечить необходимый ресурс управления состоянием породного массива. Поэтому актуальна разработка на их основе концептуальных решений и новых путей управления НДС пород для обеспечения устойчивости горных выработок.

1.4 Анализ современных представлений о разрушении горных пород

Одной из основных задач механики деформируемого твердого тела является оценка прочности реальных материалов и элементов конструкций при их эксплуатации. Вопросы прочности и разрушения твердых тел изучаются специалистами разных направлений: теоретиками в области физики твердого тела, физиками-экспериментаторами, металлургами и инженерами. Проблема прочности тесно связана с разрушением твердых тел, в современной физике существует отдельное направление – механика разрушения [93]. Горные породы являются классическими твердыми телами с дефектами, поэтому к ним вполне применимы основные положения механики разрушения.

Развитию представлений о механизме разрушения посвящены работы А. Гриффитса [94, 95], Е. Орована [96, 97], Г.И. Баренблатта [98], Д. Броека [99], С.Н. Журкова [100–102], Дж. Ирвина [103], А.А. Каминского [104], М.Я. Леонова [105], В.В. Новожилова [106, 107], В.В. Панасюка [108], В.З. Партона [109, 110], Ю.Н. Работнова [111] и др. Существенный вклад в исследование механики разрушения горных пород внесли А.Д. Алексеев [112–114], А.Ф. Булат [116, 117], В.В. Виноградов [118], Г.Г. Литвинский [119], А.Г. Протосеня, В.Н. Ревва, Н.А. Рязанцев [113, 114], К.К. Софийский [115], А.И. Ставрогин [93], Г.П. Стари-

ков [120, 121], С.А. Христианович [122], Г.П. Черепанов [123, 124] и др.

Можно выделить следующие основные подходы и критерии разрушения материалов: критерий предельных напряжений, деформационный критерий, кинетический критерий, энергетический подход.

Первые два критерия основаны на широко известных классических теориях прочности, рассматривающих изотропные материалы с одинаковыми пределами прочности на растяжение и сжатие, (теории наибольших нормальных напряжений, удлинений, касательных напряжений, теория энергии формоизменения), теории Кулона-Мора, а также различные варианты новейших энергетических теорий (критерии Ю.И. Ягна, П.П. Баландина, К.В. Захарова и др.).

Известно, что теоретическая прочность твердых тел, рассчитанная по той или иной атомистической модели (критерий предельных напряжений и деформационный критерий), превосходит реальную прочность [109, 111]. Иногда оказывается, что техническая прочность в десятки и даже сотни раз меньше теоретической. Объяснение этому впервые было дано в 1920 г академиком А.Ф. Иоффе [125]. Испытывая два кристалла поваренной соли, один из которых выдерживался некоторое время в горячей воде, он обнаружил, что прочность кристалла находящегося в воздушной среде равнялась нескольким МПа, а выдержанного в воде – около 2000 МПа, что лишь в два раза меньше теоретического значения прочности для поваренной соли. Такое существенное различие в экспериментальных прочностях объясняется тем, что первый образец имел большое количество поверхностных дефектов, второй же образец, лишившись поверхностного слоя, освободился от них.

Известно, что разрушение не происходит мгновенно, а является процессом, протекающим во времени, и состоит из нескольких одновременно протекающих стадий: зарождение локальных зон разрушения; слияния (зарождения) зон разрушения; слияния зон разрушения в магистральную трещину, что подтверждается работами, проведенными на металлах [99, 126, 127], стекле [110, 127], керамиках [99, 126], горных породах [128, 129]. При разрушении стекла об-

наружено [99], что предельные усилия разрушения образца во много раз превышают усилия необходимые для возникновения трещины [108].

Образованию и росту трещин, как основного фактора начала разрушения горных пород, много внимания уделено в работах академика С.Н. Журкова и его сотрудников [100–102]. Разрушение в них представляется процессом неравновесным и в большинстве случаев нестационарным, это – кинетический подход. Последователями этого направления были разработаны новые теории и критерии длительной прочности – теория длительной прочности А.А. Ильюшина [162], флуктуационно-временная теория прочности С.Н. Журкова [101], критерии В.В. Новожилова [106, 107], Ю.Н. Работнова [111]. Разрушение в этом случае представляет собой необратимый кинетический процесс накопления внутренней повреждаемости материала, ускоряемый температурой. Кинетическая теория прочности подчеркивает необходимость учета влияния теплового движения (флуктуации тепловой энергии) на процессы деформирования и разрушения, особенно в их начальной стадии. Для объяснения явления статической усталости предложен ряд теорий, основанных на концепции накопления повреждений в объеме материала и учитывающих изменение во времени напряженного состояния в теле. Введение понятия «накопление повреждений» относится к 20-м гг. прошлого столетия, когда оно было предложено Палмгреном. В дальнейшем этот подход получил развитие в исследованиях Майнера, Бейли, Робенсона, С.Н. Журкова, Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова и др. По кинетической теории прочности процесс разрушения при нагрузках ниже критической не может происходить при отсутствии теплового движения атомов и молекул, которое является фактором, принципиально обуславливающим разрыв материала при нагрузках меньших критической. На современном этапе развития кинетическая теория прочности хотя и объясняет физику процессов, лежащих в основе разрушения твёрдых тел, не может быть использована для количественных расчётов. Она разработана для случая одноосного растяжения, в то время как породный массив в окрестности горных выработок находится в условиях сложного напряжённого состояния.

Основоположником энергетической теории разрушения является А. Гриффитс, который впервые объяснил несоответствие между теоретической прочностью межатомных связей и экспериментальной прочностью наличием мелких трещин в однородном материале, которые приводят к большой концентрации напряжений в упругом состоянии. Появившиеся в 1921 и 1924 гг. работы Гриффитса [94, 95] по теории трещин считаются основополагающими в области теоретических исследований механики разрушения. Развитием энергетического подхода Гриффитса являются работы Дж. Ирвина, Е. Орована, Д. Райса, Я.Б. Фридмана, Г.И. Баренбланта, Д.С. Дагдейла, А.А. Уэллса, В.Э. Партона, А. Эванса, Г.П. Черепанова, М.Я. Леонова, В.В. Панасюка и др.

Гриффитс ввел понятие поверхностной энергии разрушения, пропорциональной площади вновь образовавшихся поверхностей, и решал вопрос о распространении трещины, полагая, что трещина будет расти лишь в том случае, если освобождаемая при этом энергия достаточна для обеспечения всех затрат энергии, связанных с этим ростом. Математически это условие можно записать в виде

$$\frac{\partial W}{\partial l} = \frac{\delta \Gamma}{\delta S},$$

где W – энергия упругих деформаций, обусловленная раскрытием трещины длины $2l$ при воздействии на тело внешних нагрузок;

$\delta \Gamma$ – работа разрушения, необходимая для образования новой поверхности разрыва площадью δS .

Гриффитс вывел свое уравнение для стекла – очень хрупкого материала. Он предполагал, что энергия, расходуемая на распространение трещины, определяется только поверхностной энергией. В то время как в вязких материалах, при вершине трещины образуются пластические деформации. Для образования новой зоны пластических деформаций при вершине трещины необходима большая энергия.

Е.О. Орован [96, 97] предположил, что если линейные размеры зоны пла-

стической деформации малы по сравнению с размером трещины, то можно пользоваться критерием Гриффитса, но при этом затраты энергии на разрушение необходимо относить к работе пластической деформации. Таким образом, энергетический критерий был обобщен на случай квазихрупких тел.

Поскольку пластическая зона должна быть образована в процессе роста трещины, то энергию, необходимую для распространения трещины, считают равной энергии, необходимой для образования этой трещины. Это означает, что в телах, склонных к пластическому деформированию, величина $\frac{\partial W}{\partial l}$ определяется главным образом энергией деформации в пластической зоне; поверхностная энергия в этом случае настолько мала, что ею пренебрегают. Исходя из этих соображений, американский ученый Дж. Ирвин [103], развивая идею Гриффитса, предложил величину

$$G = \frac{\partial U}{\partial l} = \frac{\sigma^2 \pi l}{E}$$

назвать силой, необходимой для распространения трещины на 1 см. Если сила распространения трещины G превысит критическое значение G_k , то трещина будет распространяться самопроизвольно. Таким образом, критерием разрушения является

$$G > G_k.$$

Величина G достигает своего критического значения при критическом значении $\sigma_k^2 l$, т.е. опасность разрушения определяется величиной $\sigma_k^2 l$. Если в это произведение включить π , то получим ту же зависимость, которая в свое время была получена Гриффитсом:

$$K_{Ic} = \sigma_k \sqrt{\pi l_k}.$$

Таким образом, был получен локальный силовой критерий Ирвина. Предельное значение коэффициента интенсивности напряжений K в рассматривае-

мой точке контура трещины в момент локального разрушения Ирвин обозначил через K_c и назвал коэффициентом вязкости разрушения, являющимся постоянной материала (характеристикой его трещиностойкости).

Для трещин основных типов критерий локального разрушения принимает следующий вид:

нормальный разрыв

$$K_I = K_{Ic}; K_{II} = K_{III} = 0;$$

поперечный сдвиг

$$K_{II} = K_{IIc}; K_I = K_{III} = 0;$$

продольный сдвиг

$$K_{III} = K_{IIIc}; K_I = K_{II} = 0,$$

где K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} – некоторые постоянные материала, характеризующие статическую вязкость разрушения.

Работы Г.И. Баренблатта, Дж. Ирвина, Дж. Строули, У. Брауна, Д. Броека и др. [98, 99, 103, 126, 128] показали, что критический коэффициент интенсивности напряжений обусловлен структурой и текстурой горной породы, ее состоянием и не зависит от величины и характера приложенных нагрузок.

В настоящее время теория Гриффитса-Ирвина является основой для всех расчетов на трещиностойкость в инженерном деле, она достаточно удовлетворительно согласуется с данными практики в условиях квазистатического нагружения. Для определения характеристик трещиностойкости существуют нормативные документы [132, 133].

Развитием классической однофазной модели Гриффитса-Ирвина стали двух- и трехфазные модели разрушения, согласно которым разрушение элемента среды состоит из двух или трех последовательных фаз – перехода в некоторое промежуточное состояние (предразрушение) и непосредственно разрушения. Одним из наиболее известных представителей этой группы является двухфазовая

модель Леонова-Панасюка [105, 108]. Суть этой модели состоит в том, что перед концом трещины вводится зона ослабленных связей, представляющая собой разрез, на берегах которого приложены самоуравновешенные сжимающие напряжения, равные пределу хрупкой прочности σ_0 . Предполагается, что растягивающие напряжения в теле не превосходят предела хрупкой прочности. Берега трещины взаимодействуют только в том случае, когда их раскрытие меньше некоторой константы материала δ_k . Таким образом, нормальное раскрытие берегов $\delta(x)$ в зоне ослабленных связей меньше δ_k , а для трещины разрушения $\delta(x) \geq \delta_k$. В качестве критерия разрушения применяется критерий раскрытия трещины (КРТ). Эта модель требует экспериментального определения двух параметров σ_0 и δ_k .

Близкую модель предложили Дагдейл и М.Я Леонов [134, 135]. В этой модели область ослабленных связей трактуется как вырожденная узкая пластическая зона. Все соотношения этой модели получаются из предыдущей заменой предела хрупкой прочности на предел текучести.

Одним из наиболее распространенных критериев разрушения, наряду с энергетическим, силовым и КРТ является критерий, основанный на инвариантности J -интеграла Черепанова-Райса [124]. В случае упругопластических тел регулярные части компонентов тензора напряжений около вершины трещины существенно влияют на формирование зоны предразрушения около контура трещины, и соответственно на процесс локального разрушения. Это не учитывается в большинстве известных моделей локального разрушения квазихрупких тел, в которых локальные свойства материала оказывать сопротивление распространению в нем трещин определяют только коэффициенты при сингулярной части компонентов тензора напряжений около вершины трещины. Для соответствующего случая, Черепановым и Райсом независимо друг от друга была предложена концепция инвариантного J -интеграла:

$$J = \int_C W dy - p_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds,$$

где W – плотность энергии деформации;

C – произвольный замкнутый контур, внутри которого должна располагаться вершина трещины, ориентированной вдоль оси x ;

p_i - силы, действующие на контуре C , заменяя действие отброшенной части тела;

u_i - компоненты вектора перемещений.

Трещина начинает распространяться, когда инвариантный J -интеграл достигает предельного значения J_{Ic} :

$$J \leq J_{Ic}.$$

В случае идеально хрупкого разрушения величина J представляет собой поток упругой энергии в вершину трещины и, следовательно, $J_{Ic} = G_{Ic}$ и

$$(1 - \nu^2) K_{Ic}^2 = E J_{Ic}.$$

J -интеграл не зависит от контура интегрирования, что означает также инвариантность при переходе от образца к изделию. Иными словами, критическое значение J -интеграла, определённое на образце, считается таковым же и для рассматриваемой детали.

Современные многофазные модели – это модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ), дилатантно-диффузионная, консолидации, неустойчивости скольжения и фазовых превращений.

В модели ЛНТ [136] последовательность развития процесса разрушения состоит из трех стадий: постепенное накопление количества трещин в определенном объеме под действием медленно возрастающих тектонических напряжений; резкое возрастание количества трещин за счет перехода на другой иерархический уровень при достижении критического для данного объема количества трещин; неустойчивые деформации, которые локализуются в узкой области. В дилатантно-диффузионной модели процесс разрушения также подразделяется на три стадии: постепенное увеличение тектонического напряжения в определенном объеме водонасыщенной горной породы; возникновение открытых (дилатантных) тре-

щин, когда уровень напряжений достигает половины прочности водонасыщенной породы; разрушение из-за постепенного уменьшения прочности породы по мере заполнения водой дилатантных трещин [136].

Процесс разрушения горных пород при любых видах разрушения происходит не мгновенно, а в период определенного времени, в течение которого система напряжений, участвующих в разрушении, изменяется в пространстве и во времени. Многообразие возникающих напряжений и их изменение в пространстве и времени не позволили пока создать обоснованную теорию, которая могла бы объяснить механизм явления и его природу и стала бы основой для инженерных расчетов.

Кроме того, в проведенных исследованиях механизм разрушения изучается применительно к однородным сплошным средам, тогда как в реальных условиях горные породы характеризуются параметрами, которые не принимаются во внимание при любых расчетах: такие как зернистость, блочность, трещиноватость, пористость, слоистость.

Различные теории прочности рассматривают процесс разрушения как разрыв межатомных и межмолекулярных связей в местах локализации структурных нарушений и других дефектов кристаллических структур. Однако из-за многокомпонентности и поликристалличности строения горных пород, местами начала разрушения и концентрации напряжения являются и сами кристаллы и трещины между ними, одновременно являясь уже зонами нарушений в горной породе. В настоящее время нет единого мнения, какие из критериев применять на практике.

Анализ работ, посвященных проблемам разрушения, показывает, что наиболее широко в инженерных расчетах применяется теория Гриффитса-Ирвина, не требующая большого количества экспериментальных данных для расчета и удовлетворительно описывающая разрушение за счет роста одиночной трещины. Это дает основания выбрать ее положения в качестве базовых для решения задач разрушения горных пород с помощью НРС.

1.5 Современные способы статического разрушения горных пород

Одним из основных процессов, сопровождающих ведение горных работ, является разрушение горных пород. Из п. 1.2 следует, что в определенных условиях при решении ряда технологических задач подземной разработки возникает необходимость разрушения горных пород без динамического воздействия на массив. Особенно остро стоит этот вопрос при крепости пород больше 6 ед. по Протодьяконову, когда нельзя применить механический способ разрушения, а использование БВР ограничено горно-геологическими или горнотехническими условиями. Кроме того, при БВР в шахтную атмосферу выбрасываются вредные вещества и соединения. По данным [137], при взрывании одного килограмма аммонита 6ЖВ выделение ядовитых газов составляет: СО – 49-57 дм³/кг, оксидов азота 1,3-1,5 дм³/кг. Приведенные выше соображения подчеркивают актуальность разработки и внедрения новых способов невзрывного разрушения горных пород.

Известны способы беспламенного взрывания [138]: кардокс, основанный на переходе жидкой углекислоты в газообразное состояние за счет теплоты, выделяемой при воспламенении горючего вещества, содержащегося в патроне с углекислотой; гидрокс, основанный на реакции вскипания смеси химических веществ, сопровождающейся выделением теплоты и газообразных водяных паров, углекислоты, азота. Патроны с жидкой углекислотой или химическим составом размещают в скважинах (шпурах) по линии отбойки.

Способы кардокс и гидрокс характеризуются низкой энергетической эффективностью, что обуславливает необходимость применения больших масс реагентов, увеличения объемов бурения шпуров и, соответственно, стоимости буровых работ. Реализация способов связана с низкой безопасностью работ, а использование химических реагентов требует специального режима безопасности работ, что ограничивает область применения способов. В результате химической реакции в атмосферу выделяются вредные газы высокой температуры, что ограничивает применение способа в подземных горных выработках.

Известен способ ведения буровзрывных работ [139], включающий размещение, герметизацию зарядов в шпурах и возбуждение в них реакции, сопровождающейся выделением газов, в качестве зарядов используют жидкие или пастообразные реагенты с бездетонационной реакцией разложения. Иницируют их разложение запалом или введением катализатора. Реализация описанного способа связана с использованием химических реагентов, которые требуют специального режима безопасности работ при их хранении и доставке к месту ведения работ. В результате химической реакции разложения в атмосферу выделяются вредные газы высокой температуры, что усложняет, а зачастую исключает реализацию способа в условиях высокой газообильности и запыленности подземных горных выработок из соображений безопасности работ. Инициирование разложения реагентов запалом исключает его применение в условиях подземных горных выработок шахт, так как огневое взрывание запрещено инструкциями по ведению горных работ и правилами безопасности.

Одним из возможных направлений решения указанных проблем взрывного и беспламенного разрушения является применение статических методов разрушения горных пород.

В настоящее время разработано множество способов невзрывного разрушения, в частности, механические методы (клиновой, гидроклиновой, алмазноканатное пиление, камнерезные буровые установки и комбайны), методы, основанные на энергии жидкости (флюидоразрыв, гидродинамический, физико-химический импульсный разрыв, гидроудар, гидрорезание), тепловые (терморезка), электрические и электромагнитные (взрывание электрических проводников, электрический пробой, тепловой пробой, токами высокой частоты, плавлением, лазерным излучением, электромагнитным излучением), комбинированные методы [140].

Механические методы основаны на воздействии на массив специальными механизмами и инструментами, приводящем к разрушению за счет пиления, откола, раскола, вырубки, обуривания и т.п.

Пиление монолитных объектов основывается на постепенном его истирании по линии направленного разрушения. Известны способы, основанные на образовании щели при помощи режущего дискового рабочего органа, алмазно-канатного пиления, камнерезных буровых установок [141]. Применение способа ограничивается породами с низкой прочностью.

Для разрушения за счет откола и раскола в разрушаемом массиве создают сжимающие и растягивающие напряжения, причем их действие может быть длительным (статическим), кратковременным (импульсно-динамическим) и прерывистым (вибрационным). При статическом способе разрушения используют клинья, гидроклинья, гидравлические скалоломы. При этом разрушение горных пород достигается за счет создания растягивающих напряжений на стенках шпура, превышающих предел прочности пород на растяжение. При ручном расклинивании в заранее пробуренные шпуры забивают металлические клинья увеличивающегося диаметра. Аналогичное воздействие на массив имеют гидроклинья, которые вызывают разрушение пород за счет повышения давления жидкости в элементах гидросистемы устройства и передачи его на раздвижные пуансоны. При этом достигаются давления от 45 МПа (установка КМ-45) до 100 МПа (установки ГРУ) [142]. Также для разрушения крепких трещиноватых пород используют гидродомкраты и гидророксплиттеры Hydro Rock Splitte – HRS 34 [143].

Применение клиновых методов требует наличия трех свободных плоскостей у разрушаемого объекта. Указанные способы разрушения по своей технологичности и экологической целесообразности получили широкое распространение на горных предприятиях небольшой производственной мощности или в районах, где затруднено энергоснабжение. Их недостатки – большое количество шпуров (шаг 150-300 мм), что снижает производительность выхода готовой продукции; сложность получения подстилающих трещин, особенно при увеличении глубины разработки; износ породоразрушающего инструмента, низкая производительность при высоких удельных энергозатратах, а также необходимость сравнительно ровных горизонтальных плоскостей.

На импульсном (динамическом) воздействии на породу основана работа камнескольных прессов [144], производительность которых увеличивается с увеличением неровностей поверхности и площади раскалывания образца. При разрушении блоков известняка и доломита применяют гидромолоты, которые наносят удары по намеченной линии откола на глубину 50-200 мм. При этом происходит образование вертикальной трещины и отделение блока от массива. Наибольшее распространение получили гидромолоты СОИ-146 на базе экскаватора ЭО-4121. Процесс разрушения горных пород ударным способом является неуправляемым, относительно дорогостоящим, требует применения обслуживания и ремонта специальной техники, имеет ограниченную область применения.

Методы, основанные на энергии жидкости, более совершенны. Они используют свойства обычных и неньютоновских жидкостей. В ИГД СО РАН разработан способ – ориентированный флюидоразрыв [145]. При его реализации на стенках шпуров с помощью щелеобразователя нарезаются иницирующие щели, после чего в шпур вставляют пакер, по которому через отверстия подают флюид под давлением 20-45 МПа. Флюид (неньютоновская жидкость) может иметь различную степень вязкости и представляет собой смесь воды и глины различной консистенции. От расширения жидкости создается высокое напряжение (до 80 МПа) на периферии щели и тем самым обеспечивается направленный гидро-разрыв массива. Достоинства способа: создание огромных растягивающих напряжений, сокращение объемов буровых работ, повышение выхода и качества готовой продукции, низкая энергоемкость разрушения, безопасность, экологическая чистота.

Физико-химический импульсный разрыв [146] основан на разрушении горных пород струей химически активной жидкости. Сверхтонкая жидкость, например, натрия, проникая в поровое пространство водосодержащего разрушаемого массива, вступает с ним в химическую реакцию, выделяя при этом энергию. В породном массиве образуются микротрещины, что приводит к его разрушению. Эффективное образование трещин разрыва в сплошных и пористых породах зависит от амплитуды и длительности импульсного нагружения. В СО АН СССР раз-

работан гидродинамический способ разрушения горных пород с помощью импульсных гидропушек [147], выстреливающих воду под большим давлением (до 800 МПа). В Швеции разработана гидропушка, которая под давлением 40 МПа выстреливает объем жидкости $1,8 \text{ дм}^3$ в пробуренные шпурсы [148]. Разрушение происходит под действием двух факторов – гидродинамического удара порцией воды и гидропульсного эффекта в результате возникающей волны в водяной среде. В России выдан патент [149] на способ безвзрывного разрушения с использованием теплой воды, помещенной в шпур. За счет короткого замыкания и возгонки графитового стержня (трубки) вода превращается в пар, создавая высокое давление, которое и приводит к разрушению пород. В МГГУ разработана [150] гидрорезная установка струями воды сверхвысокого давления (давление у сопла режущей головки 10 Па при скорости воды 300 м/с). Способ гидрорезания по сложному контуру с использованием энергии струи жидкости достигается за счет высокой скорости струи, превосходящей скорость звука в 2-3 раза, что обеспечивается высоким статическим давлением рабочей жидкости (до 350 МПа) перед водоразгоняющим соплом. Также для разрушения пород разрабатывают методы, основанные на взрывогидравлическом ударе (ВГ - эффекте) [151]. Количество энергии, получаемое при ВГ-эффекте, определяется количеством взрывчатых веществ. Водяной столб при взрыве не только не вырывается из шпура, но, принимая на себя давление, передает его на стенки шпура.

Перечисленные выше способы резко повышают производительность, улучшают и облегчают разрушение пород, но характеризуются высокой энергоемкостью, громоздкостью, высокой стоимостью, а некоторые перечисленные способы находятся на стадии допромышленной разработки.

Среди тепловых способов заслуживают внимания разработки установки УГР-1 [152] для термической резки горных пород (рабочим органом служат воздушно-реактивные горелки, а в качестве топлива используют бензин или дизельное топливо) на глубину до 0,4 м и шириной 8-15 см и газоструйные резаки (ТБ-33К и ТР-35), работающие на кислороде [153]. При их использовании глубина

щели достигает 1,3-1,8 м, а производительность за смену (6 часов) более 5 м² щели.

Терморезаки могут применяться для пород с определенной кристаллической структурой, например, гранитов и сиенитов. Для резки необходим повышенный расход горючего 10...15 кг на 1 м² разреза и подача до 8 м³ сжатого воздуха в минуту.

К электромагнитным относят следующие способы разрушения горных пород. Взрывание электрических проводников реализуется путем подачи через расположенный в шпуре с водой проводник импульса электрической энергии длительностью $10^{-4} - 10^{-5}$ с. В результате проводник превращается в плазму с температурой $10^4 - 10^5$ °С, при этом образуется ударная волна, разрушающая породу. Импульсный разряд формируется в шпуре с водой при подаче напряжения от генератора импульсов, при этом образуются волны напряжений, приводящие к разрушению пород. Электрической пробой осуществляют с помощью электрода, расположенного в шпуре, или двух электродов, расположенных на поверхности. Тепловой пробой реализуется путем подвода к породе с помощью графитовых электродов высокого напряжения (до нескольких тысяч вольт). Также в лабораторных условиях разработаны способы разрушения диэлектрическим нагревом токами высокой частоты и напряжения; токами промышленной частоты; гистерезисным нагревом в поле индуктора; плавлением; воздействием электромагнитного излучения с длиной волны 0,8-1,0 мм [154, 155]; лазерным излучением; использованием электрической дуги, создаваемой с помощью коаксиальных электродов, помещенных в шпуре [156].

Описанные выше способы разрушения обладают высокой энергоемкостью $5 \times 10^3 - 7 \times 10^4$ кВт ч/м³, характеризуются большими потерями энергии (до 80%), требуют применения громоздкого и дорогостоящего оборудования, могут применяться при небольших объемах разрушения.

Каждый из описанных способов имеет специфическую область применения, поэтому часто используют комбинированные методы. На практике нашли применение способы, предполагающие первоначальное создание щели или тре-

щины, и последующее отделение блоков механическим, как правило, с помощью гидроклиньев или физико-техническим способом. Создание щели может производиться механическим, тепловым методом или методами, основанными на энергии жидкости. Также следует отметить комбинированные способы, предполагающие предварительное изменение температуры пород с последующим их разрушением. В основе этих способов лежит известное свойство снижения прочностных характеристик горных пород. Так, например, прочность на разрыв при 600 К для образцов габбро-диорита составляет 1,5 МПа, что на порядок меньше, чем при комнатной температуре [140]. Нагревание горных пород до 1300 К связано с развитием термонапряжений, процессами испарения влаги, декрипитацией, релаксацией остаточных напряжений, полиморфными и фазовыми переходами, спеканием и выгоранием органических соединений в породах осадочного комплекса [140].

Анализ научно-технической литературы показывает, что общее количество статических способов разрушения, основанных на последних достижениях механики, химии, электротехники и других наук, непрерывно растет. Однако их широкое промышленное использование сдерживается отсутствием оборудования, низкой надежностью, высокой энергоемкостью, опасным воздействием на человека, высокой стоимостью. Многие из этих способов находятся на стадии научно-исследовательских и проектных разработок. Большинство их требует применения громоздкого и дорогостоящего оборудования, что существенно ограничивает возможность их применения в условиях подземных горных работ. Все эти недостатки вынуждают искать пути создания и совершенствования дешевых и перспективных способов разрушения прочных горных пород.

Одним из их главных конкурентов, лишенным многих перечисленных недостатков, является способ разрушения при помощи НРС. Достоинствами этой технологии является отсутствие динамического воздействия на разрушаемый объект, выделения вредных газов, звуковых и других колебаний. Для реализации способа не требуется приобретение дорогостоящего специального оборудования или устройств, способ может быть реализован вблизи транспортного и электриче-

ского оборудования, при этом исключается возможность их повреждения из-за отсутствия разлета частей разрушаемого объекта.

1.6 Современные представления о невзрывчатых разрушающих средствах горных пород

1.6.1 Природа расширения вяжущих веществ при гидратации

Невзрывчатыми разрушающими средствами называют вещества (смеси, составы, композиции), химическая реакция гидратации которых сопровождается возникновением механических напряжений во вмещающей среде без горения и детонации. Напряжения в породе появляются и развиваются вследствие расширения продукта гидратации при помещении в шпур порошка НРС, затворенного водой [157].

Усовершенствование существующих рецептур НРС невозможно без понимания природы физико-химических превращений, происходящих при гидратации и приводящих к их расширению. Изучением механизма расширения вяжущих занимались многие исследователи. В развитии представлений о механизме расширения из всех гипотез можно выделить два основных направления.

К представителям первого направления относятся В.В. Осин, Г.Н. Сиверцев, А.Е. Шейкин, П.К. Мета, В.И. Бабушкин и др. [158-163]. Они считают, что природа расширения вяжущих композиций не связана с давлением кристаллов, растущих в результате гидратации расширяющего агента.

В.В. Осин не исключает влияния кристаллизационного давления на процесс расширения, но считает кристаллизационное давление причиной второстепенного порядка [158]. Основными причинами приращения объема пор, влекущего за собой расширения системы, автор считает химическое и сорбционное связывание воды гидратирующимся материалом. С мнением В.В. Осина созвучны выводы П.К. Мета [159, 160], который обнаружил, что этtringит, образующийся в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$, является коллоидальным. Согласно выдвинутой им гипотезе расширение вяжущих систем происходит благодаря сочетанию высокой удель-

ной поверхности и специфического кристаллического строения высокосульфатного эттрингита, адсорбирующего воду. А.Е. Шейкин и Т.Ю. Якуб считают, что причиной расширения цементного камня являются осмотические силы [161]. Суть гипотезы состоит в том, что вокруг гидратирующихся зерен цемента создается полупроницаемая пленка, состоящая из кристаллов гидросульфоалюмината кальция. Осмотическое давление возникает за счет разности концентраций раствора, заключенного между зерном и пленкой, и находящегося с внешней стороны пленки.

Г.Н. Сиверцев выдвинул сольватную гипотезу расширения [162]. Эта гипотеза опирается на наличие в твердеющей системе двух антагонистических твердых фаз, например, глиноземистого и портландского цемента. Роль расширяющего компонента сводится к образованию коллоидных пленок вокруг гидратирующихся частиц цемента, что ослабляет связи между ними. При этом частицы стремятся отделиться друг от друга, что приводит к расширению бетона.

Теоретические расчеты, выполненные В.И. Бабушкиным с сотрудниками [163] показали, что электроосмотическое давление может достигать 500 ат и более. Авторы пришли к выводу, что предрасположенность к расширению определяется знаком заряда коллоидных частиц. Опытным путем установлено, что гидросиликаты кальция заряжены отрицательно ($\xi = 40 - 70$ мВ), а гидроалюминаты кальция, эттрингит, гидроксид кальция и двуводный гипс заряжены положительно ($\xi = 10 - 20$ мВ). Следовательно, образование положительно заряженных частиц вызывает расширение.

Вторая группа исследователей считает основным фактором, определяющим процесс расширения, кристаллизационное давление. К представителям этого направления относятся Лафюма Г., Лосье Г., Ямадзаки Ю., Михайлов В.В., Кравченко И.В., Будников П.Л., Кузнецова Т.В., Матэ Б., Хансен В.С., Ковано Т., Красильников К.Г. и др. [164-180].

Г. Лафюма и Г. Лосье [164] называют непременным условием расширения цементного камня образование гидросульфоалюмината кальция с поверхности алюмината. В этом случае, утверждает Г. Лафюма, идет процесс образования тонкодисперсного порошка гидросульфоалюмината, который вызывает эффект рас-

ширения. Авторы считают, что кристаллизация новообразований по сквозь растворимому механизму не вызывает расширения. В работах Ямадзаки Юкинори [165, 166] исследованы продукты гидратации в условиях внешнего ограничения оксида кальция в составе невзрывчатого разрушающего вещества. Установлено, что структура гидрата, плотно упакованная избыточным давлением, была блочной и состояла из мелких кристаллов (около 1000 Å) $\text{Ca}(\text{OH})_2$, которые не росли в большие гексагональные пластинки в течение всего периода расширения. Развитие давления при гидратации CaO в основном происходит за счет сил, возникающих при увеличении микрокристаллической каемки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вокруг CaO и увеличении пор в гидратируемых образцах. Т. Ковано, исследуя гидратацию невзрывчатого разрушающего вещества, однозначно делает вывод о том, что расширение в большей степени зависит от роста образовавшихся кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$, чем от самого образования $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при гидратации CaO [167]. По мнению И.В. Кравченко, можно достичь расширения цементного камня не только путем кристаллизации расширяющего агента в твердой фазе, но и через раствор, при условии образования достаточного количества крупных кристаллов с необходимой скоростью в нужный момент [171].

Детальные исследования процесса расширения твердеющих систем проведены К.Г. Красильниковым с сотрудниками. Ими выдвинута гипотеза локализованного кристаллизационного давления. Расширение цементного камня зависит не только от его прочности и количества образующегося этtringита, но и от механизма кристаллизации этtringита. Если этtringит выкристаллизовывается из раствора, образующиеся кристаллы занимают поры в цементном камне, тем самым, уплотняя его. Если же создать условия для топохимической реакции образования этtringита, то вокруг зерен алюмината кальция будет образовываться пленка, состоящая из тонкодисперсных кристаллов этtringита, которая по мере утолщения оказывает локализованное давление на окружающие структурные элементы системы. Именно локализованное давление вызывает расширение цементного камня. При исследовании расширения на основе оксида кальция исследователи установили, что твердофазовая реакция гидратации CaO сопровождается

образованием округлых чешуйчатых скоплений гидроксида кальция, сосредоточенных преимущественно на поверхности исходных зерен СаО [176-180].

Основным действующим веществом современных НРС является оксид кальция. Одним из первых гидратацию оксида кальция детально исследовал В.В. Осин [158]. Отдельные этапы гидратации им изложены в следующем порядке.

На поверхности зерен СаО протекает реакция с образованием Са(ОН)₂. Гидроксид кальция растворяется, расщепляясь на ионы Са²⁺ и ОН⁻ до тех пор, пока жидкость не превратится в насыщенный раствор. Насыщение раствора определяет завершение первого этапа гидратации СаО. На втором этапе образуются чрезвычайно мелкие частицы гидроксида кальция путем непосредственного присоединения воды к зернам оксида кальция. При этом получается коллоидная система со структурой гелия или студня, подобно тому, что происходит при твердении гипса по В.А. Байкову. Высокая удельная поверхность новообразований требует для смачивания большого количества свободной воды, что вызывает загустение массы в период коллоидизации.

Следующий этап гидратации оксида кальция назван «периодом коагуляции». Коагуляция вызвана оттоком воды из коллоидной массы на гидратацию сердцевин зерен СаО с образованием новых коллоидных масс, вследствие чего идет процесс уплотнения, т.е. сближения твердых мельчайших частиц Са(ОН)₂ друг с другом и уменьшения толщины водных прослоек, расположенных в зазорах между отдельными коллоидными частицами гидроксида кальция. Затвердевание массы вызывает сцепление и переплетение кристаллов гидроксида кальция, происходящие в процессе перекристаллизации тонкодисперсных фракций. Период перекристаллизации может протекать уже после гидратации. Теории гидратации извести, представленная П.А. Ребиндером с сотрудниками, отличается от вышеописанной лишь частностями (например, в терминологии) [181].

Огороков С.Д. [182] предложил свое объяснение механизма гидратации извести. Неустойчивость кристаллической решетки СаО и клинкерных минералов автор объясняет пониженной координацией катионов кальция (4 или 6 вместо 8

или 12). В этой связи решетка стремится к перегруппировке, которую можно рассматривать как полиморфизм (гомо- или гетерогенный). При гомогенном полиморфном переходе перестройка решетки происходит одновременно по всему объему, а при гетерогенном – с поверхности, продвигаясь вглубь кристалла. Автор проводит аналогии между гетерогенным полиморфизмом и гидратацией. При гашении извести переход вещества из одного кристаллического состояния в другое (от кубической решетки СаО к гексагональной слоистой решетке Са(ОН)₂) осуществляется без промежуточного растворения вещества путем перегруппировки атомов Са, О-й групп ОН⁻ в пространстве. Описанный процесс вызывает появление новообразований в кристаллическом состоянии. Однако, получающиеся при этом частицы первоначально настолько мелкие, что их с достаточным основанием можно назвать коллоидами. «Осыпаясь» с зерен СаО, частицы «падают» в окружающую зерна воду и образуют, как это было показано П.А. Ребиндером, коагуляционную структуру, приводящую к схватыванию.

Таким образом, существующие представления о механизме расширения извести при гидратации весьма противоречивы. Нет однозначного мнения о том, как связаны между собой эти процессы. Очевидно, что для поиска путей управления скоростью гидратации и создания такого режима гидратации оксида кальция, который позволит развить максимальное расширение, необходимы исследования кинетики гидратационного твердения НРС.

1.6.2 Технология производства и рецептура невзрывчатых разрушающих смесей

В большинстве современных НРС основным рабочим веществом является оксид кальция, гидратация которого сопровождается увеличением объема. Поэтому при помещении НРС в закрытую полость на стенки последней оказывается давление от расширения смеси.

Попытки использования в НРС реакции образования брусита или эттрингита [167, 183 – 190] не увенчались успехом. Это обусловлено недостаточно вы-

соким давлением расширения, развиваемым гидратирующим вяжущим веществом при образовании гидросульфатоалюмината кальция [191]. Материалы на основе оксида магния не получили распространения, так как работают слишком медленно.

Процесс производства НРС состоит из добычи материалов (известняки, доломиты и др.), приготовления сырьевой смеси (дробление, помол и усреднение состава), обжига смеси (получение гранул оксида кальция), помола клинкера.

При производстве НРС применяются природные материалы, содержащие, в основном, углекислый кальций (известняки, доломиты, известняковый туф, мел и т.д.), относящиеся к осадочным породам. В качестве добавок для повышения содержания в НРС оксида кальция применяют природный двухводный гипс, а также отходы промышленности, состоящие из двухводного гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) или их безводного сернокислого кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) или их смеси – фосфогипс, борогипс, фторогипс и др. В доломитизированных известняках в качестве примеси присутствует доломит ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$).

Реакция гидратации оксида кальция является экзотермической и протекает бурно, что не позволяет приготовить рабочую смесь, поместить ее в шпур и добиться стабильного протекания реакции в шпуре для получения заданного результата. Поэтому для использования оксида кальция в составе НРС необходимо обеспечить замедление реакции гидратации при затворении НРС водой. Это достигается путем пассивации.

Пассивация может проводиться разными способами.

Первая группа способов основана на совместном обжиге сырьевого материала (известняка, доломита) со специальными добавками при температуре, превышающей температуру декарбонатизации известняка ($1200 \dots 1500$ °С). В качестве добавок применяются силикаты (CSr , CS), алюминаты (CR_1 , C_1A , CA , CA_4 , CA_5 , $\text{C}_{11}\text{A}_1 - \text{CaF}_2$; $\text{C}_3\text{A}_3 - \text{CaF}_2$), ферриты и алюмоферриты (CF , CF_7 , C_4AF), а также сульфат, сульфатоалюминат и сульфоферрит кальция (CaSO_4 , $\text{Ca}_4\text{B}_6\text{SO}_{10}$, $\text{Ca}_4\text{Fe}_6\text{SO}_{16}$). [185, 192 – 201]. Эффект пассивации достигается за счет заключения кристаллов оксида кальция в кристаллы или твердый раствор фаз перечисленных выше добавок. В процессе твердения НРС, гидратация оксида кальция лимитиру-

ется скоростью гидратации фазы, в которой распространены кристаллы оксида кальция.

Вторая группа способов включают высокотемпературный (1300 – 1550 °С) обжиг известняка [202-207]. При такой температуре происходит рекристаллизация оксида кальция: чем крупнее и правильнее его кристаллы, тем медленнее известь реагирует с водой, тем меньше пористость и ниже водопотребность при затворении [208-210]. Для упрощения технологии производства и снижения температуры обжига при спекании извести вводят соответствующие добавки, например, оксид меди [211-213], фторид кальция [214-217].

Отдельная группа исследований посвящена получению НРС из выпускаемой промышленностью негашеной извести. Для получения НРС негашеную известь подвергают специальной обработке, которая может включать:

- нанесение покрытия на поверхность частиц СаО, предотвращающего активное взаимодействие оксида кальция с водой. В качестве покрытия используют серу [218], оксихлорид кальция, образующийся при обработке частиц СаО хлоридом кальция [219], карбонат и гидроксид кальция – продукты обработки извести углекислым газом или парами воды [220-223];

- грануляцию или прессование негашеной извести, причем, как указывается в [154], химическую активность извести можно регулировать давлением прессования [199, 203, 224-227];

- введение многокомпонентного комплекса минеральных и органических добавок, в числе которых используются гидравлические цементы, специально синтезированные клинкерные фазы (например, твердый раствор алюминатов кальция получают обжигом при температуре 1300...1600 °С с последующим резким охлаждением и дроблением). Ускорители и замедлители твердения, пластификаторы, воздухововлекающие, водопоглощающие (водоудерживающие) добавки, замедлители схватывания, загустители [186, 187, 212, 221, 228, 229, 230-235].

Научные работы с НРС были начаты в Японии, где в 80 – х годах прошлого столетия разработали и запатентовали первые составы [186, 190, 232]. Примерно в это же время исследования НРС проводились в бывшем СССР, в результате

под руководством Л.Г. Шпыновой были получены первые отечественные патенты [235- 237]. НРС, разработанные учеными Львовского политехнического института под руководством Л.Г. Шпыновой, в течение суток достигали давления расширения 37,5 МПа [228].

Коммунарским горно-металлургическим институтом [238] предложен состав, состоящий на 96%-ного оксида кальция с пористостью близкой к нулю. В качестве добавок использованы карбонат натрия и борная кислота. Давление, развиваемое предложенным составом при нормальной температуре, достигало 40 МПа. Исследователями НИИЦемент, РХТУ и НИИЖБа предложены невзрывчатые разрушающие материалы, лучший из которых развивает давление расширения 39 МПа в течение 14 часов [183, 191, 192]. В Киевском политехническом институте совместно с РХТУ им. Д.И. Менделеева и НИИЦементом создан безвзрывной разрушающий материал «Бризан», содержащий, масс. %: известковый клинкер состава CaO , Ca_2SO_4 и др. с размерами зерен кристаллов 80 – 200 мкм – 89, 09 – 94, 995; ускоритель твердения (обожженная глина или шамотная пыль) – 5 – 10; пластификатор ГКЖ-94 (этилсиликонат или метилсиликонат) и СДБ (спиртово-дрожжевая барда) – остальное. Состав развивает давление до 47 МПа [193-195].

Первым промышленностью бывшего СССР начал выпускаться состав НРС-1, разработанный Государственным Всесоюзным научно-исследовательским институтом строительных и стеновых конструкций им. П.П. Будникова [239]. Сырьевая смесь разрушающего состава включала следующие компоненты, масс. %: фосфогипс – 9 – 15, диоксид кремния (SiO_2) – 2-4 и известняк – остальное. Давление расширения промышленно выпускаемого «НРС-1» достигало 50 МПа.

Ю.А. Грамовским и др. [240] разработан невзрывчатый разрушающий состав быстрого действия, включающий борную кислоту (0,1 – 2,5%), клей «Декстрин» (0,1 – 10,0%) и алюминиевую пудру (0,5 – 5,0%). Данный состав обеспечивал повышение давления на стенки шпура и сокращает сроки гидратации. Похожий состав предложен объединением «Монолит» [241]: в готовый НРС добавляли

алюминиевую пудру (ПАП - 1) и гидролизный крахмал $(C_6H_{10}O_5)_n$ от 0,5 до 4,5 – 10,0% каждого.

Разработкой невзрывных композиций и смесей занимались ученые Германии, Великобритании, США, Канады и др. В настоящее время существует более 100 различных НРС. Наибольшую мировую известность получили материалы японских компаний Онода Симент Ко ЛТД (Бристар), Сумитомо Симент Ко ЛТД (С-Майт), Ниппон Симент Ко (Хемибрейкер), Китатаку ваккай коге (Супуритта). Эти производители гарантируют развитие давления расширения выпускаемыми ими средствами статистического разрушения 30 МПа в течение 24 часов. Материал «Кумумайто» совместного производства фирм Ниппон симент Ко, Ниппон юн и Хон гикэй когэ развивает 50 МПа за то же время [165].

НРС, разработанные в странах Европы, отличаются относительно невысоким давлением расширения. Так материал, выполненный по патенту ГДР [242], развивает давление расширения через 4, 12 и 20 часов соответственно 7,5; 16,5; 22,5 МПа. В Чехословакии разработано три состава невзрывчатых композиций. Основной составляющей является оксид кальция (СаО) (по массе) – 94 – 99%, который в комбинации с водной суспензией полугидрата сульфата кальция $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ ускоряет процесс гидратации [243, 244]. В Испании [245] прошел испытания и внедрен в производство специальный расширяющийся цемент для разрушения пород для условий городской застройки, который при гидратации с водой развивает давление до 30 МПа.

В настоящее время украинская промышленность выпускает состав НРВ-80 [246], который представляет собой измельченный продукт обжига карбонатных пород, снабженный специальными добавками. Это порошкообразный материал светло-серого цвета, пылящий, негорючий и невзрывоопасный, обладающий щелочными свойствами. По данным авторов [247] давление расширения, развиваемое НРВ-80 при температуре окружающей среды 25-35 °С через 24 часа после затворения достигает 153 МПа.

Несмотря на заманчивые перспективы, практическое применение НРС ограничивается разрушением несущих элементов и фундаментов при демонтаже

зданий, дроблением негабаритных блоков при добыче полезных ископаемых открытым способом. Это можно объяснить высокой чувствительностью разрушающих составов к температурному режиму, точности соблюдения водопорошкового отношения при затворении, а самое главное длительным, по сравнению с взрывным способом, временем разрушения. Анализ известных НРС показал, что основными недостатками последних являются: высокая температура обжига, многокомпонентность, использование в качестве добавок редких и дорогостоящих веществ. Большинство разработок характеризует невысокое давление расширения, недостаточная скорость его развития, сложность управления скоростью гидратации.

В настоящее время разработано большое количество различных составов НРС, однако основное внимание исследователи обращали на снижение эффективности их работы в условиях низких положительных и отрицательных температур. Более актуально, в свете данной работы, изучение особенностей гидратационного твердения и расширения НРС в температурных полях свойственных породам, вмещающим подземные горные выработки. Поэтому поиск решений, направленных на расширение области применения НРС, в частности использование их в условиях подземных горных выработок, управление скоростью гидратации, разработка модифицированных НРС и исследование их физико-механических свойств являются важными и актуальными задачами современного горного производства.

1.7 Методики расчета параметров разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями

Первая отечественная методика расчета параметров невзрывного разрушения была предложена ВНИИСТРОМ им. Будникова [248]. Согласно этой методике шаг шпуров в рядах и между рядами при разрушении каменных горных пород рекомендуется определять по формуле

$$B = 100 \frac{d}{\sigma_{\text{взр}}}, \text{ см,}$$

где d – диаметр шпура, см;

$\sigma_{\text{взр}}$ – предел прочности при разрыве горной породы, МПа.

Предложенная методика является сугубо эмпирической, не учитывает ни свойств НРС, ни свойств горных пород, поэтому не позволяет выбрать оптимальные параметры разрушения. При расчете для реальных условий дает заниженные в 3-5 раз значения расстояний между шпурами.

В работе [249] предложена волновая теория распространения и интерференции волн напряжений от заряда НРС. С позиций волновой теории взрыва, принимая аналогичность процесса разрушения НРС и ВВ, автор утверждает, что если суммарное напряжение основного гармонического пакета в точке суперпозиции превосходит предел прочности на растяжение и давление от заряда НРС, то трещина возникает в середине длины между двумя шпурами. Такой подход не подтверждается результатами практики. Во-первых, так как механизм взрывного и квазистатического разрушения отличаются. Во-вторых, анализ процесса разрушения показывает, что разрушение начинается всегда от стенок шпура и распространяется вглубь массива.

Большинство предлагаемых методик определения параметров буровых работ при разрушении горных пород с помощью НРС [250, 251], как правило, основываются на классическом решении задачи Лямэ о осесимметричном нагружении толстостенного цилиндра [252]; при этом основным параметром является расстояние между шпурами.

Рассматривается задача нагружения упругого цилиндра, имеющего наружный радиус R_r , давлением P_p , приложенным по его внутренней полости радиусом R_p . Учет граничных условий и использование обобщенного закона Гука позволяют получить зависимость радиальных σ_r и тангенциальных σ_θ напряжений от величины R :

$$\sigma_{r(\theta)} = \frac{P_p R_p^2}{R_r^2 - R_p^2} \left(1 \pm \frac{R_r^2}{R^2} \right), \text{ МПа.}$$

Принимая ту или иную феноменологическую теорию прочности, сравнивают полученные напряжения с критическими для данного материала, откуда и определяют расстояние между шпурами a . Например, при принятии первой теории прочности:

$$a = 2 \sqrt{\frac{P_p R_p^2}{|\sigma_p|}}, \text{ м,}$$

где $|\sigma_p|$ – предел прочности материала на одноосное растяжение, МПа.

На основе второй теории прочности [251]:

$$l_{unn} = 2 \cdot r_{unn} \cdot \sqrt{2(1 + \mu) \frac{p}{\delta_p}}, \text{ м,}$$

где $l_{unn} = a_{unn} + 2 \cdot r_{unn}$ – расстояние между осями шпуров, м;

μ – коэффициент Пуассона.

Предлагаемое решение не в полной мере учитывает физико-механические свойства горных пород, а также температуру окружающей среды. Это не позволяет оптимизировать параметры разрушения, что вызывает повышение трудоемкости работ, объема бурения и, соответственно, стоимости разрушения.

Авторами [253] предложен способ раскалывания каменных материалов НРС. Физическое обоснование предлагаемого способа также основано на решении задачи сопромата о осесимметричном нагружении толстостенного цилиндра внутренним давлением. Однако предлагаемая формула для расчета содержит ряд коэффициентов, позволяющих корректировать параметры разрушения в широком диапазоне условий. Расстояние между шпурами в ряду определяют по формуле:

$$a = cK_L \sqrt{\frac{PK_r K_d}{[\sigma]_p}}, \text{ м,}$$

где c – коэффициент, учитывающий тип раскалываемого материала - бетон или скальная порода;

K_L – коэффициент, учитывающий относительную (в диаметрах) длину шпуров;

d – диаметр шпура, м;

P – развиваемое НРС напряжение в стенках шпура при стандартизованных условиях, МПа;

K_T – коэффициент, учитывающий температуру раскалываемого материала;

K_d – коэффициент, учитывающий диаметр шпуров;

$[\sigma]_p$ – прочность материала на растяжение, МПа.

Описанный выше подход хоть и обладает достоинствами перед предложенным ВНИИСТРОМ им. Будникова, поскольку основан на упругой физической модели, однако дает заниженные в 2 – 4 раза, по сравнению с данными практики, значения минимально необходимого расстояния между шпурами. Это объясняется широко известным фактом, что теоретическая прочность твердых тел, рассчитанная по той или иной атомистической модели, превосходит реальную прочность.

Таким образом, существующие методики расчета параметров разрушения с помощью НРС не учитывают механизм разрушения, жесткость системы «НРС-массив», определяющую допустимые объемные деформации НРС и динамику роста давления расширения, содержат эмпирические коэффициенты, не учитывают реальное поле напряжений в горном массиве. Поэтому их использование при расчете параметров разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок дает существенные погрешности. Разработка инженерного метода расчета основных технологических параметров разрушения горных пород с помощью НРС должна основываться на закономерностях процесса управляемого разрушения прочных горных пород статическими нагрузками в различных полях напряжений.

Структурно-логическая схема исследования приведена на рисунке 1.5.

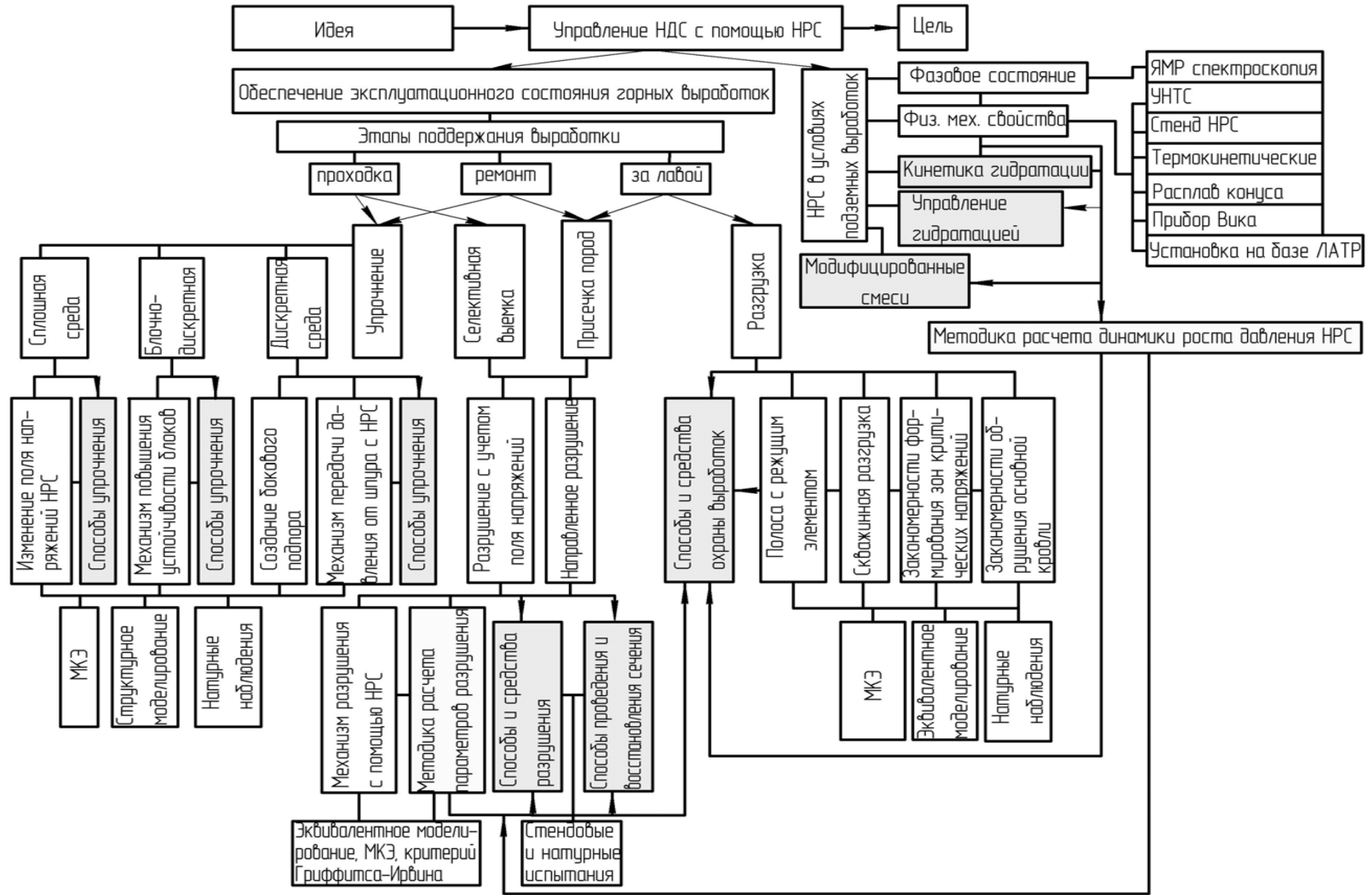


Рисунок 1.5 – Структурно-логическая схема выполнения исследования

1.8 Цель и задачи исследований

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является создание научных основ управления состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями с учетом закономерностей формирования переходных процессов в этих смесях и эффекта статического воздействия во времени на горный массив и крепёжные системы горных выработок при подземной разработке месторождений.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи исследований:

1. Разработать методики определения фазового состояния смесей НРС в процессе гидратации в условиях шпуровых и скважинных зарядов.

2. Установить влияние фазового состояния воды в растворе НРС, коэффициента расширения смеси, температуры, предварительного сжатия и электрического поля на динамику роста и величину давления расширения с помощью физических методов исследования.

3. Установить этапы развития трещин в горных породах и параметры их направленного разрушения под влиянием НРС методами математического моделирования и проведением лабораторных испытаний.

4. Разработать модели разрушения горных пород НРС с учетом существующего поля напряжений и направленного разрушения на основании силового критерия Гриффитса-Ирвина.

5. Разработать и апробировать способы и средства управляемого и безопасного разрушения горных пород с помощью НРС при разрушении негабаритов, проведении и восстановлении эксплуатационного состояния выработок.

6. Установить влияние жесткости охранного сооружения и длины зависающей консоли основной кровли на локализацию в ней критических напряжений методами математического и эквивалентного моделирования.

7. Разработать принципы управления НДС горных пород при поддержании подготовительной выработки за лавой и обосновать параметры способов их охраны при принудительном обрушении консоли основной кровли НРС.

Выводы по разделу 1

1. Уголь является гарантом энергетической и экономической независимости страны, оставаясь при этом основным энергоносителем в ближайшей перспективе. Поэтому решение проблем, связанных с его добычей, имеет важное народно-хозяйственное значение для государства.

2. В современных условиях необходимы научные исследования в направлении разработки и совершенствования систем управления напряженно-деформированным состоянием горных пород, не оказывающих динамического воздействия на массив.

3. Важнейшим направлением совершенствования технологий управления напряженно-деформированным состоянием горного массива и разрушения прочных горных пород в сложных горно-геологических условиях является использование эффектов, создаваемых невзрывчатыми расширяющимися системами на массив. Приоритетными агентами являются невзрывчатые смеси на основе оксида кальция.

4. Расширение области применения НРС, в частности использование их в условиях подземных горных выработок, управление скоростью гидратации, разработка модифицированных НРС и исследование их физико-механических свойств являются важными и актуальными задачами современного горного производства.

5. Существующие методы расчета параметров разрушения с помощью НРС дают существенные погрешности. Они не учитывают механизм разрушения, жесткость системы «НРС-массив», определяющую допустимые объемные деформации НРС и динамику роста давления расширения, содержат эмпирические коэффициенты, не учитывают реальное поле напряжений в горном массиве. Необходимо разработка методики определения параметров разрушения горных пород в подземных горных выработках с помощью невзрывчатых разрушающих смесей, основанной на закономерностях процесса управляемого разрушения прочных горных пород статическими нагрузками в различных полях напряжений.

6. Положения классической однофазной модели Гриффитса-Ирвина могут быть приняты в качестве базовых для решения задач разрушения горных пород с помощью НРС.

7. Предложены направления исследований и сформулированы вытекающие из них задачи, позволяющие решить проблему управления состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями при подземной разработке месторождений.

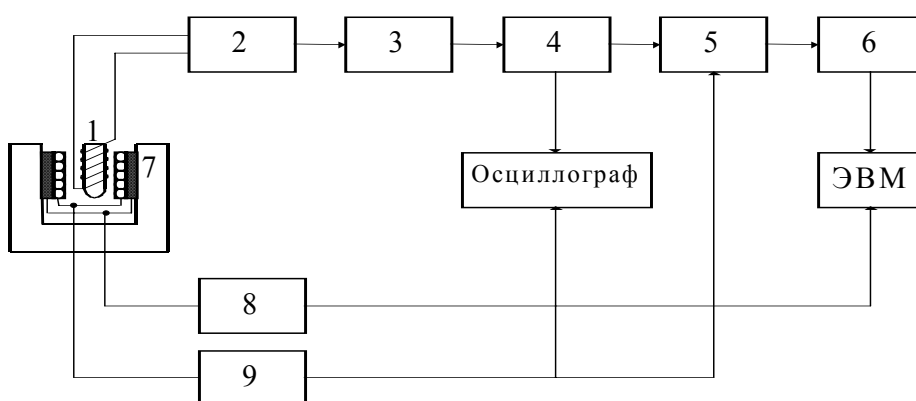
РАЗДЕЛ 2

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1 Методика экспериментов по изучению свойств и режимов работы невзрывчатых разрушающих смесей

2.1.1 Техника ядерного магнитного резонанса и методика определения фазового состояния растворов невзрывчатых разрушающих смесей

Задача методики – установить изменение фазового состояния воды в растворе НРС в процессе его гидратации по формируемому им спектру ЯМР водорода ^1H . Теоретические и экспериментальные основы ЯМР подробно изложены в работах [112, 254-258]. Экспериментальная установка ЯМР представляет собой стационарный радиоспектрометр широких линий, состоящий из постоянного магнита, системы регистрации сигнала ядерного резонанса и системы терморегулирования (рис. 2.1). Напряженность поля постоянного магнита 4200 Э, однородность $2 \cdot 10^{-6}$ Э/см, резонансная частота 17,8 МГц.



1 – высокочастотный контур с образцом; 2 – автодинный датчик; 3 – амплитудный детектор; 4 – предварительный усилитель низкой частоты; 5 – фазовый детектор; 6 – усилитель постоянного поля; 7 – постоянный магнит; 8 – генератор развертки магнитного поля; 9 – генератор низкой частоты для модуляции магнитного поля

Рисунок 2.1 – Функциональная схема ЯМР-спектрометра широких линий

Регистрация сигналов ЯМР осуществляется по автодинной схеме Робинсона. Для получения хорошего отношения «сигнал – шум» необходимо сужение полосы пропускания в низкочастотной области. Для этого был использован принцип фазового детектирования, который позволяет значительно сузить полосу пропускания тракта сигнала. Однако наблюдать одновременно всю линию уже невозможно, так как очень узкая полоса пропускания системы предполагает дифференциальное прохождение, когда амплитуда модуляции H_m значительно меньше ширины линии. Постоянное магнитное поле H_0 при этом медленно меняется, проходя через резонансное значение $H_0=1/\gamma\omega_0$, благодаря чему постепенно воспроизводится весь сигнал резонансного поглощения.

При дифференциальном прохождении линии поглощения сигнал подается на фазовый детектор. При этом низкочастотное напряжение сигнала и шумов смешивается с напряжением модуляции, а затем, при помощи элемента схемы с большой постоянной времени, выделяется только разностная частота, т.е. постоянная составляющая. Из сплошного спектра частот шумов в цепь постоянного тока вместе с сигналом ЯМР попадает лишь та часть спектра, которая содержит частоты, близкие к ω_m . Это значительно повышает отношение «сигнал – шум» на выходе фазового детектора. Производная сигнала ЯМР либо наблюдается визуально на осциллографе, либо регистрируется на самопишущем приборе.

Основными параметрами сигнала ЯМР являются: площадь сигнала S , пропорциональная числу исследуемых ядер в единице объема вещества, ширина линии ΔH , равная расстоянию между максимумами в единицах поля (\mathcal{E}): $\Delta H=3/4\gamma\hbar R^{-3}$, где \hbar – постоянная Планка, R – расстояние между ядрами в 10^{-10} м; $(\Delta H)^2$ – второй момент, равный среднему квадрату ширины сигнала относительно центра резонансной линии, в 10^{-10} м:

$$(\Delta H)^2 = 6/5(I+1)I g^2 \mu_0^2 N^{-1} \sum_i \sum_{k+i} R_{ik} = 358,1 R_m^{-6},$$

где I – спин ядра;

g – ядерный g -фактор;

μ_0 – ядерный магнетон;

R_m – среднее расстояние между резонирующими ядрами, в 10^{-10} м.

Разрешающая способность автодинного спектрометра не достаточна для регистрации отдельных спектральных линий водорода во всех возможных формах его существования в растворе НРС – это задача для спектроскопии высокого разрешения. В экспериментах регистрировалась спектральная линия ЯМР большой ширины (несколько эрстед), являющаяся суперпозицией вкладов от отдельных водородосодержащих групп. Известно также, что ширины линии протонного резонанса колеблются от тысячных долей эрстеда в свободных газах и жидкостях до единиц и десятков эрстед в твердых телах. В таком диапазоне надежно зафиксировать расщепление спектра имеющимся в наличии автодином по модуляционной методике (минимальная модуляция 0,01 Э) весьма затруднительно. Поэтому реально записывается суперпозиционный спектр ЯМР ^1H с некоей средней резонансной частотой. В дальнейшем в расчетах предполагается, что все линии имеют одну и ту же резонансную частоту f_0 и отличаются друг от друга шириной и амплитудой, что связано с количеством резонирующих ядер данного типа и их подвижностью в структуре.

Реакция гидратации НРС продолжается 8-24 часа, в зависимости от состава. Для исследования динамики изменения фазового состояния воды в растворе НРС необходимо производить непрерывную запись спектра ЯМР. При этом проводимое исследование имеет некоторые особенности.

Первой особенностью является то, что в процессе реакции гидратации происходит увеличение объема смеси. Это приводит к разрушению пробирки, в которую она помещена. В связи с этим было проведено две серии исследований. В первой из них раствор помещался в стеклянную пробирку диаметром 10 мм длиной 10 см. Для предотвращения попадания НРС в контур магнита установки ЯМР при разрушения пробирки, она обматывалась фторопластовой лентой F-4D толщиной 0,2 мм. После разрушения пробирки образец извлекался из контура, и эксперимент считался законченным.

Во второй серии экспериментов раствор НРС помещался в изготовленную из фторопласта F-4 пробирку с размерами аналогичными стеклянной. Увеличение

объема НРС приводило к упруго-пластическому деформированию стенок пробирки, что позволяло записать спектр ЯМР на протяжении всего периода гидратации. Наиболее интересным является начальный период, на котором вода переходит из свободного состояния в химически связанное, что четко прослеживается по изменению линии спектра. Этот период характеризуется наиболее интенсивным ростом объема НРС.

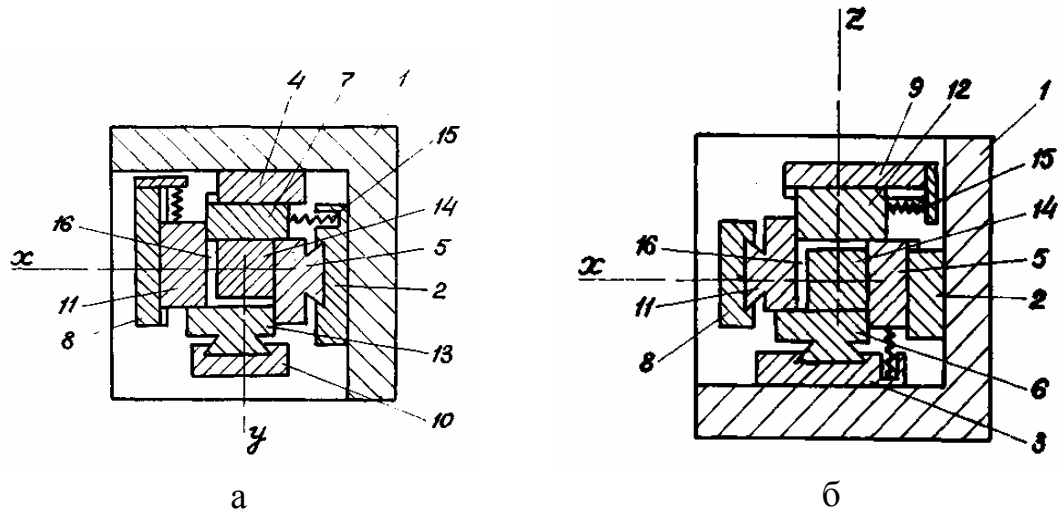
Вторая особенность исследований определяется тем, что реакция гидратации является экзотермической. В активной стадии происходит самонагревание раствора НРС, что приводит к повышению температуры в контуре, смещению линии спектра и ее растяжению по оси абсцисс, а после стабилизации температуры раствора – возвращению температуры в контуре к исходному значению, и, соответственно, смещению линии спектра в обратном направлении. Поэтому анализ фазового состояния раствора целесообразно проводить не по ширине линии спектра, которая меняется в зависимости от температуры, а по амплитуде. Площадь сигнала, характеризуемая шириной и амплитудой, является константой, значит, такой анализ допустим.

Таким образом, начальный период гидратации исследовался путем непрерывной записи спектров ЯМР (время записи одного спектра 3-4 минуты). После стабилизации скорости гидратации частота экспериментов снижалась, последний эксперимент проводился через 24 часа. Предполагалось, что в это время скорость изменения структуры новообразований настолько мала, что ей можно пренебречь, то есть реакция гидратации закончена.

2.1.2 Методика лабораторных исследований компрессионно-деформационных свойств расширяющихся смесей

Лабораторные исследования величины напряжения, развиваемого НРС в шпуре, включали: исследования на УНТС; поисковые эксперименты, на основании которых был разработан стенд для проведения исследований; исследования на разработанном стенде.

Исследования на УНТС [259, 260] позволяют определять физико-механические свойства твердых тел в различных видах объемных напряженных состояний и контролировать процесс деформирования и разрушения. Основным узлом УНТС является рабочий орган, схематически представленный на рис. 2.2.



1 – станина; 2, 3, 4 – опоры; 5, 6, 7 – рабочие воспринимающие плиты; 8, 9, 10 – пяты; 11, 12, 13 – нажимные плиты; 14 – образец; 15 – пружины

Рисунок 2.2 – Разрез рабочего органа УНТС: *а* – по горизонтальной плоскости *ху*, *б* – по вертикальной *хз*

Устройство работает следующим образом. При перемещении штоков цилиндров по трем взаимно перпендикулярным осям по направлению к образцу 14, нажимные рабочие плиты 11 – 13 располагаются с заходом друг относительно друга и рабочих воспринимающих плит 5 – 7. Например, нажимная плита 13 (см. рис. 2.2, *а*) скользит по нажимной плите 12 и воспринимающей 5. Одновременно плита 13 соприкасается с плитой 11 и воспринимающей 6, перемещает их по направляющим пяты 8 и, соответственно, опоры 3. При этом сжимаются пружины нажимной 11 и воспринимающей 6 плит, которые своим усилием сжатия обеспечивают постоянный контакт между нажимными 13, 11 и воспринимающей 6 плитами. Аналогичная картина наблюдается при перемещении двух других штоков гидроцилиндров (см. рис. 2.2, *б*). При этом образуется замкнутая камера 16, в которой находится испытываемый образец 14.

Давление на образец осуществляется нажимными плитами 11 – 13 с одной стороны и воспринимаемыми 5 – 7 – с другой, по всей плоскости соприкосновения этих плит с соответствующими гранями образца. Гидроцилиндры прикреплены к станине при помощи стоек и фланцев. Внутри стола смонтирована гидросистема. Каждый из гидроцилиндров ГЦ-1, ГЦ-2, ГЦ-3 снабжен соответствующими насосами высокого давления типа НЖР (максимальное давление 100 МПа, производительность 1 л/ч).

Чтобы сократить время подачи штоков к образцу и возврата в исходное положение (холостой ход), в гидросистеме предусмотрен насос низкого давления (давление 5 МПа, производительность 24 л/ч).

Распределители типа ЭРА служат для подачи давления жидкости от насоса высокого давления к гидроцилиндрам. Рабочее давление, развиваемое каждым из гидроцилиндров, составляет 25,0 МПа. При диаметре штока гидроцилиндра 0,250 м максимальное усилие, создаваемое на штоке, равно $7,8 \cdot 10^4$ кг. УНТС оборудована электронной измерительной системой, позволяющей фиксировать деформации образца по трем осям и нагрузку на его гранях и записывать данные в виде массива данных. В проводимых экспериментах данные записывали с частотой 1 с.

Образцы для испытаний представляли собой пластифицированную НРС. Объем смеси соответствовал объему кубика со сторонами 55 мм и имел массу 0,385 кг. Предполагалось, что исследования проводятся на образце единичной длины и объема, то есть имитируется элемент скважины в масштабе 1:1. Образец помещался в испытательную камеру с задвинутыми горизонтальными плитами, после чего с помощью верхней плиты пресса образец поджимался до закрытия камеры для обеспечения надежного контакта.

После окончания эксперимента проводилось измерение ребер граней затвердевшего кубика НРС штангенциркулем (цена деления 0,05 мм). Испытания по изучению динамики роста давления расширения НРС проводились в режиме заданных деформаций. После помещения образца в рабочую камеру в процессе перекристаллизации оксида кальция происходил рост давления расширения, что вы-

зывало сдвигание плит пресса; соответствующие нажимные плиты удерживали в заданном диапазоне деформаций путем их плавного поджатия. Температура окружающей среды при проведении экспериментов находилась в диапазоне 21-22,5 °С.

Испытания на установке УНТС проводились по трем программам:

1. В условиях ограничения перемещений по всем трем осям.
2. В условиях свободного перемещения по всем осям.
3. В условиях ограничения перемещений по горизонтальным осям и свободного перемещения по вертикали.

Целью испытаний по первой программе было получение динамики роста давления расширения в условиях, имитирующих донную или среднюю часть шпурового или скважинного заряда, когда горизонтальные перемещения ограничены стенками скважины, а вертикальные донной частью скважины или НРС. При такой схеме эксперимента давление расширения достигает максимальной величины.

Целью испытаний по второй программе было получение динамики роста давления расширения в условиях различного сопротивления расширению по всем трем осям. При этом разница сопротивления по осям была вызвана разной жесткостью гидросистемы пресса в различных направлениях. Такая схема эксперимента позволила выяснить особенность работы НРС в условиях различной жесткости стенок полости, в которую он помещен, в разных направлениях. В натуре аналогичная ситуация может возникнуть в случае, когда скважина или шпур пробурены в трещиноватом массиве или пересекают его.

Целью испытаний по третьей программе было изучение динамики роста давления расширения в условиях, имитирующих устьевую часть шпурового или скважинного заряда. В этом случае горизонтальные перемещения ограничены стенками скважины, а вертикальные нет.

Кроме исследования давления расширения НРС, для изучения физико-механических свойств материала, производилось разрушение образцов после их твердения и затухания реакции гидратации. Образцы испытывались и на одноосное сжатие, и в объемном поле напряжений.

Трехосное нагружение образцов производилось следующим образом. Помещенный в рабочую камеру образец равномерно нагружался по трем осям до заданного уровня, контролируемого по показаниям манометров. Смещение граней образца фиксировалось электронной измерительной аппаратурой с точностью 0,01 мм. Разрушение образца фиксировалось по спаду наибольшего напряжения и появлению деформаций растяжения. Частота измерений – 2 в секунду.

Моделировалось напряженное состояние, обобщенное сжатие (параметр Надаи-Лоде $\mu_\sigma = -1$)

$$\mu_\sigma = 2 \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) - 1,$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Данная программа нагружения была реализована следующим образом. Промежуточные главные напряжения, соответствующие имитируемой глубине работ, принимались $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$. Главное преобладающее напряжение σ_1 увеличивали до тех пор, пока образец не разрушится, (разрушение образца фиксировалось по резкому падению давления в цилиндрах). Физически это соответствовало работе заряда НРС в скважине в зоне нарастающего опорного давления от движущегося очистного забоя. При этом максимальный коэффициент концентрации напряжений был равен 6.

Если образец при заданном уровне напряжений не разрушался, то разгружали компоненту σ_3 до нуля, что вызывало переход напряженного состояния от обобщенного сжатия к обобщенному сдвигу (разрушение образца фиксировалось по резкому падению давления в цилиндрах и скачку деформаций растяжения). Физически это означало переход участка скважины с зарядом НРС из нетронутой части массива в область с одной свободной поверхностью, например в зону обрушения пород кровли.

Для анализа полученных экспериментальных данных, определения физико-механических свойств НРС и степени его повреждаемости, рассчитывались ос-

новые механические характеристики [261]. Методика расчета приведена в приложении А.

Испытания на установке УНТС позволяют достаточно точно определить свойства НРС и величину напряжений расширения, однако геометрия образца не соответствует шпуровому или скважинному заряду, а проведение испытаний требует специальной уникальной аппаратуры. Поэтому для исследования динамики роста давления расширения в условиях сходных со шпуровым зарядом необходим экспресс метод измерений.

На этапе поисковых исследований для определения величины напряжения, развиваемого НРС, был изготовлен специальный прибор, состоящий из цилиндра, выдвижного штока и вставки. Образец НРС, помещаемый при моделировании между выдвижным штоком и вставкой, имел цилиндрическую форму с одинаковыми значениями диаметра и высоты. Имитировался шпуровой заряд единичного объема в натуральную величину.

Схема испытаний состояла в следующем. Заданный объем НРС, помещался в цилиндр, между вставкой и выдвижным штоком. Диаметр цилиндра, имитирующего шпур в натуральном масштабе, составлял 32 мм. После этого прибор помещался под гидравлический пресс, зафиксированный от деформаций. Между штоком и верхней плитой прессы устанавливался динамометр ДОСМ-3-5, под нижнюю опорную плиту которого размещали индикатор часового типа ИЧ-10, изготовленный по ГОСТ 577-68, имеющий 1 класс точности. Общий вид лабораторной установки приведен на рис. 2.3 а.

В процессе гидратации НРС происходило образование гидроокиси кальция, рост размеров и количества кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что обуславливало высокую степень расширения смеси, в результате чего оказывалось давление от расширения на шток. Пошаговое измерение усилий расширения НРС производилось при помощи динамометра, а контроль смещений штока – при помощи индикатора часового типа. Величина допустимых деформаций регулировалась установкой между цилиндром и штоком прибора набора контрольных шайб.

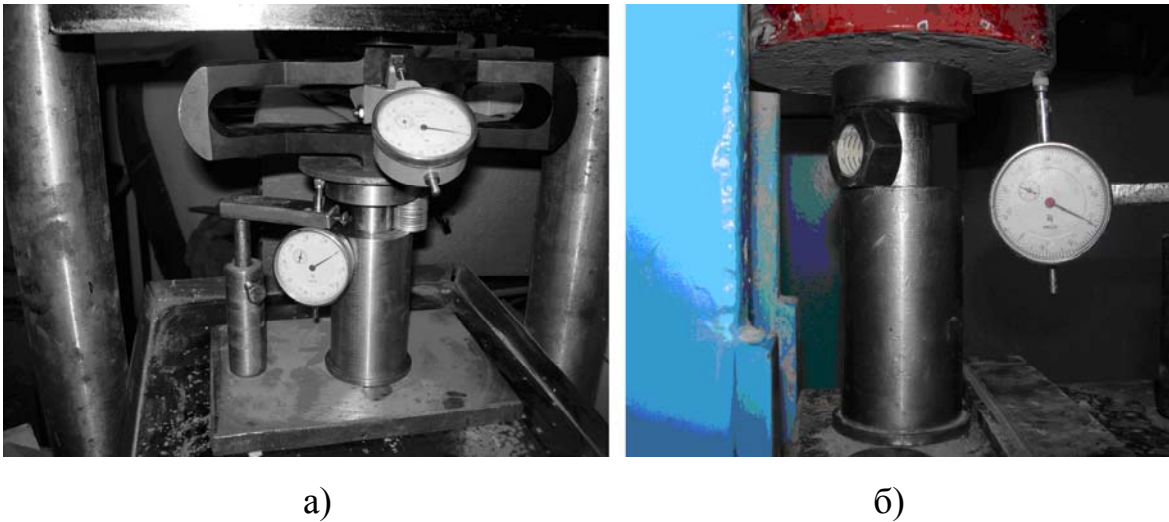


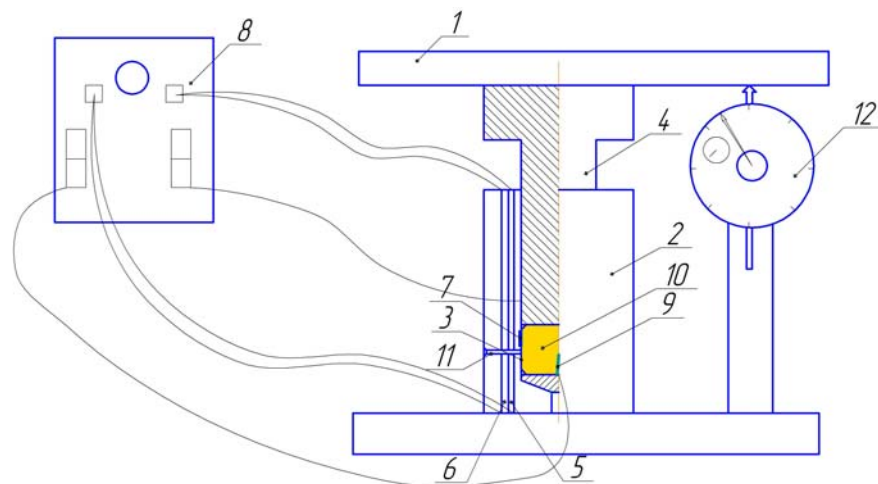
Рисунок 2.3 – Общий вид установок первого (а) и второго (б) этапов поисковых лабораторных исследований

Давление расширения определялось как отношение усилия, зафиксированного динамометром, к площади полости цилиндра. Недостатком поисковых исследований на первом этапе была невозможность создания высокой жесткости системы, так как, по сути, измерение усилия расширения определялось через деформацию пружины динамометра ДОСМ-3-5. Поэтому была получена характеристика работы НРС в диапазоне допустимых деформаций 16-300%.

Общая постановка эксперимента на втором этапе поисковых исследований, по сути, не отличалась от изложенной выше. Единственным отличием было то, что нагружение прибора и фиксация давления расширения НРС производились не динамометром, как на первой стадии моделирования, а непосредственно механическим прессом, что позволило повысить жесткость системы. Общий вид эксперимента приведен на рисунке 2.3 б.

Начальное давление изменялось в диапазоне 0-60 МПа путем предварительного нагружения прессом прибора с блокирующей гайкой, а происходящие объемные изменения фиксировались индикатором часового типа ИЧ-10. Температура окружающей среды при проведении экспериментов находилась в диапазоне 23-28 °С. Изменение деформаций и нагрузок во времени фиксировалось при помощи цифровой фотосъемки с интервалом 15-60 мин. Данные заносились в журнал наблюдений.

Поисковые исследования показали, что развиваемое давление зависит от количества НРС, которое определяется диаметром полости и температурой окружающей среды. Поэтому был сделан вывод, что исследование НРС необходимо проводить в температурном режиме, совпадающем с натурным, при соответствующем диаметре шпура. Исходное сырье НРС имеет колебания химического состава, технология его производства не позволяет точно соблюдать пропорции входящих химических веществ, поэтому существует разброс между декларируемыми показателями и фактическими. Такой разброс наблюдается не только между партиями поставляемого НРС, но даже в пределах одной партии. Для объективного обоснования параметров различных технологий, основанных на применении НРС, сравнения характеристик различных составов между собой необходима периодическая оценка применяемых смесей в условиях температурных полей и теплофизических свойств среды применения. Такая оценка может быть проведена в стандартных условиях с помощью разработанного стенда [262] для определения давления расширения НРС. Предлагаемый стенд поясняется рис. 2.4, на котором изображена его принципиальная схема.



1 – источник внешнего давления; 2 – корпус; 3 – испытательная камера; 4 – поршень; 5, 6 – нагревательные элементы; 7 – датчик температуры; 8 – блок управления; 9 – датчик температуры игольчатого типа исследуемого образца; 10 – образец НРС; 11 – отверстие для инъекций и подвода электричества; 12 – индикатор часового типа

Рисунок 2.4 – Стенд для исследования НРС [262]

Стенд для испытаний НРС содержит источник внешнего давления 1, между силовыми элементами которого устанавливается корпус 2 с испытательной камерой 3, внутрь которого помещается подвижный поршень 4. В корпусе испытательной камеры 3 содержится нагревательный элемент 5, который соединен с датчиком температуры 7, установленном на внутренней стороне камеры 3 и соединенном с блоком управления 8. В испытательной камере 3 также установлен датчик температуры 9 игольчатого типа для исследуемого образца 10 НРС. Между силовыми элементами источника внешнего давления 1 устанавливается индикатор часового типа 12. При проведении исследований в качестве источника внешнего давления использовался пресс ЗИМ Р5. В качестве датчика температуры – штыревой зонд электронного термометра DM-9231А. Для проведения исследований было изготовлено три испытательные камеры с диаметрами 32, 42, 75 мм, что позволяло исследовать свойства НРС в шпуровых и скважинных зарядах в натуральную величину. Исследования основного цикла проводились на описанном стенде. При этом задавались различные режимы работы.

Режим 1. Работа НРС в свободном состоянии без ограничения объемных перемещений смеси. В этом режиме образец НРС помещался в испытательную камеру, вплотную к нему устанавливался подвижный поршень. Поджатие поршня составляло 10 кгс – для предотвращения зазоров между образцом и поршнем. После чего рост объема НРС вызывал смещение верхней плиты силового элемента, что позволяло фиксировать усилие на поршень, а при пересчете получать давление расширения. Жесткость системы определялась при этом жесткостью прессы.

Режим 2. Работа НРС в заданном диапазоне увеличения объема. В этом режиме после помещения образца НРС в испытательную камеру между поршнем и корпусом камеры устанавливались тарированные шайбы на высоту, заданную необходимыми объемными изменениями. После этого испытательная камера поджималась плитами источника внешнего давления с заданным усилием. Объем НРС увеличивался и заполнял зазор. Дальнейший рост объема вызывал смещение верхней плиты силового элемента после превышения давлением расширения поджатия поршня прессом, что позволяло фиксировать усилие на поршень.

Режим 3. Работа НРС в условиях предварительного сжатия. В этом режиме после помещения образца НРС в испытательную камеру производилось его нагружение плитами источника внешнего давления с заданным усилием. Это создавало принудительное сжатие образца в испытательной камере. Величина предварительного сжатия НРС изменялась от 0,26 до 17,5 МПа.

2.1.3 Методика лабораторных исследований термокинетических характеристик расширяющихся смесей

Известно, что увеличение объема НРС на основе оксида кальция связано с протеканием реакции гидратации, сопровождающейся выделением значительного количества тепла. Первая группа исследований была связана с изучением изменения температуры и объемов образца НРС в свободном состоянии в воздушной среде в процессе гидратации. Такие эксперименты не в полной мере отражают граничные условия шпурового заряда НРС, однако позволяют проводить качественное сравнение составов на разных стадиях гидратации.

Для этого в тонкостенную резиновую оболочку помещался приготовленный раствор НРС заданного объема. Внутри оболочки устанавливался электронный лабораторный термометр DM-9231A с точностью 0,1 °С. После этого, при помощи видеосъемки, фиксировалось изменение объема материала и его температуры во времени.

Вторая группа исследований была связана с изучением влияния температуры окружающей среды на протекание реакции гидратации. Проведение экспериментов в сосуде Дьюара не представлялось возможным, так как гидратационное твердение НРС вызывает увеличение его объема, что привело бы к разрушению прибора. Поэтому образец НРС помещался в теплоизолированную емкость с водой различной температуры, поддерживаемой с помощью электронагревателя. Колебания температуры в ходе эксперимента не превышали 2 °С.

Процессы нагревания и охлаждения внутришпурового заряда НРС являются нестационарными тепловыми процессами. Моделирование при нестационарных

режимах должно выполняться с соблюдением критериев подобия теплопроводности [263]. В нашем случае в качестве критерия подобия целесообразно принять число Фурье, которое характеризует соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей среде и скоростью перестройки поля температуры внутри рассматриваемого тела, и зависит от размеров тела и коэффициента его температуропроводности:

$$F_o = \frac{a \cdot t}{L^2},$$

где a – коэффициент температуропроводности;

t – время изменения внешних условий, час;

L – размер тела, м.

$$a = \frac{\chi}{c_p \cdot \rho},$$

где χ – теплопроводность, Вт/(м·К);

c_p – изобарная удельная теплоемкость, кДж·кг⁻¹·К⁻¹;

ρ – плотность, кг/м³.

Например, при моделировании имитируется заряд НРС, помещенный в ампуле в шпур диаметром 4 см, пробуренный в блоке песчаника размерами 0,5x0,5x0,3 м. В качестве материала, вмещающего НРС, при моделировании принимается вода. Необходимый диаметр (L) оболочки с водой, при диаметре оболочки с НРС при моделировании равном 4 см и одинаковом времени изменения внешних условий (нагревание НРС при гидратации), рассчитаем с учетом приведенного выше критерия подобия:

$$\frac{\chi_{\text{песч}} \cdot t}{c_{p \text{песч}} \cdot \rho_{\text{песч}} \cdot L_{\text{песч}}^2} = \frac{\chi_{\text{H}_2\text{O}} \cdot t}{c_{p \text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot L_{\text{H}_2\text{O}}^2}$$

$$L_{\text{H}_2\text{O}} = \sqrt{\frac{\chi_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p \text{песч}} \cdot \rho_{\text{песч}} \cdot L_{\text{песч}}^2}{c_{p \text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \chi_{\text{песч}}}}$$

подставив данные, получим

$$L_{H_2O} = \sqrt{\frac{0,58 \cdot 0,84 \cdot 2500 \cdot 0,5^2}{4,183 \cdot 1000 \cdot 2}} = 0,19 \text{ м.}$$

Третья группа экспериментов связана с исследованием характеристик работы НРС в условиях ограниченных перемещений в полостях имитирующих шпур. При этом в одной серии экспериментов шпур моделировался с помощью цилиндрических труб различного диаметра с одним глухим торцом, а в другой – для моделирования шпура в различных материалах выполнялись искусственные полости цилиндрической формы.

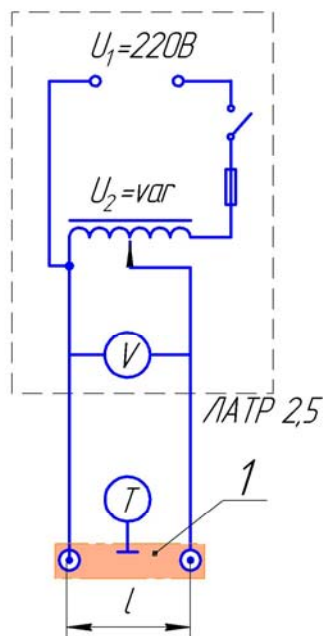
Лабораторные исследования особенностей протекания реакции гидратации в полостях, вмещающих заряд НРС, выполненных в различных материалах, проводились следующим образом. Раствор НРС при помощи шприца помещался в цилиндрические оболочки диаметром 2 см из различного материала. В качестве материала оболочек применяли пенопласт, пластик, дерево (сосна), гипс, сталь. Объем раствора НРС в оболочках составлял 2 см³. Температура окружающей среды при эксперименте составляла 23 °С. Изменение температуры НРС во времени фиксировалось с помощью электронных термометров.

2.1.4 Методика экспериментов по определению эксплуатационных характеристик расширяющихся смесей

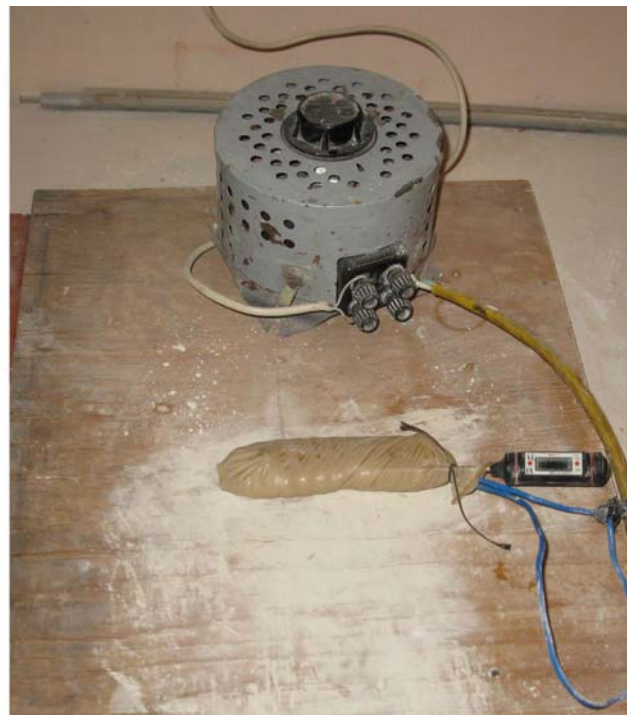
Одним из важнейших практических вопросов при использовании НРС является обеспечение возможности безопасного формирования шпуровых зарядов. Для этого необходимо сохранение подвижности смеси в период от ее приготовления до заряжания для обеспечения возможности помещения рабочие полости до начала расширения. Для получения информации о сроках схватывания НРС были проведены исследования на приборе Вика по методике [264], а также исследования по определению подвижности смесей по расплаву конуса [265].

2.1.5 Методика исследований влияния электрического поля на скорость гидратации невзрывчатых разрушающих смесей

Для изучения особенностей работы НРС под влиянием электрического поля были проведены лабораторные исследования, в которых через образец НРС цилиндрической формы, помещенный в резиновую оболочку с диаметром основания цилиндра 40 мм и длиной 70, 140, 210, 300 мм, имитировавший фрагмент заряда в шпуре в натуральную величину, пропускался переменный ток различного напряжения. При этом фиксировалось изменение температуры НРС с помощью электронных лабораторных термометров DM-9231A. Длина образца в экспериментах соответствовала расстоянию между электродами. Регулирование напряжения осуществляли в диапазоне 5-70 В с помощью лабораторного автотрансформатора ЛАТР 2,5, который предназначен для плавного регулирования напряжения переменного тока частотой 50 или 60 Гц. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2.5.



а)



б)

1 – образец НРС

Рисунок 2.5 – Схема (а) и общий вид (б) установки для исследования влияния электрического поля на скорость гидратации НРС

Для защиты от короткого замыкания ЛАТР включался в сеть, которая защищалась плавкими предохранителями с током плавкой вставки 10 А. В проводимых экспериментах при повышении напряжения выше 70 В, при расстоянии между электродами $l=7$ см, перегорала плавкая вставка предохранителя.

Эксперименты проводились в три этапа. На первом образцы находились в свободном состоянии в воздушной среде. Во втором – помещались в теплоизолированную емкость с водой различной температуры, размеры которой определяли с помощью числа Фурье по приведенной выше методике. На третьем этапе образцы с электродами устанавливались в разработанный стенд для испытаний НРС. В экспериментах второго этапа параллельно с замерах температуры производились измерения увеличения объема смесей. А при испытаниях на стенде (рис. 2.6 а) фиксировалось изменение объема и давления расширения НРС при пропускании электрического тока.

Также были проведены эксперименты, в которых НРС и электроды помещали в стеклянную пробирку диаметром 25 мм, которую плотно закрывали пробкой и помещали в паз в деревянном бруске, а сверху накрывали плексигласом рис. 2.6 б. Фиксировалось время разрушения пробирки при пропускании напряжения различной величины.



а)

б)

Рисунок 2.6 – Исследования влияния электрического поля на динамику роста давления НРС (а) и на режим разрушения (б)

2.2 Методика численного математического моделирования

2.2.1 Выбор метода моделирования

Принятие грамотных решений в области горной геомеханики должно основываться на анализе и оценке набора качественных и количественных показателей. Получение количественных характеристик на основе использования строгого математического аппарата при решении задач геомеханики вызывает значительные трудности. Это связано со сложной геометрией задач, их нелинейностью, отсутствием четких и однозначных представлений о природе геомеханических процессов и сформулированных на их основе общепринятых закономерностей. Кроме того, неоднородность свойств массива приводит к определенному разбросу результатов экспериментов и требует применения вероятностно-статистических оценок, что существенно усложняет анализ. Поэтому для получения аналитических решений обычно прибегают к упрощению решаемых задач, во многом основываясь на классические решения методами строительной механики и сопротивления материалов, заменяя геоматериалы близкими по свойствам строительными материалами. Недостаточная точность строгих решений послужила причиной значительного развития при исследовании геомеханических процессов физического и математического моделирования.

В последнее время наблюдается тенденция вытеснения физического моделирования математическим, что объясняется появлением и развитием высокоскоростных ЭВМ. Математическое моделирование, реализуемое с помощью численных методов, является одним из основных инструментов, позволяющих исследовать НДС конструкций и систем при решении любых инженерных задач, в том числе задач горной геомеханики.

Основные численные методы, реализуемые при решении задач прочности в различных областях техники: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод дискретных элементов, комбинированные методы. При этом лидирующее положение занимает метод конечных элементов (МКЭ), основные идеи которого были заложены Р. Курантом и Д. Гильбертом

[266]. Метод был впервые применён на ЭВМ в 1944 году Дж. Аргирисом. Существенный толчок в своём развитии МКЭ получил в 1963 году после того, как было доказано то, что его можно рассматривать как один из вариантов метода Рэлея — Ритца, который путём минимизации потенциальной энергии сводит задачу к системе линейных уравнений равновесия. Основной вклад в развитие МКЭ в геомеханике сделали О.К. Зенкевич [267-269], Б.З. Амусин [270], Ж.С. Ержанов [271], А.Б. Фадеев [272].

Постоянное развитие средств вычисления и программного обеспечения привело к тому, что практически все современные расчёты на прочность выполняют, используя МКЭ, реализуемый в различных программных пакетах.

Объясняется это тем, что:

1. Расчетные схемы моделируемых тел имеют черты реального объекта, не требуется их упрощение до стандартных решений сопротивления материалов и строительной механики, они могут быть детализированы с необходимой степенью точности в нужных местах.

2. Для МКЭ характерна наглядность процесса и высокое качество визуализации.

3. Проведение численного моделирования не требует высокой математической подготовки, может проводиться инженером-пользователем на основании руководств и инструкций программного продукта. При этом инженер, проводящий моделирование, понимает специфику решаемой задачи с практической точки зрения, не допускает ошибок интерпретации математических результатов, что позволяет проводить корректировку модели в соответствии с конкретными условиями и получать грамотные инженерные решения.

Таким образом, учитывая сказанное, для проведения математического моделирования был выбран МКЭ. Метод основан на упрощении гладких функций дискретно-линейными полиномами, представлении исследуемой области в виде плоских или пространственных элементов. Теоретическая база метода конечных элементов достаточно хорошо изучена и основана на следующем из закона сохранения энергии свойстве сил реакций идеальных связей: для равновесия любой ме-

ханической системы необходимо и достаточно, чтобы сумма работ активных внешних сил, действующих на систему при любом перемещении, была равна работе внутренних напряжений. Это свойство носит название принципа возможных перемещений. То есть любые заданные граничные условия – внешние силы, перемещения узлов, ограничения перемещений, выводят систему из равновесия, а процедура МКЭ позволяет рассчитать напряжения внутри системы таким образом, чтобы обеспечить ее равновесие. При этом передача силовых взаимодействий между элементами производится в узлах расчетной схемы конечноэлементной модели.

2.2.2 Численное моделирование геомеханических процессов с учетом их нелинейности

Расчеты на основе допущения о линейной упругости материала являются наиболее распространенными при расчете конструкций и анализе прочности. Линейно-упругий материал подчиняется соотношениям закона Гука и не сохраняет деформаций после снятия нагрузки. При моделировании же геомеханических процессов необходимо учитывать тот факт, что корректное их описание не может быть достигнуто с помощью решения линейных упругих задач. Кроме того, большинство геомеханических процессов нелинейны по своей природе и не могут быть решены чисто в статической постановке. Причинами нелинейного поведения являются: физическая нелинейность геоматериалов, под которой понимается непропорциональность свойств между напряжениями и деформациями; наличие контактов и трения между элементами модели; различные свойства элементов. К ним относится геометрическая нелинейность решаемых задач, обусловленная большими перемещениями соразмерными с размерами моделируемых объектов, что не позволяет принимать гипотезу первоначального недеформированного состояния расчетной схемы в процессе нагружения.

Решение задач с физической и геометрической нелинейностью в МКЭ проводится, как правило, итерационными методами Ньютона-Рафсона и Ньютона-

Канторовича. При этом матрица жесткости уточняется на каждой итерации с помощью секущей линеаризации. Решение сводится к последовательному приближению к искомой функции, а процесс вычислений заканчивается после достижения заданной точности решения.

Современные специализированные программные продукты содержат в своих модулях набор деформационных моделей, позволяющих исследовать поведение материалов, подчиняющихся различным физическим законам (гиперупругость, вязкоупругость, кинематическое упрочнение, изотропное упрочнение, ползучесть и др.). Применительно к задачам геомеханики для моделирования поведения грунтов, горных пород и бетона вызывает интерес упругопластическая модель, основанная на использовании уравнения состояния Мора-Кулона или Друкера-Прагера (построенная на приближении к закону Мора-Кулона в виде конической поверхности) и позволяющая получить более точное приближение к реальным результатам [273].

При решении задач о НДС горных пород вблизи различных горнотехнических объектов, в основном применяют принцип суперпозиции сил. При этом моделируют некоторый объем породного массива, на границах которого приложена распределенная нагрузка, соответствующая напряжениям, эквивалентным весу отброшенной толщи пород. Задача решается в статической постановке. Выводы о возникновении, размерах и конфигурации зон неупругих деформаций, зон разрушения, делают на основании анализа полученных в модели напряжений, при принятии определенной теории прочности (для разрушения) или критериальных уравнений, полученных в результате аналитического решения стандартных задач (для ЗНД).

Такой подход является не совсем корректным по двум причинам.

Во-первых, схема модели не соответствует реальной схеме нагружения, поскольку при моделировании на границу модели, уже содержащую определенный горнотехнический объект прикладывается давление. Согласно общепринятым в геомеханике представлениям горные породы находятся в условиях естественного сжатия (по разным мнениям геостатического или неравнокомпонентного), и де-

формирование контура выработок вызывается разгрузкой пород, вызванной образованием полости. Кроме того, при моделировании по описанному пути напряженное состояние в модели не соответствует деформированному состоянию, поскольку максимум смещений находится на границе модели в месте приложения нагрузки. В реальности деформации затухают от контура выработки вглубь массива. Такое допущение не позволяет проводить анализ с точки зрения деформаций массива, сравнивать полученные результаты с результатами натуральных наблюдений и инструментальных замеров.

Во-вторых, реальное нагружение является процессом, протекающим во времени, поэтому решение имитационной задачи должно проводиться путем разбиения пути нагружения на малые интервалы и суммированием найденных на каждом шаге решений. Известно, что состояние геоматериалов зависит от пути (истории нагружения). Таким образом, если временной фактор явно не используется, необходимо проводить дискретизацию задачи, задавая нагрузку функцией времени, что позволяет упростить решение до ряда последовательно решаемых статических задач.

Учитывая вышесказанное, для оценки изложенных соображений с практической стороны представляет интерес проведение сравнительного анализа двух вариантов проведения расчета с помощью МКЭ – традиционного и предлагаемого. В качестве примера рассмотрим задачу о НДС породного массива, вмещающего протяженную горную выработку арочного сечения после ее проведения [274].

Моделирование проводилось в программном комплексе Ansys Inc. в масштабе 1:1. Геометрические размеры моделируемой области и сетка конечных элементов в двух вариантах расчетов были приняты одинаковыми. Моделировалась выработка, проведенная на глубине 1000 м в алевролите. Исходные данные для моделирования (табл. 2.1) были взяты из кадастра физических свойств горных пород [275].

В первом случае решалась статическая упругая задача. На контур расчетной области, содержащей выработку, прикладывалась нагрузка, соответствующая глубине работ. Во втором случае моделирование проводилось пошагово.

Таблица 2.1 – Исходные данные для численного моделирования

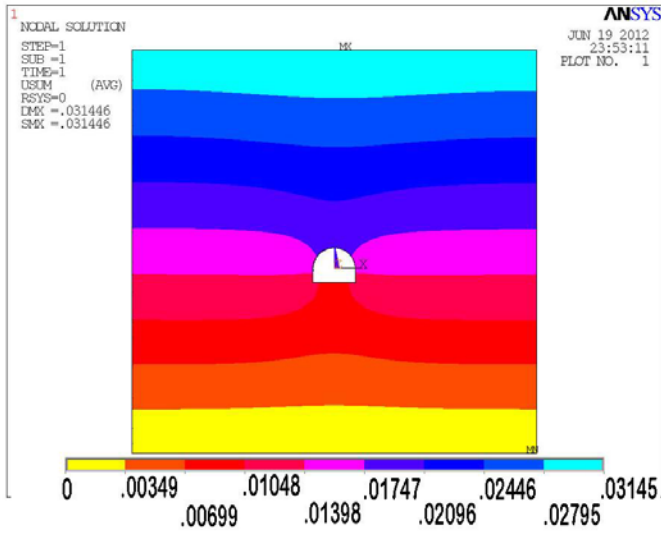
№ п/п	Объемная масса γ , кгс/м ³	Модуль упру- гости Е, МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Угол внутрен- него трения φ , град	Сцепление С, МПа
1	2500	2500	0,3	35	0,95

Сначала производилось нагружение модели, которая имитировала массив без горной выработки. Таким образом, моделировалось естественное напряженное состояние горных пород. Полученное НДС в модели запоминалось и принималось в качестве исходного состояния для второго шага, на котором в массиве выполняли полость, имитирующую горную выработку. При этом расчет выполнялся без выхода из модуля решения. Результаты проведения расчета приведены на рис. 2.7.

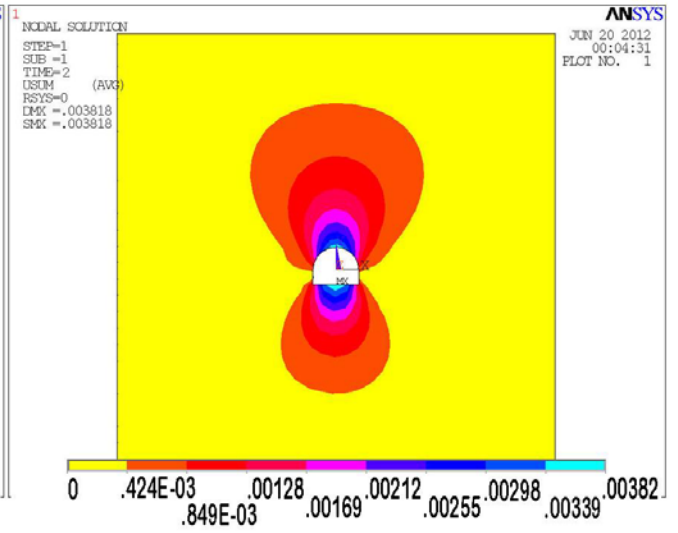
Анализ представленных рисунков показывает, что смещения в модели (см. рис. 2.7 а), рассчитанной по первому (традиционному) варианту имеет максимум на верхней границе модели и не отражает реальной картины распределения смещений в массиве.

Смещения во втором варианте (предлагаемом) (см. рис. 2.7 б) имеют максимум на контуре выработки, отчетливо видно зону влияния выработки в кровле и почве. По величине смещений можно получить представления о размерах зон упругих и неупругих деформаций. Таким образом, предлагаемый способ расчета более корректен, информативен и более полно отражает природу процесса сдвижений.

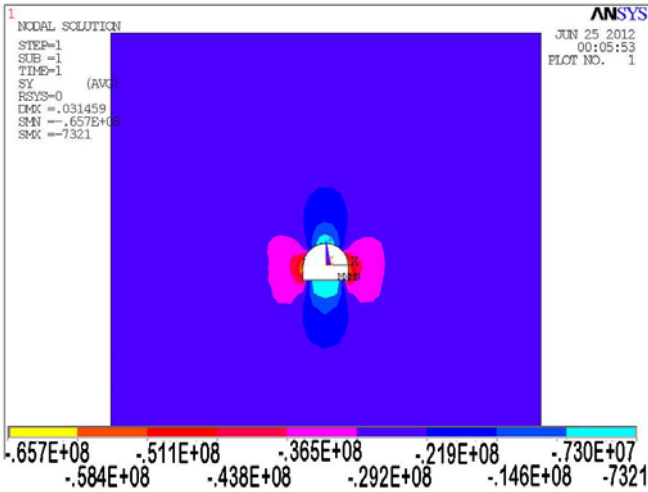
Распределения напряжений вокруг выработки визуально похожи, однако возникающие в модели напряжения существенно отличаются. Максимальные напряжения возникают в боках выработки, минимальные – в кровле по центральной оси.



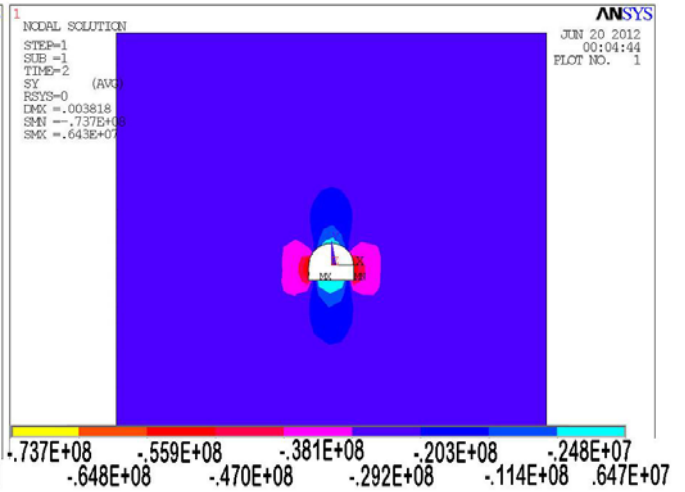
а



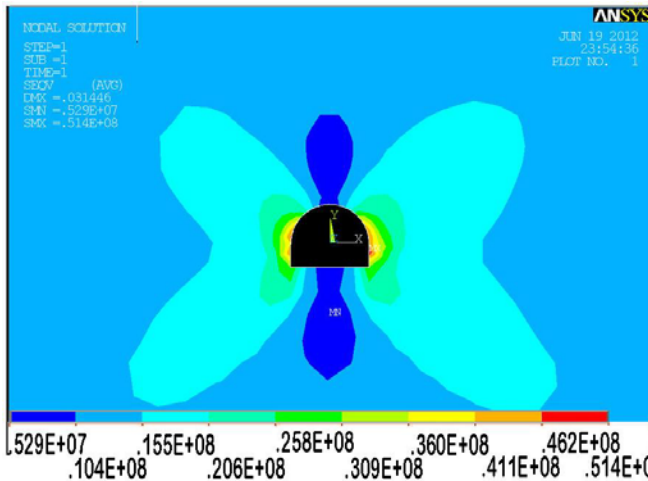
б



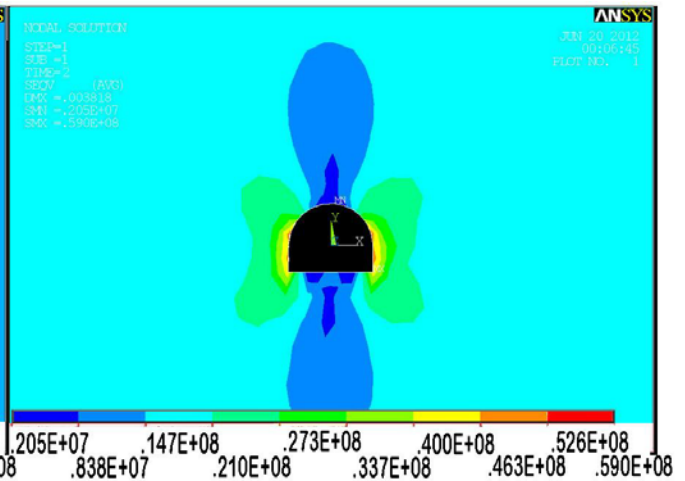
в



г



д



е

Рисунок 2.7 – Распределения суммарных смещений (а, б), вертикальных напряжений (в, г), эквивалентных напряжений по энергетической теории прочности (д, е) в моделях при первом (а, в, д) и втором (б, г, е) вариантах расчета

Так, минимальные вертикальные напряжения по первому варианту (см. рис. 2.7 в) – 65,7 МПа, по второму варианту (см. рис. 2.7 в) – 73,7 МПа, отличаются на 12%. Максимальные вертикальные напряжения по первому варианту – 7321 Па, по второму 6,43 МПа, отличаются на несколько порядков. Причем по первому варианту возникающие напряжения имеют знак «минус», то есть они сжимающие, а во втором случае знак «плюс». Это свидетельствует о том, что в боках выработки возникают сжимающие напряжения, а в кровле – растягивающие. Такой метод расчета более полно отражает действительные напряжения вокруг горной выработки.

Напряжения, рассчитанные по энергетической теории прочности, также отличаются. Максимальные и минимальные напряжения по первому (рис. 2.7 д) и второму (рис. 2.7 е) варианту расчета составляют 51,4 МПа, 5,29 МПа и 59,0 МПа, 2,05 МПа соответственно. То есть максимальные напряжения отличаются на 14,7%, а минимальные на 258%. Причем максимальные напряжения по первому варианту расчета ниже, а минимальные выше, чем по второму варианту.

Таким образом, предлагаемый способ расчета более корректен, информативен и более полно отражает природу геомеханических процессов вокруг горной выработки. Это позволяет сделать вывод о целесообразности его применения при моделировании.

2.2.3 Разработка деформационных моделей геоматериалов

Адекватность расчетных моделей определяется надежным описанием физической стороны происходящего процесса и близкими к натурным величинам результатами расчета. Выше была обоснована целесообразность применения модели, использующей уравнение состояния Друкера-Прагера. Однако любая стандартная расчетная модель имеет некоторые допущения и основана на идеализированных представлениях о моделируемом объекте и свойствах среды. Например, указанная модель не учитывает анизотропию горных пород, неравнокомпонентное объемное поле напряжений в массиве, фактическую зависимость упругих

констант, по сути, не являющихся постоянными, от вида напряженного состояния и величины прилагаемой нагрузки. Для учета ряда случайных факторов применяется метод калибровки, заключающийся во введении и учете некоторой поправочной функции, уточняющей результат расчета и позволяющей приблизить его к натуре. Для получения поправочных функций и коэффициентов необходимо проведение специальных тестовых экспериментов и сопоставление их с результатами расчета. Для проведения моделирования в работе была поставлена задача создания численных математических моделей, которые позволяли бы максимально точно описывать поведение геоматериалов при их объемном нагружении.

Для получения исходных данных в разрабатываемой математической модели было проведено несколько физических экспериментов на УНТС.

В качестве иллюстрации подхода ниже приведен пример разработки деформационной модели угля. Физические испытания проводились на образцах угля марки "К" отобранных на Ш/У «Покровское». Моделировалось напряженное состояние – обобщенное сжатие ($\mu_\sigma = -1$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 3,5$ МПа, σ_1 повышали до разрушения образцов).

Для имитационного моделирования была создана конечно-элементная модель в масштабе 1:1, соответствующая проведенным экспериментам. Моделировался образец угля кубической формы, со стороной куба 55 мм. Три грани куба при одной вершине были жестко зафиксированы от перемещений в трех взаимно перпендикулярных направлениях вдоль соответствующих осей, чем имитировались неподвижные плиты прессы. На свободные грани куба ступенчато прилагалась нагрузка, соответствующая фактической нагрузке от нажимных плит прессы при физическом эксперименте. В ходе расчета МКЭ получали перемещения граней кубического образца на каждом шаге нагружения.

Для проведения сравнительного анализа поведения материала, имитирующего уголь, использовали разные деформационные модели:

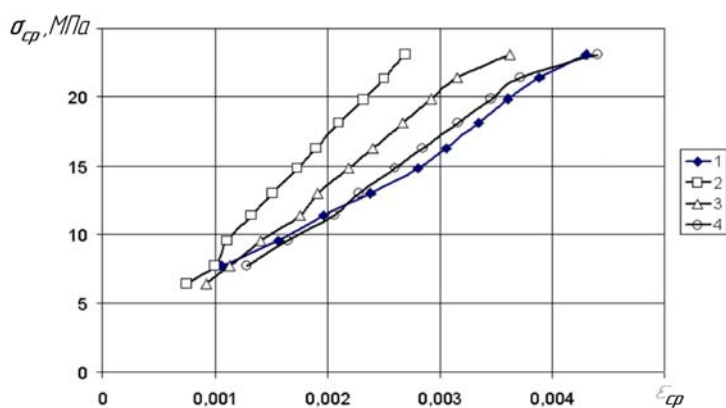
- 1) базовую изотропную упругую модель (исходные данные – модуль упругости, коэффициент Пуассона);

2) базовую изотропную модель Друкера-Прагера (исходные данные – модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения, угол дилатансии);

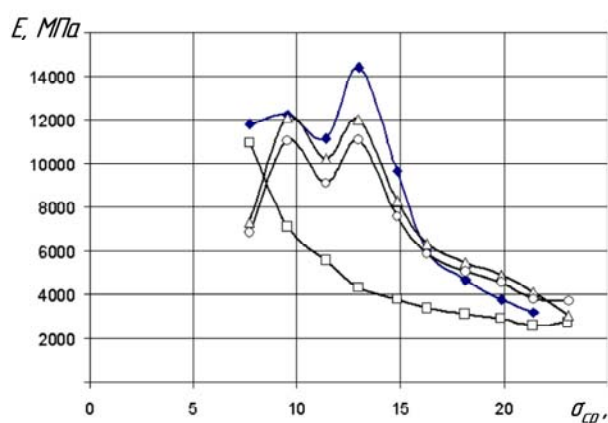
3) модель, модифицированную на основании базовой модели Друкера-Прагера, (исходные данные – модули упругости, коэффициенты Пуассона, модули сдвига, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения, угол дилатансии). В модели задавалась анизотропия модуля упругости, коэффициента Пуассона и модуля сдвига по трем осям. Время при моделировании задавалось неявно – шагами нагружения, расчет выполнялся без выхода из модуля решения.

Для оценки работоспособности предложенной деформационной модели (модель 3) было проведено сравнение полученных результатов моделирования с данными натурального эксперимента. Для анализа результатов по специально разработанной программе рассчитывались тензоры напряжений и деформаций, объемная деформация, средние напряжения, средние деформации, девиаторы напряжений и деформаций, модуль деформации, коэффициент поперечной деформации, энергия изменения объема и энергия формоизменения по данным физического эксперимента и численного моделирования. Результаты расчета приведены в виде графиков на рис. 2.8, из которых следует, что наиболее точно описывают экспериментальные данные расчеты по модели 3.

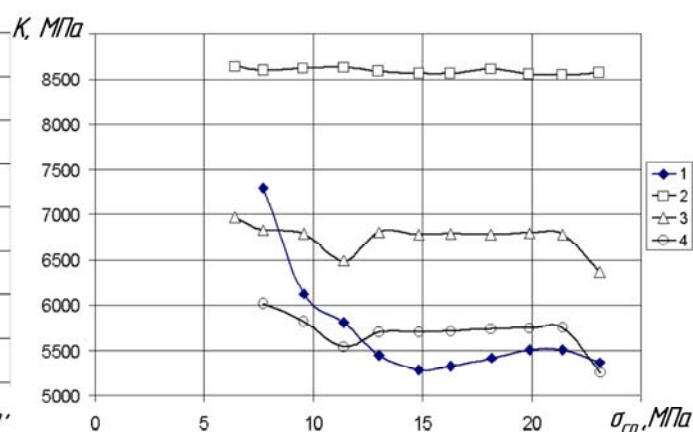
Из рис. 2.8 видно, что использование в расчетах деформационной модели 1 приводит к завышению модуля объемного сжатия в 1,4-1,65 раза и энергии деформирования до 1,32 раза, а также к занижению модуля Юнга на отдельных шагах более чем в 3 раза и изменения объема до 1,34 раза. Характерно, что использование этой модели не только дает существенную количественную погрешность, но и не отражает качественно некоторые зависимости (рис. 2.8 б, в). Моделирование с принятием деформационной модели 2 более качественно описывает эксперимент, однако также дает погрешность 20-30%.



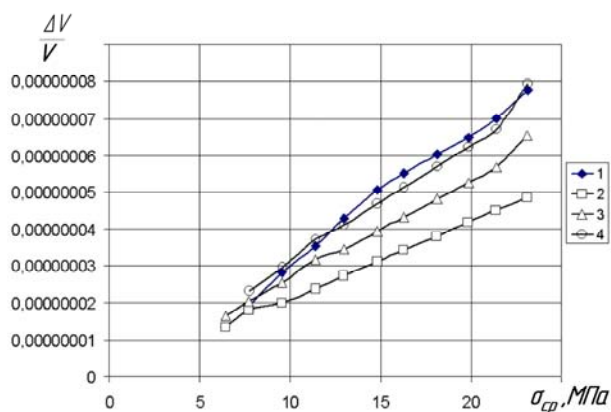
а)



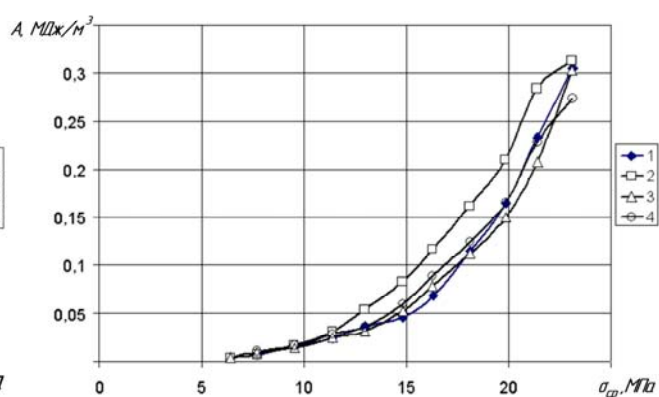
б)



в)



г)



д)

1 – данные эксперимента (—◆—); 2, 3, 4 – результаты расчета по моделям соответственно 2 (—□—), 3 (—△—), 4 (—○—)

Рисунок 2.8 – Результаты имитационного моделирования: а – зависимость сжимающего среднего напряжения от средних деформаций; б, в, г, д – зависимость модуля Юнга, модуля объемного сжатия, изменения объема общей энергии деформирования образца от средних напряжений

Оценка точности расчета для разных деформационных моделей проведена по зависимости среднего напряжения от средних деформаций, на разных этапах нагружения по отношению к результатам эксперимента (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Отношение средних деформаций, рассчитанных при моделировании МКЭ, к данным эксперимента

Средние напряжения, МПа	Отношение средних деформаций при расчете моделей к средним деформациям в эксперименте, %		
	модель 1	модель 2	модель 3
7,71	94,43	106,80	121,26
9,55	71,04	90,28	105,35
11,41	67,31	89,60	105,00
12,98	63,42	80,15	95,64
14,83	61,65	77,95	92,66
16,28	62,10	78,49	93,24
18,13	62,77	79,93	94,46
19,86	64,30	81,10	95,87
21,40	64,26	81,22	95,74
23,10	62,52	84,28	102,22
Среднее	67,38	84,98	100,14

Данные таблицы позволяют сделать вывод, что по зависимости «средние напряжения – средние деформации» погрешность расчета для деформационной модели 1 составляет 33%, для модели 2 – 15%, а для модели 3 – 0,14%.

Причем по мере роста максимального главного напряжения погрешность расчета по моделям 1 и 2 увеличивается. Решение в упругой изотропной среде имеет допустимую (до 10%) погрешность при отношении максимального главного напряжения к двум остальным до 5. Для разработанной деформационной модели на всех этапах, кроме первого, погрешность составляет менее 10%.

Результаты расчета по предложенной модели наиболее точно описывают экспериментальные данные. Проведенные исследования показали, что использование классических деформационных моделей, даже при наличии исходных данных, не позволяет с достаточной точностью описывать поведение геоматериалов в

объемном поле напряжений, являющемся естественным для горных пород. Аналогичные исследования были проведены для разных пород, что позволило разработать их деформационные модели. В том числе была разработана модель для разрушенной породы.

Решение по предложенной методике с разработанной деформационной моделью приведено на рис. 2.9. Общий характер деформирования совпадает с наблюдаемым в горных выработках шахт Министерства энергетики и угольной промышленности Украины. Погрешность расчета величин смещений составляет 12-16%, что подтверждает адекватность расчетного метода.

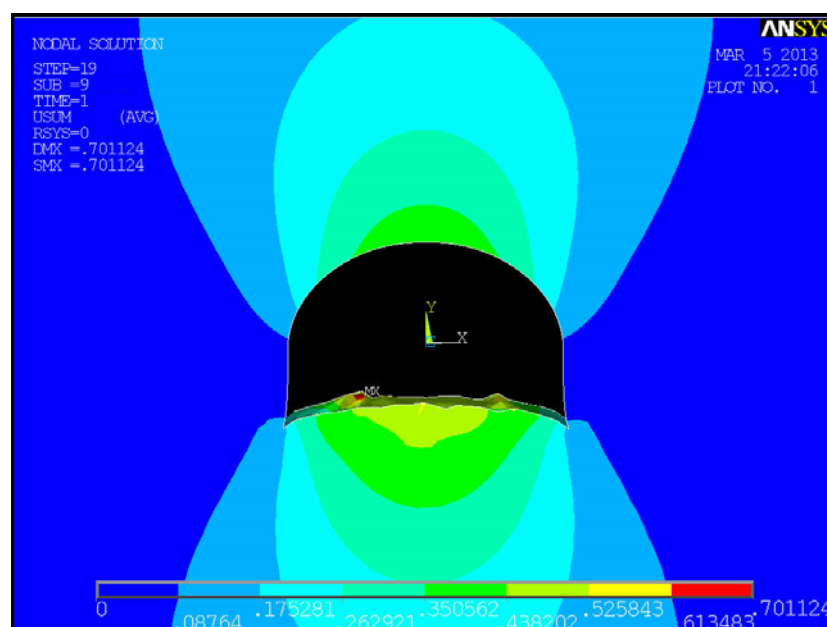


Рисунок 2.9 – Суммарные смещения в модели на последнем шаге решения

2.3 Методика лабораторных исследований на эквивалентных и структурных моделях

2.3.1 Выбор методов моделирования

Одним из основных методов исследований в горной геомеханике является физическое моделирование. Основная задача моделирования – исследование качественной картины изучаемого процесса, анализ и учет влияния различных факторов при прочих равных условиях. Широкое применение получили следующие

методы физического моделирования: метод эквивалентных материалов, метод структурных моделей, поляризационно-оптический метод, метод центробежного моделирования, метод электроаналогий.

Наибольшее распространение получило моделирование методом эквивалентных материалов (ЭМ), основы которого заложены в работах Г.Н. Кузнецова, М.Н. Будько, Ю.И. Васильева [276], Ф. П. Глушихина, М.Ф. Шклярского [277] и др. Этот метод основан на замене горных пород искусственными материалами в модели, показатели физико-механических свойств которых находятся в определенных соотношениях с аналогичными показателями тех же свойств пород природы [276]. Указанные соотношения определяются на основании общих положений теории механического подобия и обеспечивают достижение близкой аналогии в протекании геомеханических процессов, происходящих в природе и в модели.

Метод моделирования ЭМ применяется в случаях, когда имитируемая толща пород представлена квазисплошной средой. Поэтому при изучении динамики развития деформационных процессов и трещинообразования в породном массиве вокруг выработки, поддерживаемой за лавой [278], был использован этот метод.

В тех случаях, когда моделируемая толща пород представляет собой дискретную среду, составленную из системы отдельных блоков, и исследуются отдельные элементы общего механизма изучаемых процессов, целесообразно использовать метод структурных моделей [276]. При этом механические свойства испытываемой системы и ее структурных элементов могут несколько отличаться от показателей определяемых теорией подобия [279], а перемещения элементов модели часто не сопровождаются деформациями или разрушениями отдельных блоков, а выражаются в виде различных поворотов и скольжений блоков друг относительно друга [277]. Поэтому метод структурных моделей был использован при исследовании: закономерностей передачи давления от шпурового заряда НРС через разрушенные породы [280, 281]; особенностей формирования несущей конструкции из отдельных блоков за счет повышения трения между ними [282]; особенностей повышения несущей способности разрушенных пород путем их распора [283].

2.3.2 Моделирование методом эквивалентных материалов

Исследования методом ЭМ проводились на песчано-парафиновых смесях с использованием геометрического критерия подобия и подобия механических характеристик. Масштаб моделирования 1:50. Корректировка рецептуры производилась после испытания образцов на одноосное сжатие на УНТС с двумя незадействованными плитами. На рис. 2.10 а приведены образцы материала модели после испытаний. Для моделирования использовался металлический сварной стенд из 10 швеллера размерами 65x65 см (рис. 2.10 б), внутрь которого закатывали слои ЭМ согласно плану эксперимента.



Рисунок 2.10 – Подготовительный этап исследований методом ЭМ:

а) контрольные образцы ЭМ после испытания на одноосное сжатие; б) общий вид стенда для физического моделирования

С лицевой стороны модель закрывалась плексигласом, который фиксировался швеллерами, стянутыми между собой при помощи металлических шпилек. Затем на поверхность модели производилась установка металлической плиты толщиной 8 мм, на плиту устанавливался домкрат Intertool GT0021 для нагружения модели. Для отслеживания смещений в модели использовались реперы. После каждого шага нагружения производилась фотофиксация смещений реперов с помощью цифровой камеры, установленной на неподвижном штативе. После чего в

программном комплексе Компас производился анализ полученных снимков, выложенных послойно.

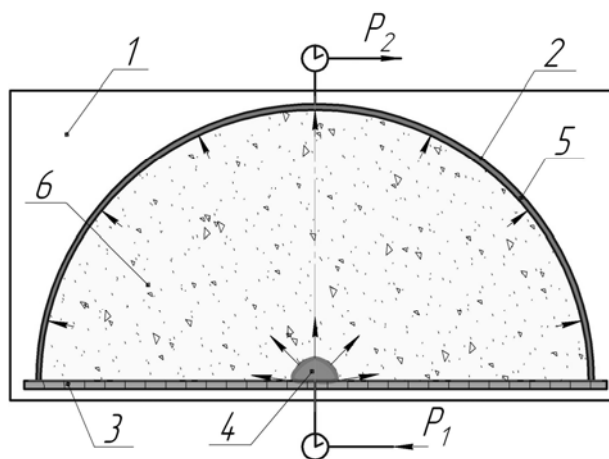
В модели кроме отслеживания динамики смещений контролировалось место возникновения трещин. Для того чтобы определить причину возникновения каждой трещины строилась ситуационная картина в программном комплексе Компас. В этой программе, по вставленной фотографии, наносились контуры массива с подготовительной выработкой, к которой примыкало охранное сооружение; реперы; трещины, которые возникли на данном шаге; направление движения частей массива вокруг трещины от предыдущего шага нагружения к текущему. Кроме того, на ситуационной картине выделялись вывалы и зоны сжатия, которые возникли на данном шаге, и добавлялись вывалы и зоны сжатия, которые возникли между шагами нагружения. Чтобы определить необходимые условия возникновения трещины и вид деформаций, из-за которых она появилась, для каждой ситуационной картины горизонтальных и вертикальных смещений строились линии равных смещений с использованием программы «Surfer».

2.3.3 Структурное моделирование

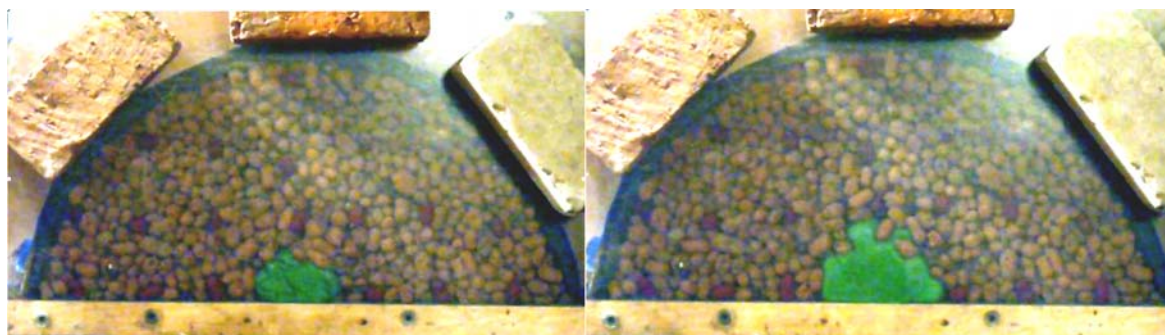
Особенности передачи давления от расширения НРС через дискретную среду исследовались путем моделирования массива, вмещающего шпур с распорным элементом. Задача решалась в плоской постановке, в силу ее осесимметричности моделировалась половина поперечного сечения нормально продольной оси шпура. При моделировании соблюдалось геометрическое подобие. Масштаб моделирования 1:1.

Для моделирования был изготовлен специальный стенд (рис. 2.11), представляющий собой деревянное основание 1, на которое жестко крепились боковая стенка 2 в виде полукруга, выполненная из металлической полосы, и прямолинейная боковая стенка из деревянного бруса 3. В центре условной окружности располагалась рабочая камера №1 4, которая имитировала шпур с НРС. По контуру полукруглой боковой стенки располагалась рабочая камера №2 5, предназна-

ченная для определения давлений на расстоянии равном радиусу полукруга боковой стенки. Внутренняя область модели, между рабочими камерами, заполнялась дискретными элементами – пластиковыми пустотелыми шарами диаметром 5 см, стеклянными шарами диаметром 2 см, горохом со средним диаметром 0,6 см и керамзитом со средним размером 1,6 см. Для удобства контроля смещений дискретных элементов некоторые из них, согласно плану эксперимента, были маркированы с помощью окрашивания (рис. 2.11 б, в).



а



б)

в)

1 – основание; 2 – полукруглая боковая стенка; 3 – прямолинейная боковая стенка; 4 – рабочая камера №1; 5 – рабочая камера №2; 6 – дискретные элементы

Рисунок 2.11 – Принципиальная схема модели (а) и ее общий вид до приложения нагрузки (б), после приложения нагрузки (в)

Перед экспериментом дискретные элементы укладывались в модель и она накрывалась оргстеклом. После этого давление в рабочей камере №1 пошагово повышалось, что приводило к сжатию дискретных элементов и передаче давления, которое фиксировалось рабочей камерой №2, на контур боковой стенки. В ка-

честве рабочего агента использовалась вода. Давление в камере №1 повышалось путем увеличения высоты водяного столба в системе соединенной с камерой №1, а фиксация давления в рабочей камере №2 производилась по высоте водяного столба в системе соединенной с этой камерой. После достижения предельного давления в камере №1, производилась пошаговая разгрузка модели, с контролем показаний давлений в обеих камерах. Фиксация производилась с помощью цифровой видеосъемки модели в плане и данных обеих шкал. Было проведено несколько серий опытов, которые отличались между собой диаметром боковой полукруглой стенки и видом дискретного материала. Диаметр наружной полуокружности, по контуру которой располагалась рабочая камера №2, в разных экспериментах изменялся от 0,25 до 0,5 м. Диаметр внутренней полуокружности (камеры №1) на начало эксперимента составлял 0,055-0,070 м. Таким образом, была получена картина передачи давления через дискретную среду в обоих направлениях.

При исследовании особенностей формирования несущей конструкции из отдельных блоков за счет повышения трения между ними были приняты следующие допущения: породные фрагменты по форме представляют собой параллелепипеды с высотой равной мощности моделируемых породных слоев; породный массив представляется безраспорной сыпучей средой. Равновесное состояние породного массива обеспечивалось за счет приложения распределенной нагрузки по его краям. Был изготовлен специальный стенд, представляющий собой деревянную раму с задней глухой и передней прозрачной стенками (рис. 2.12).

В нижней части стенда были установлены две опоры, имитирующие пролет между распорными элементами. Над этими опорами помещались элементы, имитирующие блоки пород непосредственной кровли, представляющие по форме параллелепипеды из пластмассы с размерами 0,02x0,04x0,007 м, по торцам которых были наклеены отрезки мелкозернистой наждачной бумаги. По бокам стенда размещались распорные элементы, давление в которых создавалось при помощи столба жидкости. Было проведено несколько серий опытов, которые отличались между собой линейными размерами блоков. При постоянной высоте и ширине изменялась их длина в пределах 0,071-0,21 l/B , где B – размер между распорными эле-

ментами. В каждом эксперименте было несколько опытов при изменении количества слоев от 1 до 3.

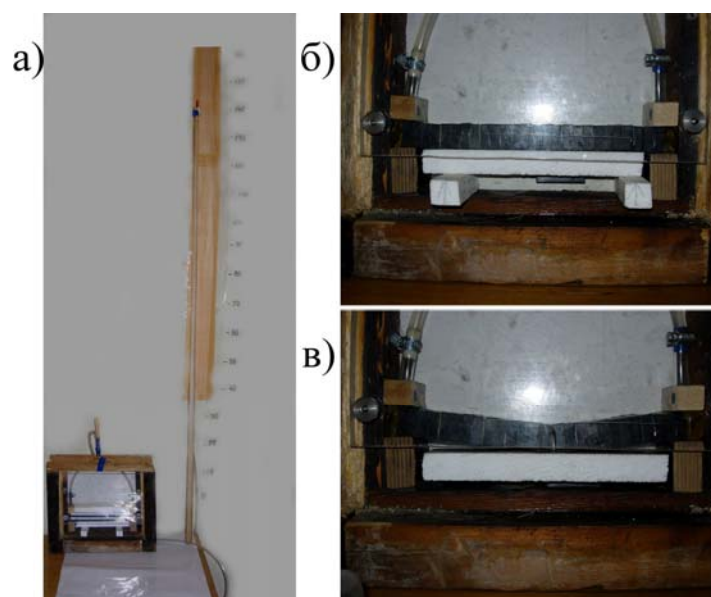


Рисунок 2.12 – Стенд для проведения структурного моделирования:

а – общий вид; б – состояние модели до потери устойчивости блоков устойчивости (размер блока 0,14 l/B , 1 слой); в – состояние модели после потери устойчивости блоков устойчивости (размер блока 0,14 l/B , 1 слой)

Проведение эксперимента сводилось к следующему: блоки укладывались в модель. Создавался распор при помощи столба жидкости. Последующим снижением уровня жидкости определялось минимально необходимое давление для обеспечения устойчивости конструкции.

Исследование физико-механических свойств разрушенных пород при их нагружении в объемном поле напряжений проводилось на установке УНТС по методике описанной в п. 2.1. Испытания проводились на образцах глинистого, углистого и песчаного сланца при фракции 5-10 мм.

2.4 Методика проведения шахтных натуральных наблюдений

Для решения поставленных в работе задач использовались шахтные натурные наблюдения, которые являются одним из основных методов исследования в

горной геомеханике. Шахтные исследования включали: инструментальные наблюдения за смещениями пород на замерных станциях, измерения нагрузки на крепь на участках сопряжения с очистным забоем с помощью динамометров, визуальные наблюдения за состоянием выработок и метод фотофиксации, а также анализ геологических и горнотехнических данных об условиях проведения и поддержания выработок.

Инструментальные наблюдения проводились по двум методикам. Часть наблюдений по методике ВНИМИ [284], а часть – по авторской методике [285]. Измерения по методике ВНИМИ производились на специально оборудованных замерных станциях. Контурная станция состояла из четырех реперов. Два репера устанавливались соосно в кровле и почве в центре выработки, а два – по бокам на высоте 2,0 м от почвы. В части экспериментов репер представлял собой отрезок металлического прута из арматурной стали диаметром 0,032 м и длиной 0,5 м, на конце которого для удобства измерений был приварен крючок. В другой части экспериментов оборудовались контурные замерные станции с марками на раме крепи в кровле и в боках выработки над угольным пластом. Для установки марки в раме с помощью пилы запиливалась канавка шириной 1 мм. Затем в канавку укладывался отрезок стальной проволоки, после чего кромки канавки вальцевались.

Реализация описанного способа затруднена или невозможна при загромождении выработки горно-транспортным и вспомогательным оборудованием. Описанный способ контроля состояния горной выработки не позволяет отследить динамику процесса перемещения контура выработки в пространстве, что снижает информативность полученных данных о смещении горных пород, может привести к искаженному восприятию происходящего физического процесса и неверной трактовке полученных результатов.

Поэтому был разработан и запатентован способ контроля состояния горной выработки [285]. Предложена методика его использования для обеспечения возможности определения пространственного перемещения замерных точек, назначенных на контуре выработки, во времени, при повышении достоверности и информативности контроля с сокращением затрачиваемого времени на измерения

[286]. Осуществлена проверка работоспособности описанного способа в лабораторных и шахтных условиях, в выработках с загроможденным рабочим пространством. Разрешения МакНИИ, на применение приборов для его реализации, приведены в приложениях Б.

Для измерения нагрузки, действующей на охранное сооружение и крепь, на участке сопряжения с лавой, были установлены комплексные измерительные станции по методике описанной в [287], передвигаемые по мере подвигания забоя лавы, оборудованные динамометрами 45Д–135, а также реперными точками в кровле и почве лавы (рис. 2.13). Станции располагались на сопряжении по линии эквидистантной продольной оси штрека по ряду стоек, оконтуривающих охранную полосу на участке от забоя лавы до места погашения запасного выхода.



Рисунок 2.13 – Замерные станции, оборудованные динамометрами

Динамометры устанавливались под деревянные и гидростойки, что позволяло фиксировать динамику роста давления во времени и в зависимости от производственных процессов в лаве. Измерение конвергенции по реперным точкам позволяло отследить динамику смещений во времени. Для визуальной оценки состояния выработок применялся метод фотофиксации. Разрешение МакНИИ на применение фотоаппаратуры приведено в приложении В.

Выводы по разделу 2

1. Разработана методика определения фазового состояния растворов НРС в процессе гидратации методом ЯМР-спектроскопии.
2. Разработана методика определения физико-механических свойств НРС в типичных деформационных режимах с помощью УНТС.
3. Разработана методика определения физико-механических свойств НРС в условиях шпуровых и скважинных зарядов, а также стенд для проведения испытаний [262].
4. Обоснована методика лабораторных исследований термокинетических характеристик НРС с соблюдением критерия теплопроводности.
5. Разработана методика исследования влияния электрического поля на скорость гидратации НРС и установка для ее реализации.
6. Разработана и протестирована методика численного моделирования геомеханических процессов с учетом их нелинейности.
7. Разработаны деформационные модели горных пород на основе базовой модели Друкера–Прагера, учитывающие анизотропию модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента поперечной деформации, а также дилатансию.
8. Обоснованы методики лабораторных исследований методом эквивалентных материалов и структурных моделей.
9. Разработан и запатентован способ контроля состояния горной выработки [285], позволяющий определять пространственное перемещение замерных точек на контуре выработки, в том числе в условиях загроможденности выработки.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРОВ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

3.1 Частные задачи исследования

Эффективное применение НРС в условиях подземных горных выработок возможно исключительно после адаптации их режима работы под специфические условия и особенности технологического процесса. Необходимо учесть температурный режим горных пород, предусмотреть возможности регулирования давления расширения НРС, управления скоростью гидратации и динамикой структурообразования, сокращения времени разрушения.

Повышение эффективности работы НРС предлагается развивать по двум направлениям: искусственным воздействием физическими полями и химическим способом. Способы физического воздействия предложены на основании результатов лабораторных экспериментов. Подбор химических добавок и разработка модифицированных смесей велись на основании анализа представлений о природе расширения вяжущих и рецептурах современных НРС на основе оксида кальция, приведенных в 1 разделе. Базовым составом, к которому велся подбор добавок, был выбран НРВ-80. В качестве добавок на этапе поисковых исследований применялись хлорид алюминия, сахароза, гидрокарбонат натрия, спирт, аммиак, перекись водорода, йод, этановая кислота, гумат натрия и основные пластификаторы ЛСТМ, СП-6 и Sika BV 3М. Их содержание составляло 5 масс. %. Анализ влияния добавок проводился по изменению объема, температуры НРС и росту давления расширения. В табл. 3.1 приведены данные, отображающие скорость гидратации смесей НРС с различными добавками.

Эксперименты по определению давления расширения показали, что при добавлении 5 масс. % перекиси водорода, давление через 24 часа снижается на 32% относительно базовой смеси. При добавлении 5 масс. % C_2H_5OH , аммиака, йода давление расширения снижается на 5-7%, то есть, пропорционально массовой доле добавки.

Таблица 3.1 – Время начала роста объемных деформаций смесей НРС с добавками

Наименование добавки	Перекись водорода	Гумат натрия	C_2H_5OH	Аммиак	СП – 6	ЛСТМ	Sika BV 3M	Без добавок	Йод	$NaHCO_3$	Этановая кислота	Сахароза	$AlCl_3$
Время, мин	189	165	158	146	140	133	132	129	126	110	34,4	17	6

Введение в раствор $NaHCO_3$ в количестве 5 масс. % практически не влияет на максимальную величину давления расширения, хотя и приводит к изменению динамики его роста. Остальные добавки приводят к повышению давления. Максимальный эффект наблюдается при введении сахарозы и $AlCl_3$. Их добавление вызывает резкое повышение скорости гидратации, так как эти вещества являются катализаторами реакции. При этом растет максимальная температура смеси, до $270\text{ }^{\circ}C$, причем настолько резко, что расширение происходит в процессе смешивания, что не позволяет приготовить смесь и произвести зарядку шпуров. ЛСТМ влияет в основном на эксплуатационные характеристики смесей. Таким образом, на этапе поисковых исследований, для дальнейшего детального анализа были отобраны этановая кислота, гумат натрия, СП-6, Sika BV 3M.

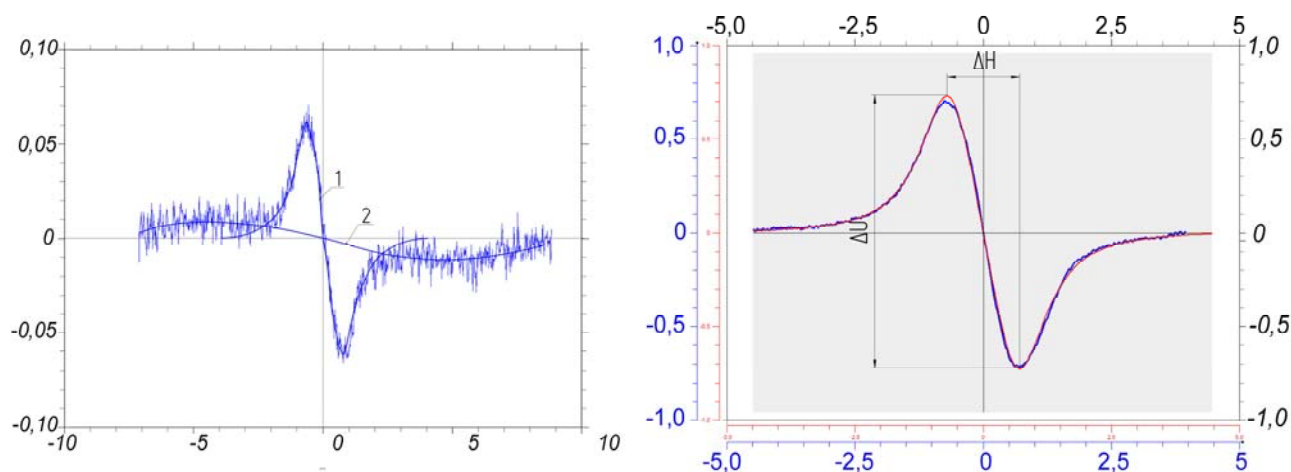
Управление процессом структурообразования НРС может быть проведено только после определения основных закономерностей гидратации базовой смеси, включающих изменение фазового состояния раствора, динамику роста давления, термокинетические процессы.

3.2 Кинетика гидратации и фазовое состояние раствора

Применяемая в экспериментах аппаратура, описанная в 2.1.1, позволяет изучать полный спектр ЯМР на водороде. В растворе НРС сразу после его приготовления водород находится в химически несвязанном состоянии в молекулах во-

ды. В ходе реакции гидратации водород переходит в химически связанное состояние в гидроксиде кальция, что вызывает уменьшение количества резонирующих ядер в структуре вещества; скорость реакции может быть определена по интенсивности изменения ширины и амплитуды линии поглощения. На автодинном ЯМР-спектрометре использована дифференциальная методика регистрации спектров [254]. Производится запись первой производной спектра поглощения.

На рис. 3.1 а приведен спектр ЯМР ^1H , помещенного в пробирку прореагировавшего НРС, представляющего собой порошок, полученный измельчением материала в твердой фазе, извлеченного из стенда для испытаний НРС. Приведенный спектр образован узкой (лоренцова форма) 1 и широкой 2 (гауссова форма) линиями. Эти линии, сформированные большими группами атомов водорода, могут быть частично или полностью разрешены, что позволяет применять их параметры (амплитуда, ширина, площадь под кривой) для анализа состояния исследуемого образца. Применялась, специальная методика математической обработки спектров ЯМР ^1H , позволяющая при расчете восстанавливать соотношение его компонент [254].



- 1 – узкая составляющая первой производной спектра поглощения;
 2 – широкая составляющая первой производной спектра поглощения

а)

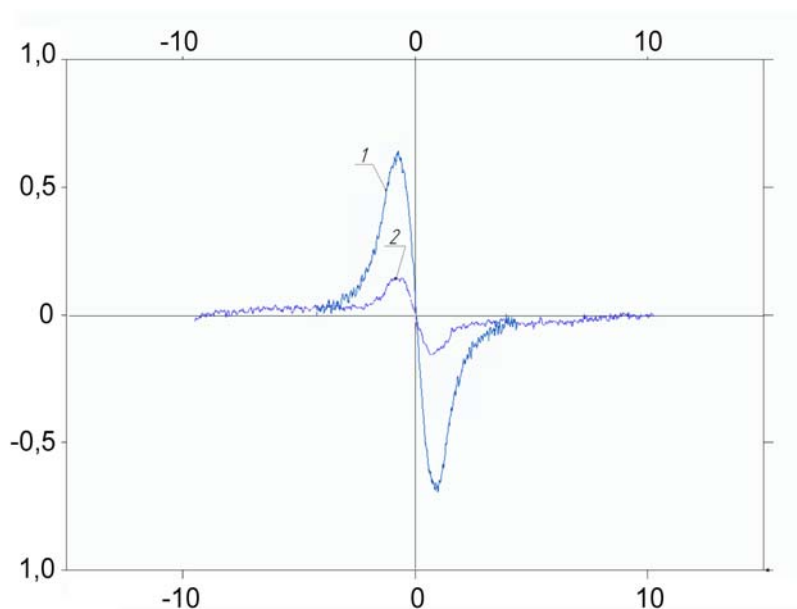
б)

Рисунок 3.1 – Линия первой производной спектра поглощения ЯМР ^1H НРС в твердой фазе (а) и через 60 минут после затворения смеси (б)

Фиксируемый при испытаниях спектр ЯМР ^1H свежеприготовленного НРС в пастообразной фазе, образован линией имеющей лоренцову форму, так как гауссова линия в этом случае имеет ширину больше, чем возможная развертка поля. Типичный спектр ЯМР ^1H в НРС через 60 минут после затворения смеси, а также линия аппроксимации представлены на рис. 3.1 б. Ширина линии спектра $\Delta H \sim 0,75-1,25$ Э, амплитуда $\Delta U \sim 1,4$ В.

Проводить численное сравнение приведенных линий достаточно сложно, поскольку в экспериментах образцы в пробирках имели разную массу и плотность, а образец с измельченным НРС (рис. 3.1 а) имел также фоновую влажность, поскольку перед записью спектра сушка его не производилась. Для обеспечения чистоты эксперимента анализ необходимо проводить на одном образце, проходящем последовательно все стадии гидратации.

На рисунке 3.2 сведены два спектра поглощения ЯМР ^1H раствора НРС, помещенного в пробирку из фторопласта, на моменты его нахождения в пастообразной (30 минут после приготовления) и твердой (26 часов после приготовления) фазах. На протяжении всего эксперимента пробирка не извлекалась из контура магнита.

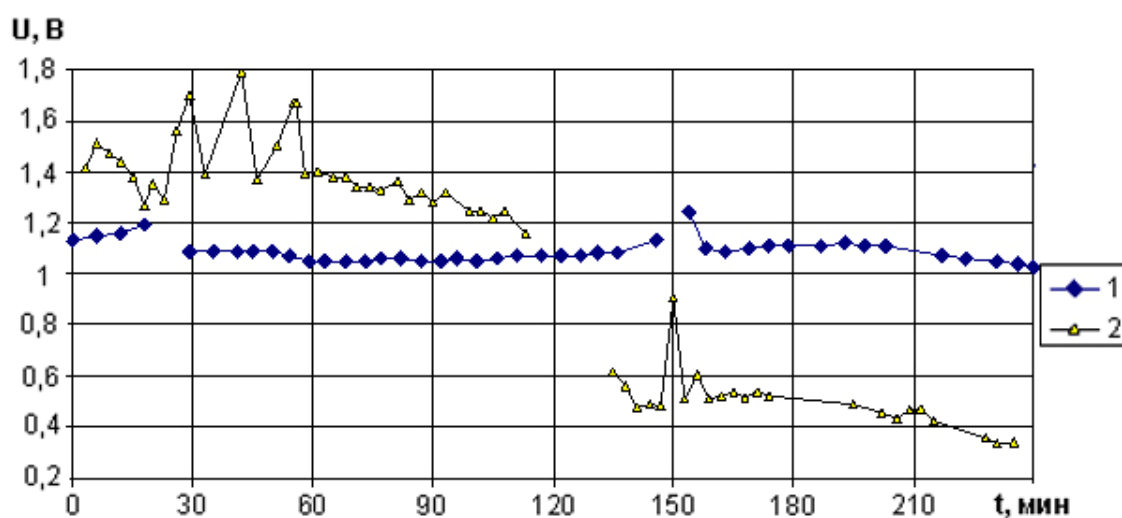


1 – после приготовления (пастообразное состояние); 2 – после затухания гидратации (твердое состояние)

Рисунок 3.2 – Спектры фазового состояния раствора НРС

На ширину резонансной линии оказывает влияние подвижность атомов в исследуемой структуре. Поэтому, с увеличением плотности исследуемого вещества и с повышением закрепленности резонирующих ядер в структуре, наблюдается рост ширины линии поглощения и уменьшение ее амплитуды. Ширина линии 1 (см. рис. 3.2) спектра 1,16 Э и интенсивность сигнала 1,55 В свидетельствуют о нахождении воды в свободной фазе и адсорбированном состоянии. По линии 2 (см. рис. 3.2) спектра прослеживается также широкая составляющая. Ширина узкой составляющей линии 2 спектра 0,932 Э и интенсивность сигнала 0,218 В свидетельствуют о нахождении воды в химически связанном состоянии. Таким образом, по изменению спектра во времени можно судить о протекании реакции гидратации.

Оценку влажности в пробе обычно проводят путем сравнения интенсивностей полученных спектральных линий эталонного и испытуемого образцов. Поскольку в нашем случае широкая линия спектра в пастообразной фазе не прослеживается, а в твердой прослеживается не четко, при этом кривая аппроксимации, описывающая весь спектр только узкой составляющей, имеет достаточно высокий коэффициент корреляции 0,94-0,97; сравнение проводилось по интенсивности узкой линии. Так как превращения происходят в одном и том же образце, оценивалась динамика изменения амплитуды спектральной линии во времени (рис. 3.3).



1 – пробирка из фторопласта; 2 – стеклянная пробирка

Рисунок 3.3 – Изменение амплитуды первой производной линии спектра НРС во времени

Поскольку активные химические превращения происходят в начальный период после приготовления раствора НРС, а затем наблюдается стабилизация и затухание процесса, наиболее интересным с точки зрения анализа фазового состояния является начальный период.

Результаты экспериментов по изучению динамики роста давления расширения [288, 289] позволяют выделить временной диапазон до 4 часов с момента приготовления раствора НРС, на протяжении которого наблюдается начало и наиболее интенсивный рост давления расширения. Исследования [249] показали, процесс гидратации обожженного измельченного оксида кальция с водой при положительных температурах занимает 3,5 – 4,0 ч с достижением тепловыделения 250 – 300 кДж/кг. Поэтому детальные исследования фазового состояния проводились именно в этот период. Проведенные эксперименты позволили установить отличие в протекании процесса гидратации в жесткой оболочке (стеклянная пробирка) и в условиях пластического деформирования (пробирка из фторопласта). Анализ полученных на основании экспериментов кривых, приведенных на рисунке 3.3, позволяет сделать вывод, что в начальный период, 20-30 мин после затворения смеси, происходит непродолжительное повышение амплитуды спектральной линии, то есть, количество свободной воды увеличивается. Исследования на УНТС [289] и в разработанном стенде показывают, что в этот период объем смеси уменьшается, а по результатам испытаний подвижности смеси по расплаву конуса, видно, что ее подвижность увеличивается (рис. 3.4).

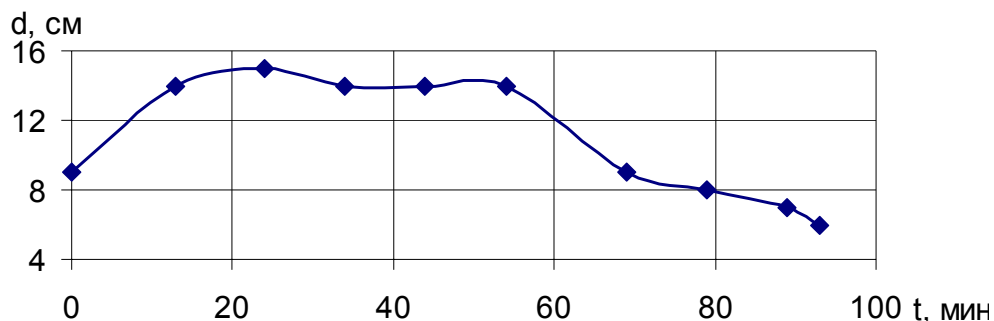


Рисунок 3.4 – График изменение подвижности НРС во времени

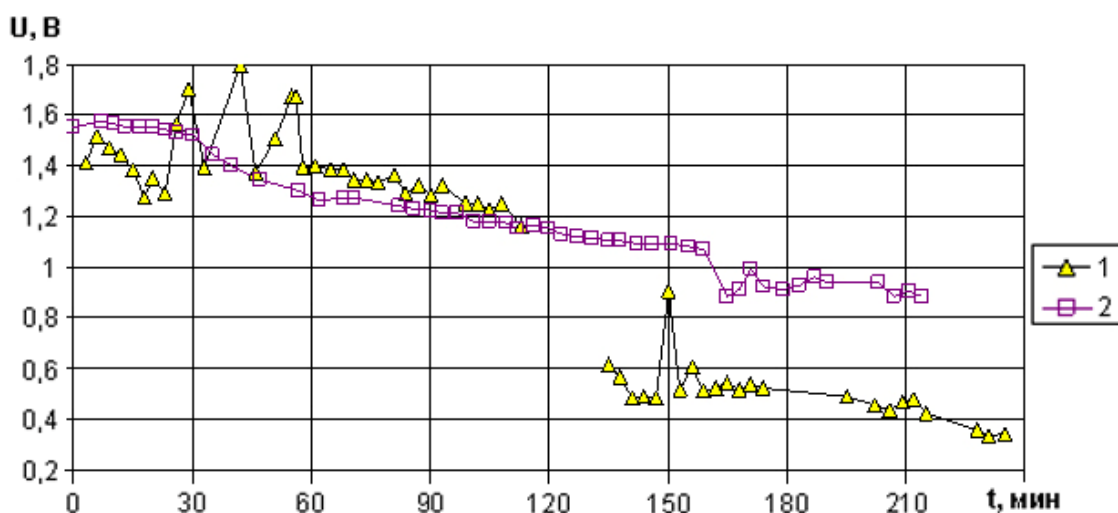
Этот эффект объясняется В.В. Осиним [158] протеканием периодов коагуляции и образования коагуляционных структур. Колебания в течение первых

60 мин соответствуют изменению подвижности смеси в начальный период. Через 60-70 минут процесс стабилизируется. Затем происходит постоянное снижение интенсивности спектральной линии, что характеризует переход воды в связанное состояние и соответствует, согласно [158], процессу перекристаллизации тонкодисперсных фракций и образованию гидроокиси кальция, которое сопровождается увеличением объема смеси.

При исследовании образца в жесткой оболочке происходит рост давления, что приводит к разрушению пробирки, что на кривой 2 (рис. 3.3) характеризуется скачком. Этот период (120-150 минут после затворения) соответствует максимальной скорости гидратации и позволяет констатировать интенсивное изменение фазового состояния воды в растворе НРС (переходе ее из адсорбированного в связанное состояние). НРС при этом переходит в твердую фазу. Аналогичный скачок наблюдается и в пробирке из фторопласта, но он характеризуется первоначальным повышением интенсивности линии спектра, а затем ее спадом. Повышение интенсивности линии спектра можно объяснить ростом температуры при протекании активной фазы реакции гидратации и переходом воды в пар. Дальнейшее активное поглощение воды характеризуется резким спадом интенсивности линии спектра.

Разный угол наклона кривых интенсивности спектральной линии в пробирках из стекла и фторопласта говорит о разной скорости протекания реакции. Анализ показывает, что в условиях жесткой оболочки процесс протекает более интенсивно, что также наблюдается при испытании НРС на УНТС [289]. Рост давления расширения, а соответственно и скорости реакции более интенсивный при нулевых деформациях расширения.

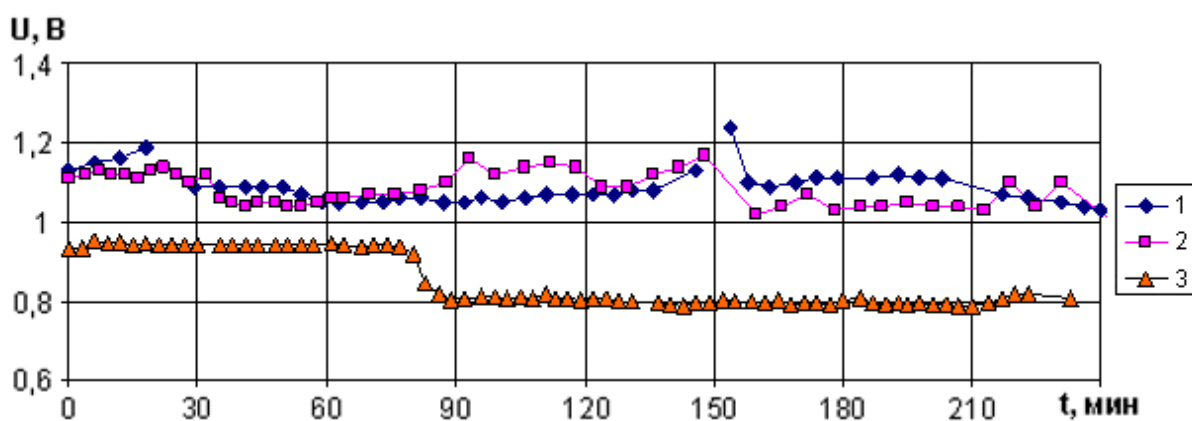
Добавление в состав НРС пластификатора СП-6 приводит к стабилизации процесса гидратации на начальном этапе (60 мин), что характеризуется отсутствием скачков интенсивности спектральной линии в этот период. Добавление СП-6 приводит к незначительному замедлению реакции гидратации, так разрушение пробирки происходит позже, на 159 минуте, что характеризуется скачком изменения фазового состояния на кривой 2 (рис. 3.5).



1 – чистый НРС; 2 – НРС с добавлением 6 масс. % СП-6

Рисунок 3.5 – Изменение амплитуды спектральной линии ЯМР во времени

Практически одинаковый угол наклона кривых интенсивности спектральной линии для образцов чистого НРС и с добавлением СП-6 говорит об одинаковой скорости реакции. Замедление, вызванное добавлением СП-6, отмечается только на начальной стадии реакции. Добавление в состав НРС 2 масс. % гумата натрия существенно не изменяет линию спектра. Отмечается стабилизация на начальном после приготовления смеси периоде и снижение интенсивности на 30-40 минуте (рис. 3.6), что объясняется потерей подвижности смеси в этот период и связано, вероятно, с поглощением воды гуматом натрия.



1 – чистый НРС; 2 – НРС с добавлением 2 масс. % гумата натрия; 3 – НРС с добавлением 0,35 масс. % этановой кислоты

Рисунок 3.6 – Изменение амплитуды спектральной линии ЯМР образцов НРС во времени

Рост активности зерен оксида кальция приводит к последующему «отсыванию» воды, связанной гуматом натрия, что отмечается по линии спектра на 90-120 мин. Изменение фазового состояния отмечается на 150 минуте.

Добавление в состав НРС 0,35 масс. % этановой кислоты приводит к ускорению времени изменения фазового состояния, которое отмечается резким снижением интенсивности спектральной линии на 74 мин (см. рис. 3.6), кроме того, стабилизируется процесс гидратации в начальный после затворения смеси период, что видно по постоянной величине интенсивности линии спектра.

Реакция гидратации оксида кальция является экзотермической. Образование тепла при этом начинается не сразу и нарастает в несколько этапов. Для изучения динамики тепловыделения параллельно с экспериментами на ЯМР-спектрометре были проведены замеры изменения температуры. Для этого в стеклянную пробирку, аналогичную использованной для ЯМР-спектроскопии, помещали НРС, внутрь которой устанавливали зонд электронного термометра ДМ-9231А.

Начало роста температуры в пробирке зафиксировано на 64 минуте (рис. 3.7). Этот период соответствует окончанию периода коагуляции [158] и началу перекристаллизации НРС, что видно из анализа спектров ЯМР.

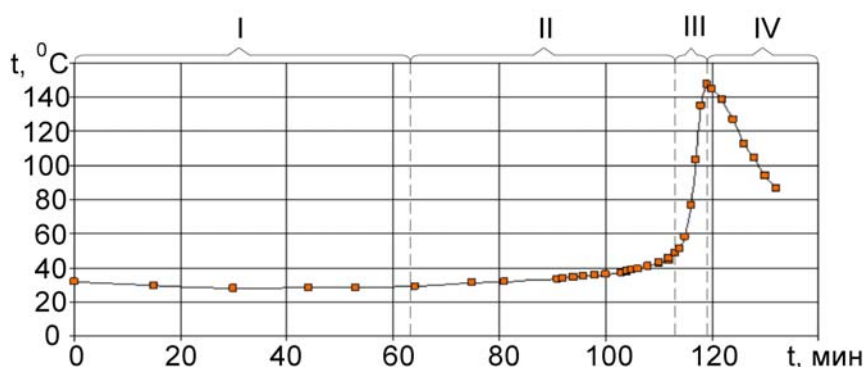


Рисунок 3.7 – Изменение температуры (t , °C) НРС, помещенного в пробирку, во времени и характерные стадии (I, II, III, IV) работы

Дальше наблюдается плавный рост температуры до 113 минуты (рис. 3.7) – в этот период происходит активный переход раствора в твердую фазу. После

этого наблюдается скачок роста температуры до критического значения. Этот этап характеризуется резким возрастанием новообразований $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ с максимальным увеличением температуры и тепловыделения. В этот период наблюдается разрушение пробирки от расширения НРС. Что по времени соответствует скачку на кривой изменения амплитуды спектральной линии ЯМР. Следующим этапом является спад температуры и стабилизация интенсивности спектра ЯМР.

После проведенного анализа можно сделать вывод, что по изменению температуры состава в процессе гидратации можно отследить основные этапы гидратации НРС, а динамика изменения температуры является индикатором скорости роста давления расширения.

Анализ результатов проведенных выше исследований и теорий гидратации извести В.В. Осина [158] и П.А. Ребиндера [181] показывает, что можно выделить четыре характерные стадии работы НРС на основе оксида кальция. Первая стадия характерна пастообразным состоянием раствора. При этом вода находится в свободном состоянии (рис. 3.3), температура смеси стремится к температуре окружающей среды (рис. 3.7), согласно [158, 181] происходит насыщение раствора, образование мелких частиц гидроксида кальция путем непосредственного присоединения воды к зернам оксида кальция, происходит коагуляция с образованием новых коллоидных масс. Наблюдается отток воды, повышение подвижности смеси (см. рис. 3.4), колебания интенсивности спектральной линии ЯМР (см. рис. 3.3). Время протекания этого этапа определяется в основном температурой окружающей среды, температурой смешиваемых компонентов, геометрическими параметрами заполняемой полости и количеством НРС.

Вторая стадия характеризуется переходом материала из пастообразного состояния в твердое. Наблюдается переход воды из свободного и адсорбированного состояния в химически связанное (см. рис. 3.3). На этой стадии рост температуры во времени происходит плавно с постоянно повышающейся скоростью (см. рис. 3.7), и согласно [158, 181] определяется протеканием перекристаллизации оксида кальция в гидроксид. Время протекания этой стадии определяется преимущественно теми же факторами, что и предыдущей.

Третья стадия характеризуется резким скачкообразным ростом температуры до своего максимума во времени (см. рис. 3.7), что является следствием возрастания новообразований $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ с максимальным увеличением тепловыделения. Наблюдается скачок интенсивности спектральной линии ЯМР (см. рис. 3.4) – можно говорить о переходе раствора в твердую фазу. Находясь в свободном состоянии НРС, на этой стадии, достигает максимального расширения и превращается в порошок. В замкнутом объеме этому периоду соответствует максимальный прирост давления расширения. С момента перехода материала из пластифицированного состояния в твердое (вторая и третья стадии работы НРС), рост температуры (T), а соответственно и давление расширения (P) во времени (t), могут быть описаны экспоненциальной зависимостью. Время протекания этого периода практически не зависит от внешних факторов и определяется толщиной помола и химическими добавками НРС.

На четвертой стадии основная часть смеси уже перекристаллизовалась, вокруг кристаллов CaO образовались коллоидные пленки и гидратные оболочки [158, 181], происходит снижение температуры материала (см. рис. 3.7), сопровождающееся незначительным ростом объема имеющем затухающий характер. На этом этапе гидратации по представлениям [158, 181] происходит отслаивание и разрушение гидратных оболочек от кристалла CaO , «отсасывание» более слабо связанной воды и вступление ее в реакцию с не прореагировавшими активными кристаллами оксида кальция, находящимися ближе к центру зерен CaO . Со временем процесс замедляется в силу затруднения доступа воды через оболочки и пленки к не прореагировавшим кристаллам CaO . Время протекания этой стадии работы определяется в основном температурой окружающей среды.

Введение в оксид кальция пластификатора СП-6 вызывает снижение тепловыделения. Снижение теплового эффекта за счет добавки объясняется образованием тончайших пленок, препятствующих проникновению воды к оксиду кальция, которые, по мере увеличения гидроксида кальция, разрушаются. Следовательно, замедление процесса имеет место в начальные сроки. В дальнейшем про-

цесс гидратации происходит в нормальном режиме, что подтверждается анализом спектров ЯМР (см. рис. 3.5).

Введение в оксид кальция этановой кислоты приводит к повышению скорости гидратации состава на первой и второй стадиях и снижению максимальной температуры, а также сокращению времени изменения фазового состояния воды в растворе (см. рис. 3.6).

Добавление гумата натрия вызывает первоначальное связывание воды гуматом, что приводит к потере подвижности смеси и стабилизации процесса гидратации. Повышение активности в процессе перекристаллизации приводит к «отсасыванию» воды из соединения с гуматом натрия и вступление ее в реакцию с кристаллами оксида кальция. Замедление процесса имеет место не только в начальные сроки.

Проведенные исследования позволили установить взаимосвязь стадии гидратации НРС с фазовым состоянием раствора и, соответственно, с расширением твердеющей системы. Установлено, что гидратационное твердение и расширение происходит по-разному в образцах НРС в свободном состоянии и при ограничении объемных изменений. Выявлено влияние различных добавок на протекание процесса гидратации.

3.3 Исследование физико-механических свойств невзрывчатых разрушающих смесей

3.3.1 Лабораторные исследования распорно-деформационных свойств

Основной рабочей характеристикой НРС, определяющей возможность и целесообразность их использования, является давление, развиваемое смесью на стенке полости, в которую она помещена. Краткая эволюция отечественных НРС на основе оксида кальция приведена в разделе 1, а также в виде графика в работе [290]. Анализ позволяет сделать вывод, что за 20 лет применения НРС давление, развиваемое при их расширении, возросло более чем в 3 раза. Так давление, развиваемое отечественным составом НРВ-80 при температуре окружающей среды

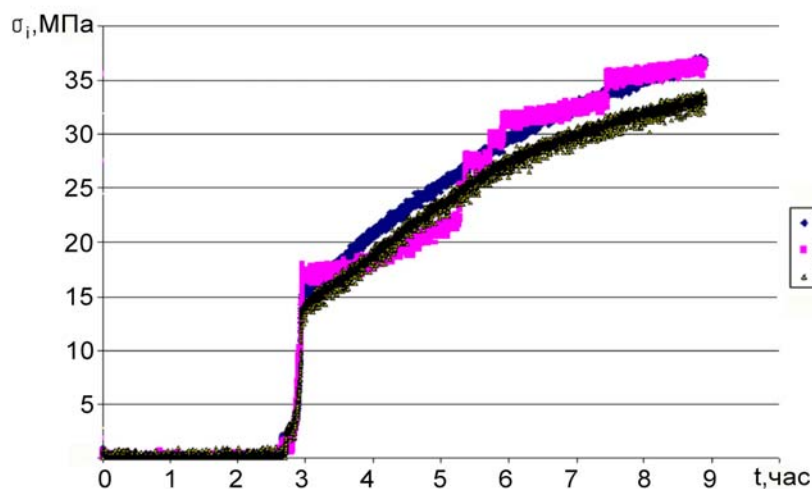
25-35 °С через 24 часа после затворения, по сведениям авторов, достигает 153 МПа. При таких давлениях разрушение большинства горных пород может происходить не только при превышении предела прочности материала на растяжение, но и на сжатие.

Однако практика показывает, что при применении НРС заявляемые давления расширения не развиваются. Это объясняется тем фактом, что указанные в заявках величины получены в идеально жестких условиях, то есть при недопущении объемных изменений, например, при помещении состава в металлические трубы с жесткой пробкой [247]. Однако создание таких условий при формировании шпуровых и скважинных зарядов на практике практически невозможно. Кроме того, стадия разрушения любого материала находится после упругой и пластической стадии деформирования. Поэтому фактические давления, развиваемые НРС, будут зависеть от физических свойств материала, на который производится воздействие, а также технических параметров конструкции шпурового заряда. Кроме того, точность метода измерения давления расширения по деформированию стенок трубы [247] является достаточно дискуссионным вопросом.

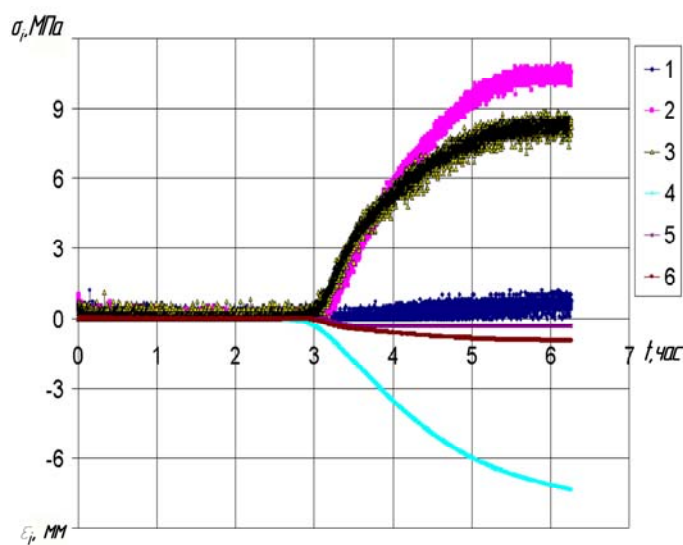
Измерение таких высоких давлений требует применения специальной высокоточной аппаратуры. Одной из лучших установок, позволяющих независимо фиксировать давления во всех трех направлениях, является УНТС. Проведенные испытания на этой установке показали, что максимальное давление расширения НРС было достигнуто при испытании по первой программе, изложенной в п. 2.1, при нулевых деформациях [289]. Графики роста давления по осям во времени приведены на рисунке 3.8 а.

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что рост давления по всем осям происходит равномерно. При температуре окружающей среды в диапазоне 21-22,5 °С активный рост начинается через 2,7 часа, что отображается крутым участком на кривых роста давления, затем графики выполаживаются и скорость роста давления стабилизируется. Давление через 8 часов составляет около 35 МПа. Максимальное давление расширения через 24 часа после приготовления смеси составило 52,5 МПа. Резкий скачок интенсивности набора давления расши-

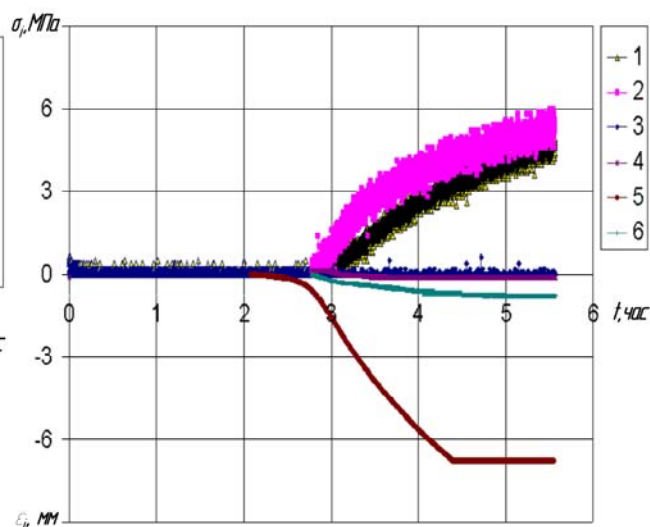
рения НРС в начальный период, наблюдаемый на графиках, (см. рис. 3.8 а) объясняется активной стадией гидратации, а также высоким нижним порогом чувствительности прессы.



а)



б)



в)

1, 4 – напряжения σ_{oy} и смещения ε_{oy} по оси OY;

2, 5 – напряжения σ_{oz} и смещения ε_{oz} по оси OZ;

3, 6 – напряжения σ_{ox} и смещения ε_{ox} по оси OX

Рисунок 3.8 – Графики роста давления расширения и объема образца во времени: а) образец НРС (первая программа испытаний); б) образец НРС (вторая программа испытаний); в) при помещении внутрь образца НРС пластикового шара (вторая программа испытаний)

Результат испытания НРС по второй программе приведен на рисунке 3.8 б. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что начало расширения смеси происходит через 2,5 часа после приготовления, что отмечается по смещению в направлении ОУ. Жесткость гидросистемы пресса по разным осям различна, максимальна она в направлении ОZ, минимальна в направлении ОУ. Жесткость в данном случае определяется сопротивлением системы гидродократ-насос-клапанная группа. Из графиков видно, что рост давления по осям происходит неравномерно, а зависит от сопротивления в соответствующем направлении. Так в направлении ОZ давление через 6 часов составляет 10,6 МПа, а смещения 0,33 мм, в направлении ОX давление – 8,4 МПа, смещения 0,98 мм, а в направлении оси ОУ давление - 0,7 МПа, смещения 7,18 мм. Необходимо отметить, что давление, развиваемое в направлениях ОУ и ОZ через 6 часов после приготовления смеси, отличается более чем в 15 раз, а смещения в этих направлениях более чем в 21 раз. Не происходит выравнивание давлений в испытуемом образце, а рост давления по определенной оси зависит от сопротивления соответствующего гидроцилиндра.

Объяснение полученному эффекту может заключаться в том, что давление на плиты пресса и их перемещения определяются не всем объемом НРС в образце, а некоторой его частью, расположенной в непосредственной близости от нажимной плиты, где создаются различные условия для роста кристаллов гидроксида кальция и форм их взаимодействия. Таким образом, давление расширения не является константой по всему объему. Для проверки сделанного предположения был проведен эксперимент, в котором внутрь образца НРС был помещен пластиковый шар диаметром 24 мм. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.8 в. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что начало расширения смеси, происходит через 2,5 часа после приготовления, что отмечается по смещению нажимной плиты по оси ОУ. Из графиков видно, что рост давления по осям происходит неравномерно, и по своему характеру совпадает с экспериментом без шара. Следует отметить, что рост смещений по оси ОУ наблюдался с большей скоростью, чем в предыдущем эксперименте, так за 4,3 часа были достигнуты смещения 6,78 мм, которые были максимально возможными для фиксации на установке.

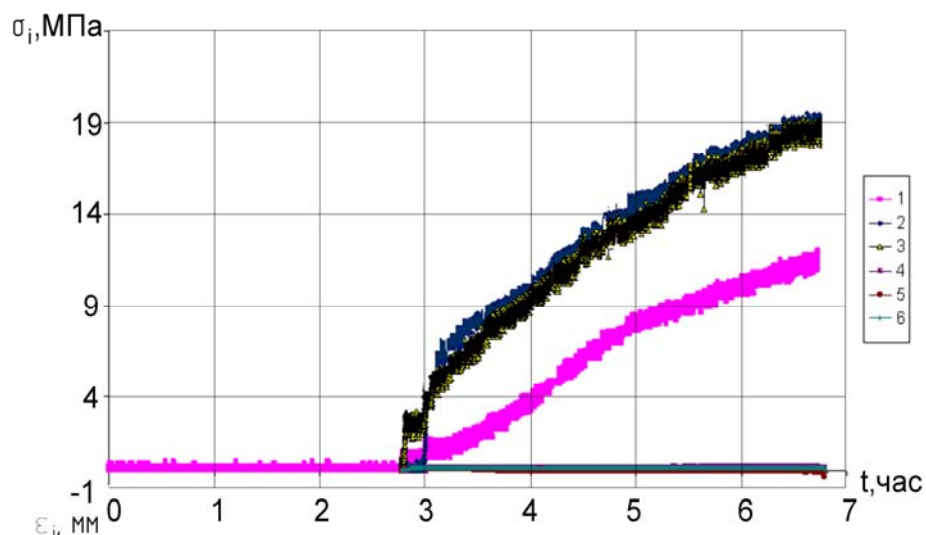
Дальнейшее смещение нажимной плиты в этом направлении привело к открытию камеры и необходимости остановки эксперимента. В направлении OZ давление через 5,5 часов составляет 5,6 МПа, а смещения 0,14 мм, в направлении OX давление – 4,8 МПа, смещения 0,8 мм, а в направлении оси OY давление – 0,1 МПа смещения 9,28 мм. Уменьшение объема НРС на 35% за счет помещения внутрь образца пластикового шара привело к снижению давления по оси OZ на 45%, смещений на 57% , по оси OX на 40%, смещений на 22%, давления по оси OY на 400%, а увеличению смещений на 29%. Таким образом, произошло выравнивание давлений в образце за счет перемещения шара по оси OY в направлении минимальной жесткости гидросистемы, и в направлении OX, что привело к снижению максимального давления по OZ, поскольку энергия была расходована на перемещение шара внутри образца в направлении подвижных плит. Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил верность сделанного выше предположения. Соотношение размеров кубического образца НРС и пластикового шара, а также вид образца в разрезе после разрушения приведены на рис 3.9.



Рисунок 3.9 – Общий вид образца НРС с пластиковым шаром:

а) соотношение размеров кубического образца и пластикового шара; б) вид после окончания эксперимента (образец повернут, горизонтальная ось – OY, вертикальная OX)

Результат испытания НРС по третьей программе приведен на рис. 3.10.



1, 4 – напряжения σ_{oy} и смещения ε_{oy} по оси OY;

2, 5 – напряжения σ_{oz} и смещения ε_{oz} по оси OZ;

3, 6 – напряжения σ_{ox} и смещения ε_{ox} по оси OX

Рисунок 3.10 – Графики роста давления расширения и объема НРС во времени в различных направлениях (третья программа испытаний)

Анализ рис. 3.10 позволяет сделать вывод, что начало расширения смеси, происходит через 2,75 часа после приготовления, это отмечается по росту давлений по осям OY и OX при удерживании их деформаций в нуле. При этом рост давления по осям происходит неравномерно, в направлении OY и OX давления растут с одинаковой интенсивностью и существенно не отличаются по абсолютной величине, а по оси OZ в условиях свободных деформаций нажимной плиты рост давления более плавный, а абсолютные значения давлений меньше, чем по другим осям. Так давление расширения через 6 часов после приготовления смеси в направлении осей OY и OX составляет 17-18 МПа, а по оси OZ при деформациях 0,11 мм – 10,6 МПа. При этом среднее давление по трем осям 15,2 МПа на 46% меньше, чем в условиях ограничения перемещений по всем осям (первая программа испытаний 28,2 МПа). В направлении OY и OX давления снизились по сравнению с первой программой испытаний на 35%. Выравнивание давлений по образцу не произошло, и результаты повторили проведенный ранее эксперимент. Давление в соответствующем направлении определяется сопротивлением среды. Однако было уточнено, что суммарное давление в направлениях ограничения перемещений снижается.

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы. При помещении НРС в замкнутую полость давление расширения и увеличение объема в любом пространственном направлении определяется сопротивлением стенок полости в соответствующем направлении. Рост давления обеспечивает не весь объем НРС в образце, а некоторая его часть, находящаяся в непосредственной близости от границы с полостью, в которую он помещен.

Результаты эксперимента послужили исходной информацией для расчета физико-механических характеристик НРС при расширении (рис. 3.11).

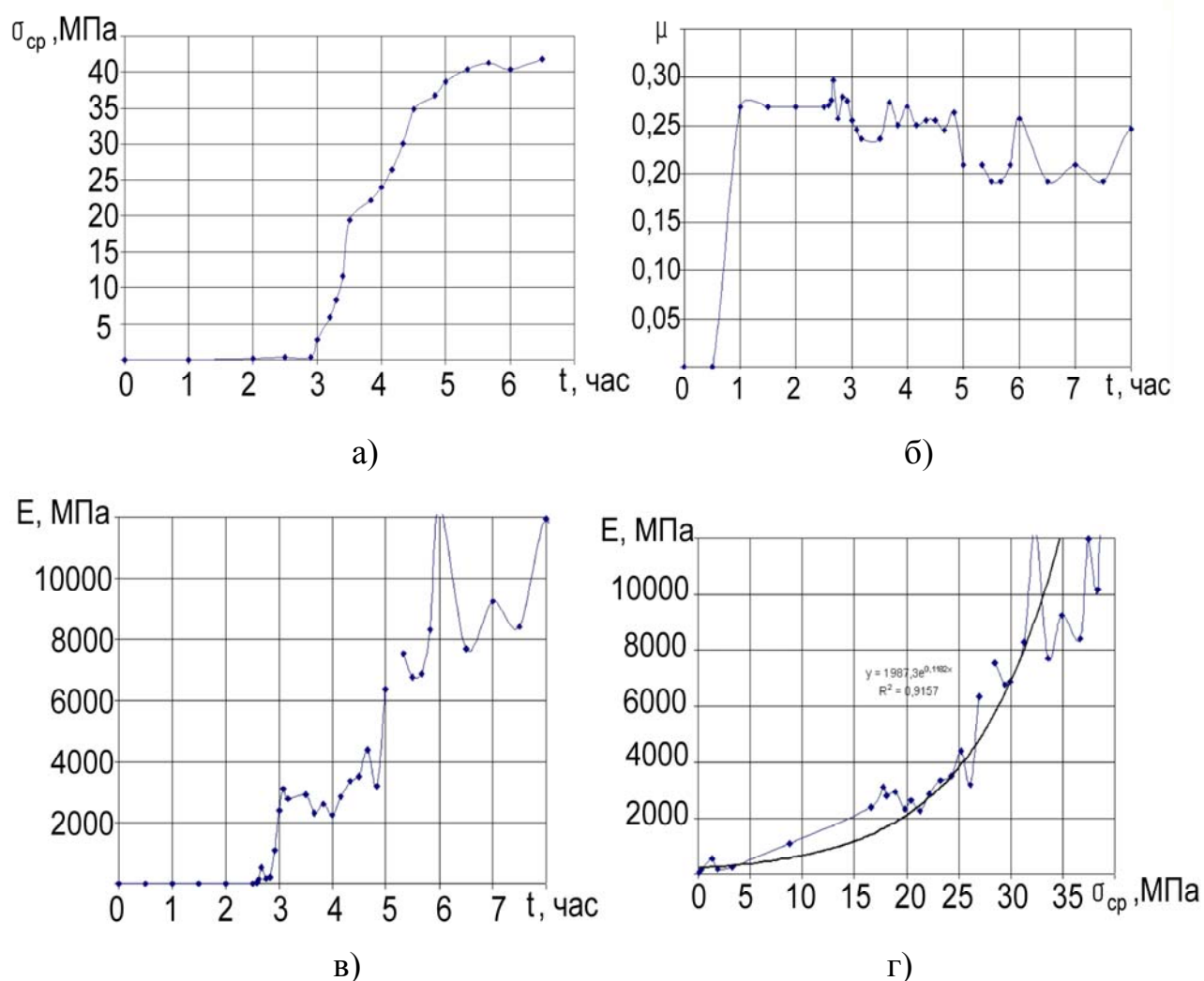


Рисунок 3.11 – Результаты испытаний НРС при расширении по первой программе:

а, б, в – изменение среднего напряжения, коэффициента поперечной деформации, модуля деформации НРС; г – зависимость модуля деформации НРС от среднего напряжения

Из графиков видно, что средние напряжения, вызванные расширением НРС, растут во времени по характеру, аналогично росту составляющих тензора напряжений, и через 8 часов после приготовления НРС составляют 37 МПа. Коэффициент поперечной деформации от расширения НРС при испытании по первой программе изменяется от 0,19 до 0,3, в среднем составляет 0,257. Модуль деформации растет во времени и достигает максимума 120 ГПа, при этом рост модуля деформации коррелирует с ростом средних напряжений, вызванных расширением, и удовлетворительно, с коэффициентом аппроксимации 0,92, описывается экспоненциальной зависимостью $E = 1987,3e^{0,1182\sigma_{cp}}$ (рис. 3.11 г). Такие большие значения величины модуля деформации объясняются программой нагружения, поскольку деформации удерживаются близкими к нулю (в пределах погрешности эксперимента), а напряжения от расширения растут.

Аналогичные построения были проведены для испытаний по второй программе. Результаты представлены ниже в виде графиков на рис 3.12.

Из графиков видно, что средние напряжения, вызванные расширением НРС, растут во времени по характеру аналогично составляющих тензора напряжений, и через 7 часов после приготовления НРС составляют 8,3 МПа при относительных деформациях 5,5%. Коэффициент поперечной деформации при испытании по второй программе изменяется от 0,21 до 0,4, в среднем составляет 0,234. Модуль деформации растет во времени и достигает максимума 180 МПа, что на три порядка меньше, чем при испытаниях по первой программе. При этом рост модуля деформации коррелирует со средними напряжениями, вызванными расширением, и удовлетворительно, с коэффициентом аппроксимации 0,97, описывается логарифмической зависимостью $E = 36,64\ln(\sigma_{cp}) + 97,31$ (рис. 3.12 г). Такое отличие в значениях величины модуля деформации по сравнению с предыдущим экспериментом объясняются тем, что при испытаниях по второй программе деформации и напряжения растут произвольно.

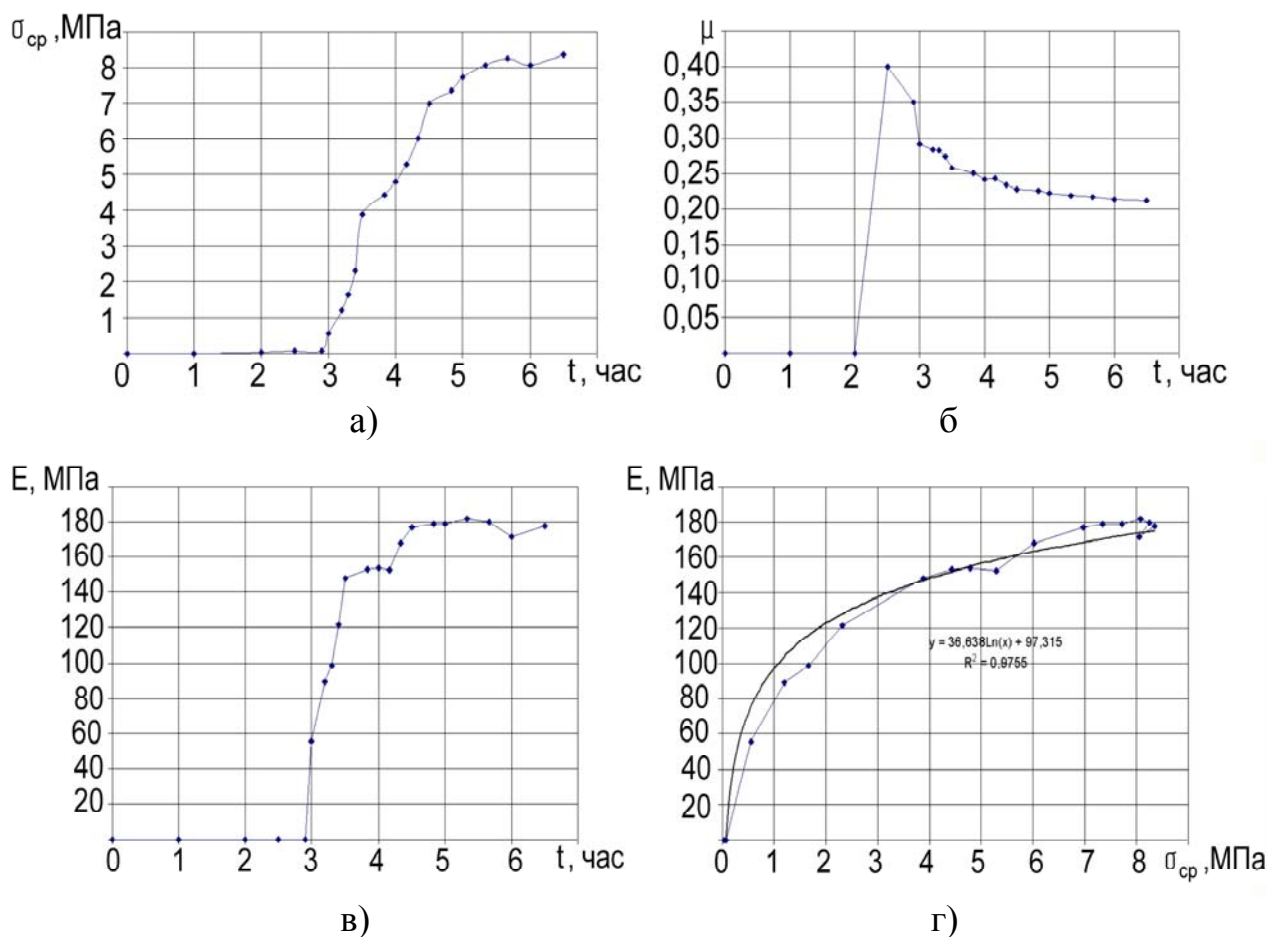


Рисунок 3.12 – Результаты испытаний НРС при расширении по первой программе (максимальные средние деформации 0,055):

а, б, в – изменение среднего напряжения, коэффициента поперечной деформации, модуля деформации НРС; г – зависимость модуля деформации НРС от среднего напряжения

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод, что при расчете параметров разрушения с помощью НРС следует принимать в качестве максимального напряжения, вызванного расширением НРС, значение средних напряжений. Модуль поперечной деформации при расширении НРС независимо от программы нагружения может быть принят 0,235-0,255. При разрушении с помощью НРС значение модуля деформации следует принимать по зависимости $E = 1987,3e^{0,1182\sigma_{cp}}$, так как он находится в шпуре или скважине в условиях близких к моделированию по программе 1. В случае помещения НРС в полость с податливыми стенками модуль деформации может быть рассчитан по зависимости

$E = 36,64 \ln(\sigma_{cp}) + 97,31$. Модуль упругости НРС, исходя из результатов моделирования, находится в диапазоне 20-30 ГПа.

Результаты испытаний затвердевшего в условиях ограничения перемещений по всем осям образца НРС на одноосное сжатие приведены на рисунке 3.13. Из графиков видно, что предел прочности на одноосное сжатие возрастает по мере твердения НРС. Так, через 8 после приготовления он составляет 12,5 МПа, через 16 часов – 18,6 МПа, а через 24 и более часов 32,4 МПа. При этом остаточная прочность составляет 4–6,5 МПа.

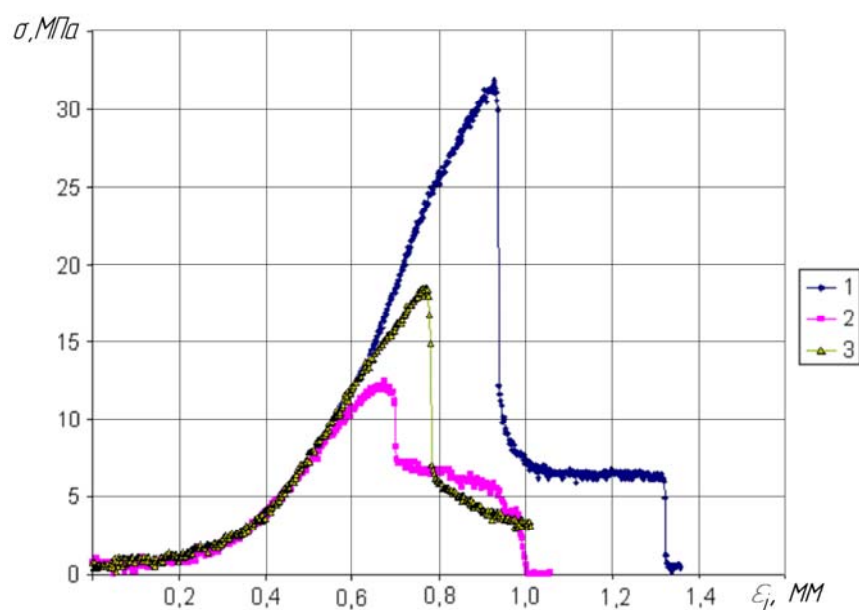


Рисунок 3.13 – Диаграммы деформирования образца НРС в возрасте 24 часа (1); 16 часов (2); 8 часов (3)

Испытание образца НРС в объемном поле напряжений в возрасте 24 часа проводили при виде напряженного состояния обобщенное сжатие [291]. После чего рассчитывали физико-механические характеристики материала. Результаты приведены в виде графиков на рис. 3.14.

Из графиков видно, что предельные средние напряжения составляют 46,5 МПа, что соответствует тензору напряжения $z = 108$ МПа, $x=y=15$ МПа. Объемные деформации при этом составляют 0,015, коэффициент поперечной деформации 0,46, полная энергия деформирования 2,11 МДж/м³.

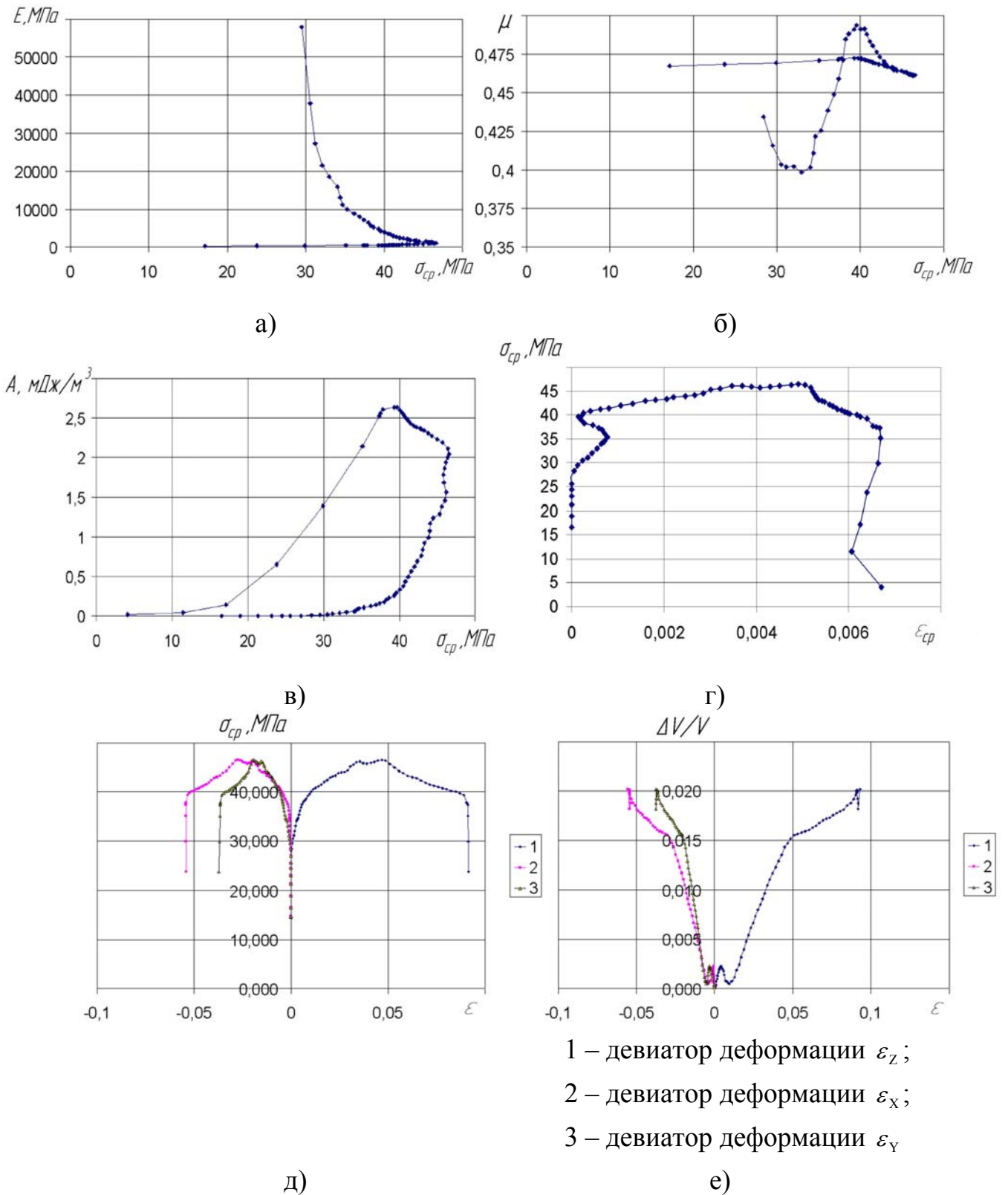


Рисунок 3.14 – Зависимости: модуля деформации (а), коэффициента поперечной деформации (б), общей энергии деформирования (в) образца НРС от средних напряжений; сжимающего среднего напряжения образца от средних деформаций (г); сжимающего среднего напряжения (д) и объемной деформации (е) образца от девиатора деформаций

При средних напряжениях 40 МПа наблюдается изменение угла наклона кривой «нагрузка-деформация» (рис. 3.14 д), что, вероятно, означает переход из упругой стадии деформирования в пластическую.

Далее можно выделить площадку текучести, после чего наблюдается разрушение образца, сопровождающееся падением напряжений и ростом деформаций. Модуль деформации НРС не является константой и изменяется до предела прочности от 57 ГПа до 1 ГПа, а в пределе упругости составляет 4 ГПа. При этом объемные деформации составляют 0,0007, коэффициент поперечной деформации достигает максимума и составляет 0,491, полная энергия деформирования 0,33 МДж/м³.

Поскольку в работе предлагается использование НРС не только в качестве средства разрушения, но и в качестве средства распора, необходимо знать какие давления развиваются смесью при различных объемных изменениях. Подобные исследования ранее не выполнялись. Эксперименты проводились на материале НРВ-80. В результате первой серии поисковых испытаний были установлены давления расширения НРВ-80 в возрасте 24 часа после приготовления при объемных изменениях 16-50%, которые составили 6,0 – 0,31 МПа, соответственно [290]. Результаты приведены в виде графика на рисунке 3.15.

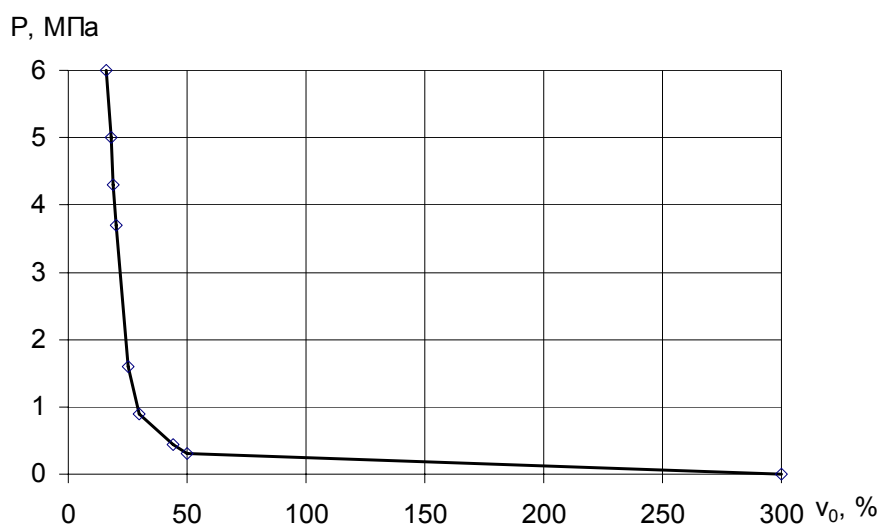


Рисунок 3.15 – График зависимости давления расширения (P) НРС от величины допустимой начальной объемной деформации (v_0)

Также было установлено, что максимальная величина прироста объема НРС в свободном состоянии (в резиновой оболочке) без сопротивления расширению 300%. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что увеличение допустимых объемных деформаций приводит к снижению давления расширения, а эффективный для применения НРС диапазон допустимых объемных изменений ограничивается приростом объема 50%, при котором давление расширения составило 0,3 МПа. Целью второго этапа поисковых исследований [290] было определение режима работы НРС при ограничении объемных изменений последних от 0 до 10%. Из графиков, иллюстрирующих рост давления расширения НРВ-80 и соответствующих ему объемных изменений в течение 24 часов после приготовления смеси (рис. 3.16), следует, что эти показатели имеет одинаковый характер.

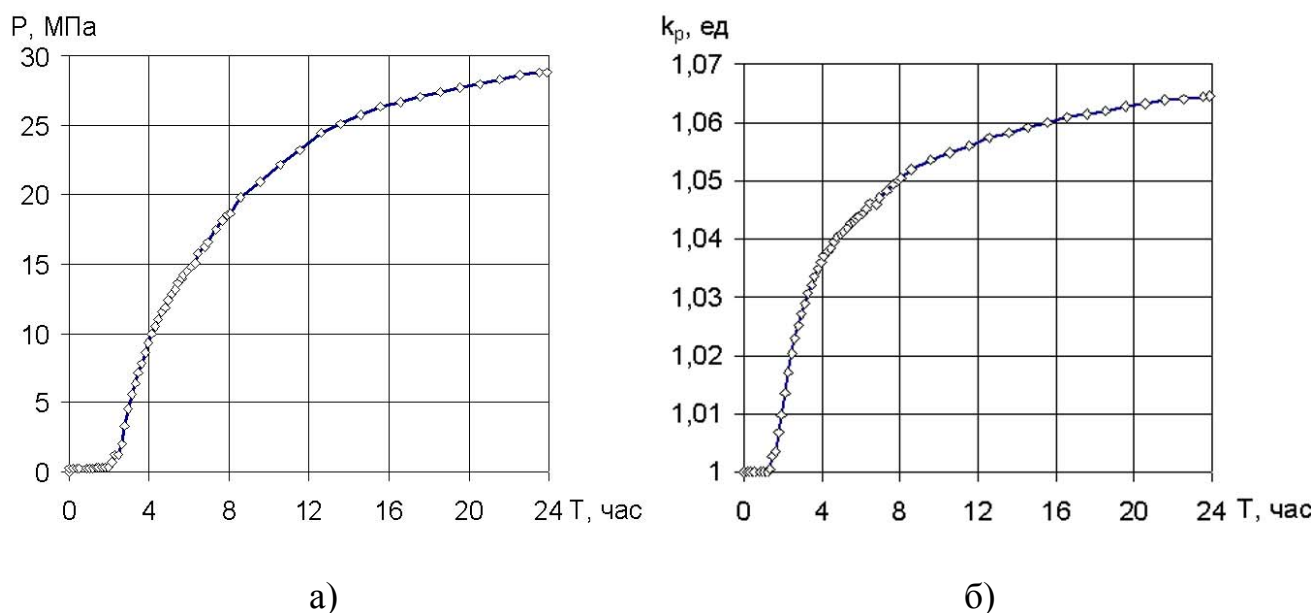


Рисунок 3.16 – Графики роста давления (P) расширения (а) и коэффициента расширения k_p (б) НРВ-80 во времени (T), при отсутствии предварительного нагружения

Через 24 часа после приготовления смеси давление расширения составило 28 МПа, а объем увеличился на 6,5%. Расширение линейно зависит от давления. График зависимости давления расширения НРС от допустимых объемных деформаций (рис. 3.17 а) является одной из основных характеристик смеси с позиций его применения в шпуровых и скважинных зарядах. Его анализ показывает, что

при увеличении объемных деформаций НРС давление, развиваемое смесью, снижается. Интенсивный рост давления начинается при объемных деформациях смеси менее 1,5%. Поскольку определение давлений, развиваемых НРС, проводилось через смещения плит пресса, то удалось установить давления, развиваемые при объемных деформациях до 0,2%. Величина давления расширения материала при этом составляет 52 МПа.

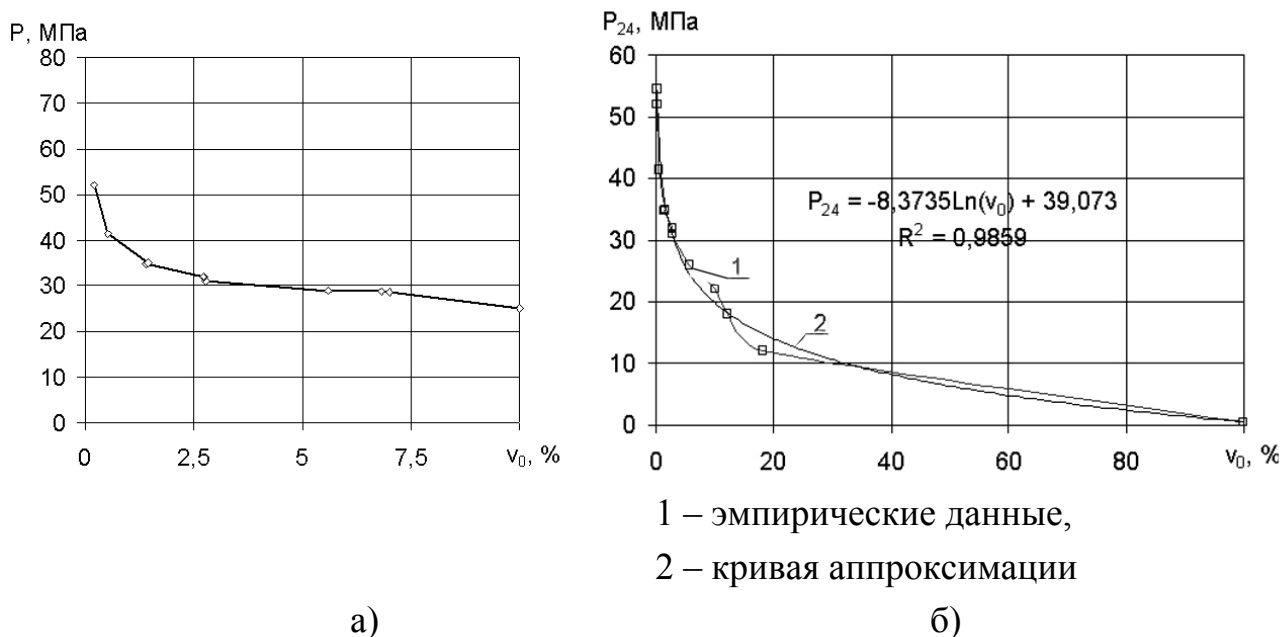


Рисунок 3.17 – Графики зависимости давления расширения НРС от величины объемной деформации через 24 часа после приготовления в диапазоне объемных изменений 0,2-10% (а) и 0,2-100% (б)

Изучение свойств НРС на этапе основного цикла исследований проводилось в стенде [262] в режимах 1 и 2. В результате экспериментов была получена зависимость давления расширения (P_{24}) от величины объемной деформации (v_0) через 24 часа после приготовления при температуре 24 °С: $P_{24} = -8,373\ln(V_0) + 39,073$ (рис. 3.17 б). Построена линия регрессии, аппроксимирующая данные экспериментов с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,98$, это позволяет говорить о надежной связи показателей. Характер работы НРС, особенно в условиях ограничения объемных изменений, зависит от температурного режима, жесткости системы «массив-заряд НРС», диаметра шпура.

3.3.2 Лабораторные исследования термокинетических характеристик не-взрывчатых разрушающих смесей

Сам факт влияния температуры окружающей среды на скорость разрушения объектов с помощью НРС широко известен. В частности, известна закономерность снижения давления расширения НРС при понижении температуры, однако в настоящее время не предложены пути практического использования известных закономерностей. Из анализа [247] видно, что понижение температуры с 30 до 10 градусов приводит к снижению давления на 25-30%, при этом время разрушения объекта сокращается на 60%. Исследования зависимости изменения температуры и объемов образца НРС, находящегося в свободном состоянии в воздушной среде в процессе гидратации [292], позволили установить, что период интенсивного расширения смеси совпадает с ростом температуры. Падение температуры сопровождается весьма незначительными объемными изменениями. При этом увеличение объема НРС происходит несколько позже повышения температуры. Это подтверждает вывод, полученный выше, что индикатором роста объема НРС является повышение температуры. Результаты эксперимента приведены на рисунке 3.18.

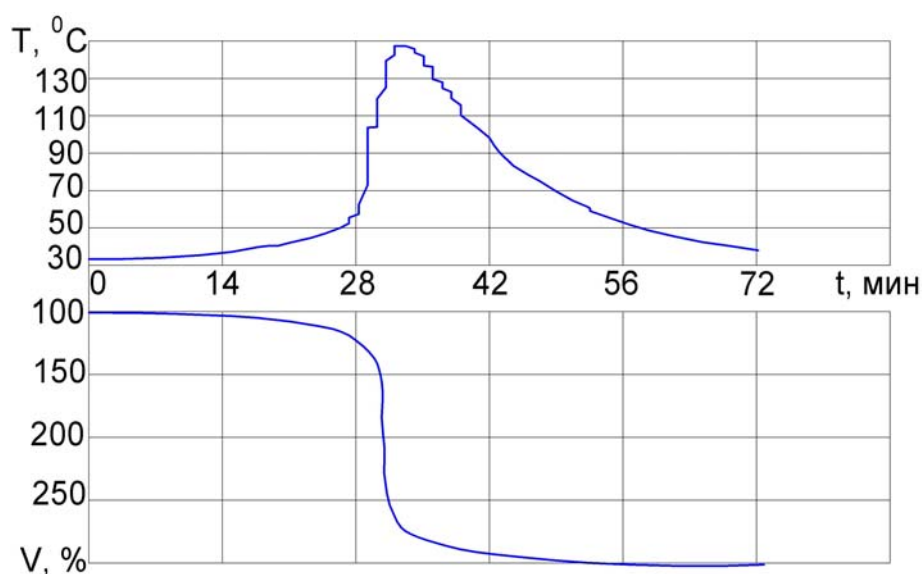


Рисунок 3.18 – Графики изменения объема (V) НРС и его температуры (T) во времени (t)

Описанный опыт был повторен при помещении оболочки с раствором НРС в пятилитровую емкость, заполненную водой. Исходная температура воды 25°C . При этом образец на протяжении 12 часов не нагревался более 37°C и его объем практически не изменился. В возрасте 24 часа образец НРС представлял собой материал с твердостью мела, при этом изменений формы и объема образца не произошло. Проведенный опыт позволил сделать вывод, что рост объема НРС зависит от его температуры.

При отводе тепла, развиваемого в процессе гидратации раствором НРС, скорость реакции снижается, что приводит к замедлению, а при интенсивном охлаждении материала – прекращению его объемных изменений, а следовательно, и давления расширения. Таким образом, не снижение температуры окружающей среды влияет на уменьшение величины развиваемого давления, а интенсивность отвода тепла, выделяемого в процессе гидратации НРС. Объясняется это тем, что увеличение объема материала происходит за счет роста кристаллов гидроокиси кальция в процессе гидратации оксида кальция. При этом одновременно протекают несколько процессов, в частности: изменение кристаллической решетки материала, за счет непосредственно роста размеров и количества кристаллов, переплетение и взаимное внедрение кристаллов и твердение раствора. Снижение температуры НРС в процессе гидратации приводит к замедлению скорости роста кристаллов гидроокиси кальция. Скорость застывания материала при этом не меняется, что приводит к твердению раствора и образованию прочного кристаллизационного каркаса раньше, чем происходят его объемные изменения. Сформировавшийся каркас препятствует росту объема смеси. Это является причиной снижения давления расширения при понижении температуры окружающей среды.

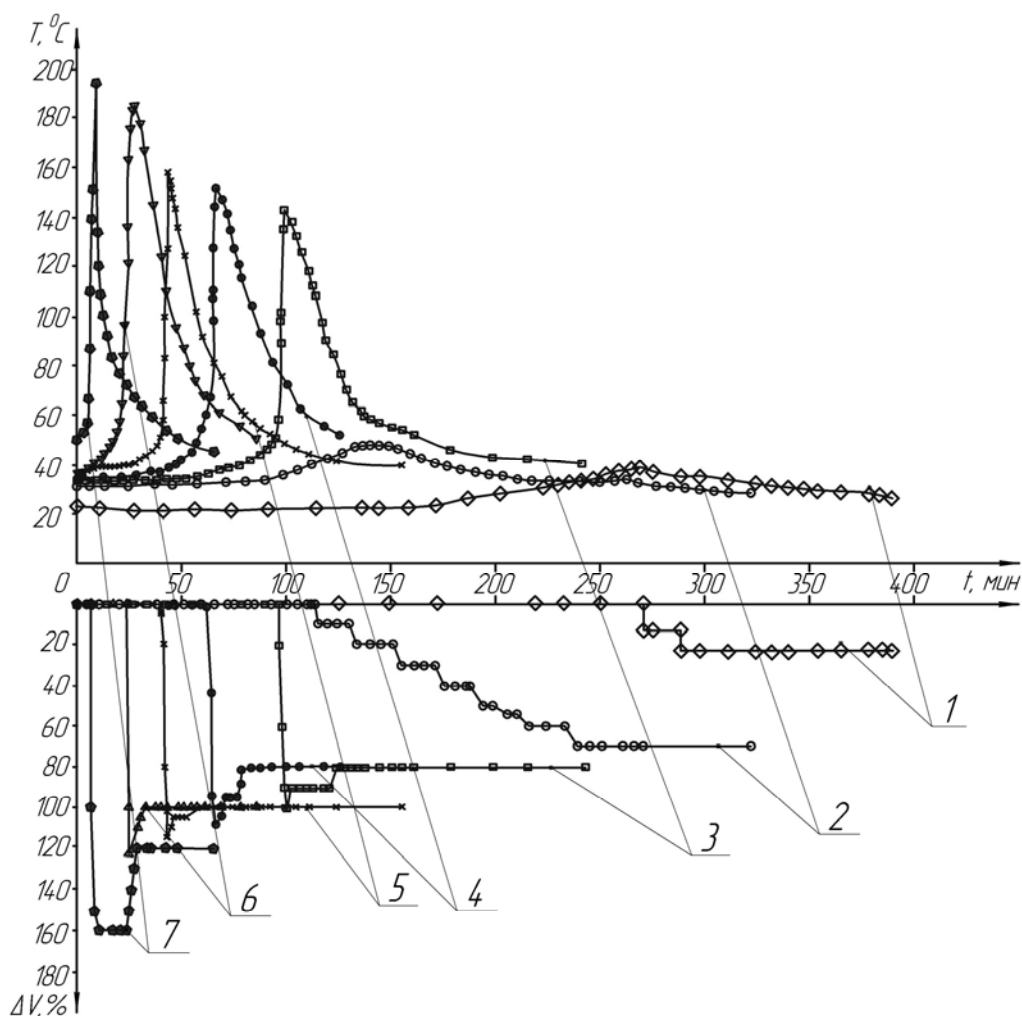
Выдвинутая гипотеза была подтверждена экспериментами [292]. С позиций проведенных исследований, очевидно, что для повышения скорости роста давления расширения и, соответственно, сокращения времени разрушения горных пород, необходимо повышать температуру НРС. Наиболее простым способом является затворение раствора водой повышенной, относительно окружающей среды, температуры. Результаты экспериментов при затворении НРС водой с темпе-

ратурой 2-95% [292] показали, что нагревание раствора на первой стадии от 19 до 42,5 °С, практически не влияет на протекание процесса гидратации, что характеризуется наложением графиков на второй и третьей стадиях работы НРС. Повышение начальной температуры раствора до отметки 47,6 °С и выше приводит к протеканию сразу третьей стадии работы НРС. Начинается активная фаза реакции гидратации с одновременным переходом воды в химически связанное состояние, сопровождающееся резким ростом температуры. Установить приготовленный раствор в шпур и сформировать заряд становится технологически невозможно.

Анализ результатов исследований позволил установить характерную температурную зону изменения режима работы НРС в диапазоне 43-46 °С. При достижении этой температуры наступает третья стадия работы смеси. За этим диапазоном наблюдается одинаковая скорость протекания реакции во всех случаях, и совпадают кривые роста температуры.

Полученные результаты послужили предпосылкой исследования динамики изменения температуры и объема НРС в теплоизолированной емкости с соблюдением критериев подобия теплопроводности Фурье [293] по методике, описанной в п. 2.1. Температура воды при проведении моделирования изменялась в диапазоне 20-50 °С. В течение каждого эксперимента кратковременное отклонение температуры воды от заданной на протяжении опыта могло составлять 2 °С, что связано с технической стороной эксперимента. Температура 20 °С соответствовала рекомендуемому режиму работы НРС. Детально проработан диапазон 30-40 °С, поскольку в этом диапазоне находится температура вмещающих пород большинства шахт. График изменения температуры НРС и его объемных изменений, в зависимости от температуры окружающей среды, приведен на рис 3.19.

Анализ результатов проведенных экспериментов показывает, что повышение температуры окружающей среды приводит к интенсификации скорости гидратации и, соответственно, к увеличению объемных изменений НРС.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – температура окружающей среды 20°C , 30°C , 32°C , 35°C , 37°C , 42°C , 50°C соответственно

Рисунок 3.19 – Изменение температуры (t , $^{\circ}\text{C}$) и объема (ΔV , %) НРС во времени (t , мин)

Так при температуре окружающей среды 20°C , рост температуры НРС начинается через 175 минут после затворения раствора, а объемные изменения через 270 минут. Начало объемных изменений материала начинается при температуре 40°C . Максимальное увеличение объема материала достигает 20% от первоначального, температура НРС возвращается к начальной через 360 минут, изменение объема материала не происходит. При температуре окружающей среды 30°C рост температуры НРС начинается через 90 минут после приготовления, а объемные изменения через 120 минут. Начало объемных изменений материала начинается при температуре НРС около 40°C , что характерно для всех экспериментов.

Максимум достигнутой температуры составляет 45 градусов. Следует отметить, что объем НРС увеличивается плавно в течение 120 минут, несмотря на снижение температуры от 45 °С до 33 °С.

При температуре окружающей среды 32, 35, 37, 42, 50 °С наблюдается другой характер работы НРС, заключающийся в резком скачкообразном повышении температуры смеси при достижении ей 46-50°С и соответственном увеличении объема материала.

Повышение начальной температуры окружающей среды до 32, 35, 37, 42, 50 °С приводит к началу роста температуры НРС через 60, 40, 30, 18 и 4 минуты соответственно, а период интенсивного роста температуры и объема НРС начинается через 95, 64, 40, 18 и 5 минут соответственно. Максимальная температура при этом изменяется от 150 до 195 °С, а объем увеличивается на 100-160%. Графики, характеризующие время начала роста температуры НРС и его объемных изменений при различной температуре материала вмещающего состав, приведены на рис. 3.20.

Анализ графиков, представленных на рис. 3.20 показывает, что время начала роста объема структурных новообразований экспоненциально зависит от температуры материала, содержащего НРС.

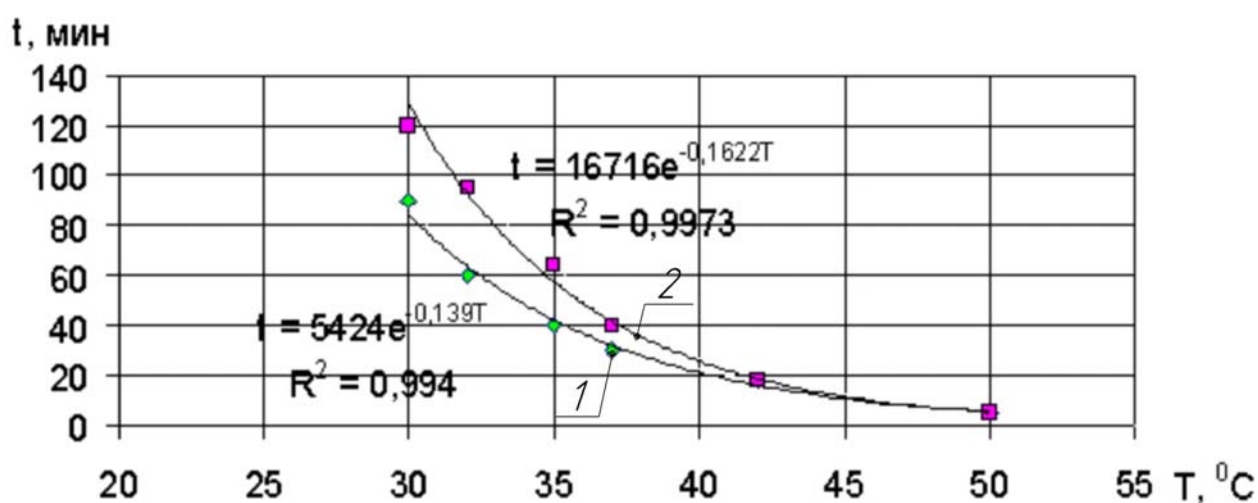


Рисунок 3.20 – Графики зависимости времени начала роста температуры НРС (1) и его объемных изменений (2) от температуры окружающей среды

Время начала активной гидратации НРС, индикатором которой служит температура смеси, при температуре разрушаемого объекта в диапазоне 30-50 °С с коэффициентом корреляции 0,994 описывается зависимостью:

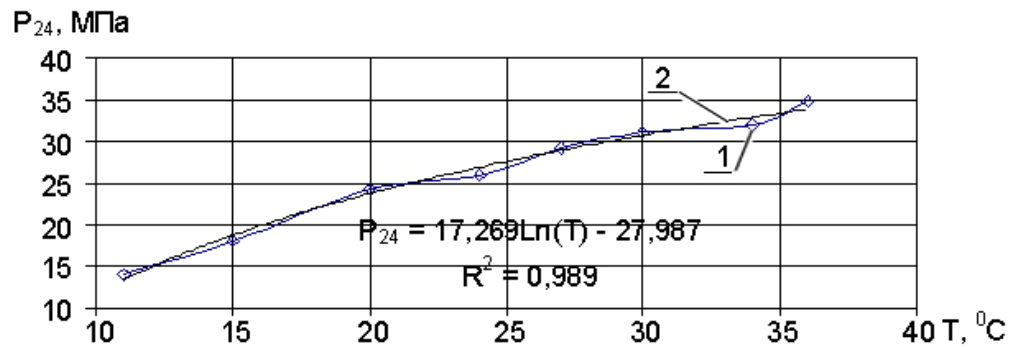
$$t_z = 5424e^{-0,139T}, \text{ мин.} \quad (3.1)$$

Время начала роста структурных новообразований, индикатором которого служит приращение объема материала, при температуре разрушаемого объекта в диапазоне 30-50 °С с коэффициентом корреляции 0,997 описывается зависимостью:

$$t_o = 16716e^{-0,162T}, \text{ мин.} \quad (3.2)$$

После достижения смесью температуры 100 °С начинается выделение парообразных продуктов. Охлаждение оболочки, содержащей НРС, приводит к конденсации пара и уменьшению объема раствора до сухого остатка. Анализ состава парообразных выделений показал, что это водяной пар. Чем интенсивнее рост температуры, тем больший объем выделяющегося пара. Это можно объяснить большим количеством химически несвязанной воды в НРС при повышении температуры окружающей среды. В результате испытаний НРС на стенде [269] в температурном поле 11-36 °С была получена зависимость давления расширения в возрасте 24 часа от температуры при объемных изменениях 6,5-7,2%. Результаты эксперимента приведены на рисунке 3.21.

Из рисунка 3.21 видно, что повышение температуры приводит к росту давления расширения, при этом исследуемая зависимость может быть описана логарифмическим законом: $P_{24} = 17,27 \ln(T) - 27,98$. Линия регрессии, аппроксимирующая данные экспериментов, имеет коэффициент корреляции $R^2 = 0,98$, что позволяет говорить о надежной связи показателей.



1 – эмпирические данные, 2 – кривая аппроксимации

Рисунок 3.21 – Графики зависимости развиваемого давления расширения (P_{24}) от температуры (T) при средней величине объемной деформации 6,8% через 24 часа после приготовления

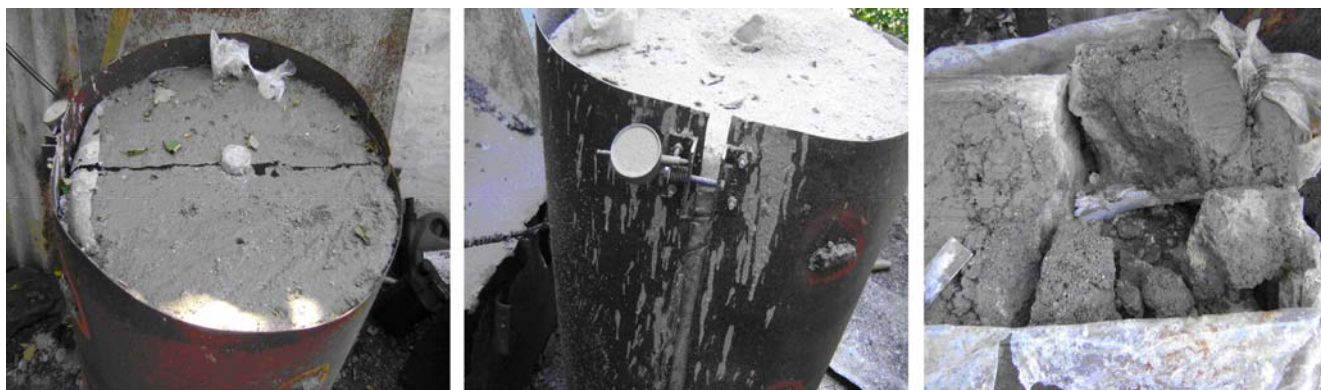
3.3.3 Механизм развития самопроизвольного выброса невзрывчатых разрушающих смесей из шпуров

Широкое внедрение технологий невзрывного разрушения сдерживается сложностью их практической реализации в реальных условиях, поскольку поведение НРС при колебаниях температуры, влажности, соотношения входящих компонентов, степени перемешивания может существенным образом изменяться. Повышение температуры окружающей среды способствует росту скорости реакции гидратации, а поскольку реакция является экзотермической, это зачастую приводит к самопроизвольному выбросу НРС из шпура.

Механизм развития и протекания выброса НРС из шпуров в процессе гидратации и роста напряжений в НРС до настоящего времени изучен недостаточно. Для исследования процесса «вышпуривания» НРС был проведен опыт по разрушению блока бетона цилиндрической формы [294]. В качестве формы для заливки бетонной смеси использовалась металлическая обойма диаметром 1 м и высотой 1,2 м, разрезанная вдоль. По центральной оси обоймы устанавливалась составная тонкостенная пластиковая труба диаметром 45 мм, имитирующая шпур. После твердения бетонной смеси в течение 28 суток во внутреннюю трубу заливали при-

готовленный раствор НРС (рис. 3.22). Температура окружающей среды составляла 32 °С.

Через 2 часа после помещения НРС в шпур произошел выброс смеси, который затронул устьевую часть шпура на глубину 40 см. Разрушение бетона наблюдалось в донной части, из которой НРС не был выброшен. В результате расширения НРС произошло дробление бетона на отдельные фрагменты размерами 10-40 см.



а)

б)

в)

Рисунок 3.22 – Общий вид модели:

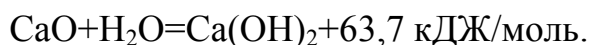
(а) до эксперимента; (б) после выброса НРС; (в) после разрушения бетона

Для исследования механизма развития выброса были проведены эксперименты с измерением температуры НРС в процессе гидратации штыревым зондом электронного термометра DM-9231A. При этом один образец НРС помещался в отрезок пластиковой трубы, а второй – в резиновую тонкостенную оболочку при температуре окружающей среды 35 °С. Анализ результатов показывает, что кривые роста температуры в опытах имеют схожий характер. Это объясняется одинаковой природой физико-химических превращений в смеси, независимо от условий среды, в которой она находится. Однако, при этом время интенсивного роста температуры и, соответственно скорости гашения оксида кальция, отличается в два раза, что объясняется различными теплофизическими свойствами окружающей среды в первом и втором случаях. При сопоставлении роста температуры НРС с объемными превращениями было замечено, что интенсивный прирост объ-

ема смеси начинается при достижении 40 °С. После 50 °С отмечается резкое повышение скорости роста температуры.

После достижения смесью, размещенной в трубе (образец №1), 100 °С произошел ее выброс из верхней части. Этот процесс сопровождался громким хлопком. Наблюдалось временное снижение температуры НРС. В дальнейшем температура в течение нескольких минут поднялась до отметки 145 °С, после чего снизилась в течение 26 минут до уровня окружающей среды.

При достижении смесью в резиновой оболочке (образец №2) 100 °С началось выделение парогазообразных продуктов, объем которых составил около 400% первоначального объема раствора. После этого происходила конденсация пара на стенках оболочки и уменьшение объема НРС до сухого остатка. Смесью нагрелась в течение нескольких минут до 147 °С, после чего в течение 35 минут происходило снижение температуры до уровня окружающей среды. Проведенные эксперименты [294] позволили сделать вывод, что образующиеся парогазовые выделения являются водяным паром. Анализ формулы реакции основного компонента НРС оксида кальция с водой подтверждает верность сделанного вывода. При водопорошковом соотношении равном 0,3 исходные вещества реагируют без остатка с образованием гидроксида кальция.



Введение в состав НРС химических добавок для стабилизации гидратации будет способствовать прибавлению продуктов испарения веществ-добавок к водяному пару. Однако, учитывая незначительное содержание примесей в растворе НРС (2-7 масс.%), концентрация их будет весьма незначительна.

Таким образом, существующие НРС способны развивать давления в условиях, близких к идеально жестким, до 52 МПа. Увеличение объема НРС при расширении приводит к снижению развиваемого давления, а недостаточное усилие расширения НРС вызывает большие затраты на бурение. В первые 8 часов после приготовления НРС развивает 65-70% максимального давления расширения. Такой продолжительный период роста давления является серьезным недостатком

при разрушении смесями горных пород, особенно в условиях подземных горных выработок. Высокая чувствительность НРС к температуре, температурный режим работы, ограниченный диапазоном $+5\dots+25$ °С, существенно затрудняют применение НРС для разрушения горных пород, температура которых, как правило, выше верхней границы указанного диапазона. В таких условиях происходит непроизвольный выброс НРС из шпуров.

3.4 Направления повышения эффективности работы невзрывчатых разрушающих смесей в условиях подземных горных выработок

3.4.1 Совершенствование режимов работы с помощью физических полей

Исходя из описанных выше недостатков НРС, применительно к разрушению горных пород, основными задачами являются: повышение давления расширения, сокращение времени набора давления, предотвращение непроизвольных выбросов и повышение рабочего диапазона температур.

Единственным путем повышения эффективности работы НРС, применяемым в настоящее время, является регулирование гидратации химическим способом. В условиях нормальных положительных температур попытки повышать скорость гидратации путем введения в состав НРС химических добавок, имеющих экзотермическую реакцию с оксидом кальция, приводят к неуправляемому росту скорости реакции, следствием чего является самопроизвольное выбрасывание НРС из шпуров. Введение в состав замедлителей позволяет стабилизировать скорость гидратации, однако увеличивает время разрушения и снижает усилие расширения.

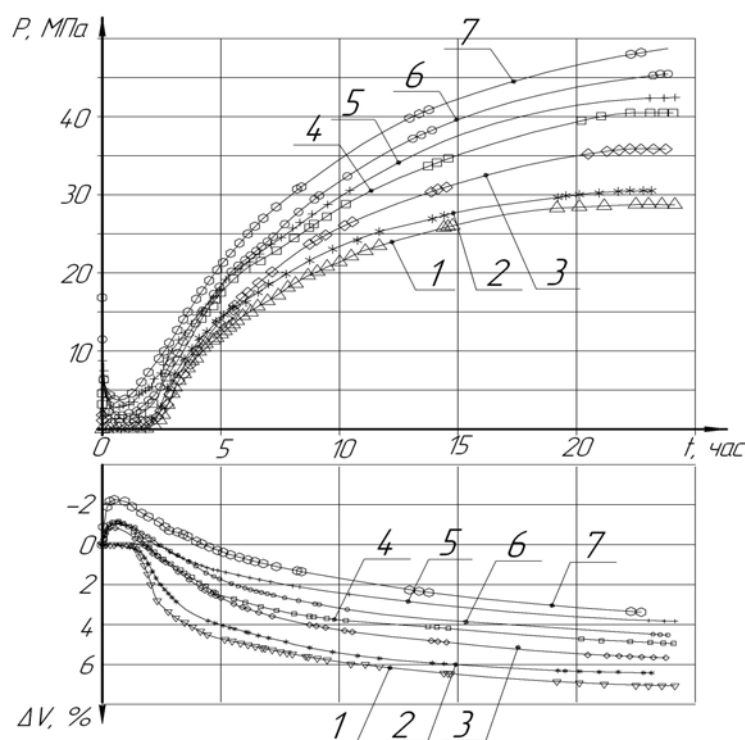
Указанные недостатки регулирования скорости гидратации введением в смесь химических добавок, вызвали необходимость разработки новых концептуальных направлений повышения эффективности работы НРС.

Одним из путей, позволяющих повысить давление расширения, является ограничение объемных изменений смеси, так как величина возникающего напряжения НРС обратно пропорциональна коэффициенту его объемного расширения [290]. В работе предлагается еще один путь – предварительное сжатие смеси НРС

в шпуре, что позволяет повысить давление расширения и ускорить его рост. Для повышения скорости гидратации НРС предлагается воздействие с помощью электрического поля. Сокращение вероятности развития непроизвольных выбросов НРС и расширение диапазона температур предлагается достигать за счет регулирования теплообменных процессов, разработки модифицированных смесей, имеющих сниженную термическую активность.

3.4.2 Повышение эффективности работы невзрывчатых разрушающих смесей с помощью предварительного сжатия

Исследования проводились по методике, описанной в 2.1.2 в режиме 3 [288]. Графики, иллюстрирующие изменение давления расширения и объема НРС в течение 24 часов после затворения при различной величине предварительного сжатия, приведены на рисунке 3.23.



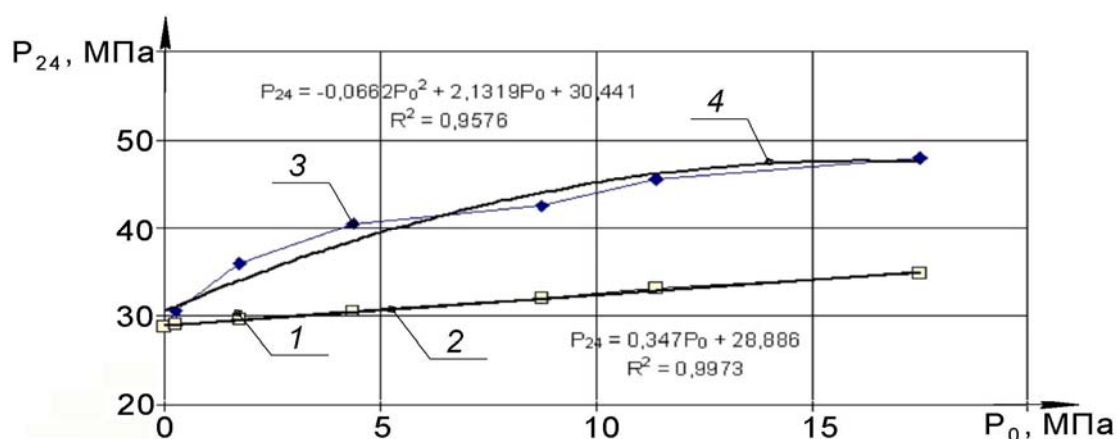
1 – без предварительного сжатия; 2, 3, 4, 5, 6, 7 – при предварительном сжатии 0,26 МПа, 1,75 МПа, 4,37 МПа, 8,75 МПа, 11,37 МПа, 17,5 МПа соответственно

Рисунок 3.23 – Графики зависимости давления расширения (P) и объемных изменений (ΔV) НРС от времени при предварительном сжатии

Через 24 часа после приготовления смеси давление расширения, при отсутствии предварительного нагружения, составило 28,72 МПа, объем раствора увеличился на 7,0%. При предварительном сжатии смеси с давлением 17,5 МПа давление расширения составило 48 МПа, при увеличении объема 3,34%. Предварительное нагружение 17,5 МПа привело к росту давления в возрасте 24 часа на 19,28 МПа, при этом давление 28,72 МПа было достигнуто через 8,4 часа, то есть почти в 3 раза быстрее.

Активный рост структурных новообразований, зафиксированный началом прироста объема НРС при отсутствии предварительного нагружения, был отмечен через 85 минут, а при предварительном сжатии 17,5 МПа – через 40 минут, то есть быстрее более чем в 2 раза. Это позволило предположить, что увеличение предварительного сжатия НРС приводит к повышению скорости гидратации оксида кальция. Закономерности роста давления расширения и сокращения времени начала активного роста объема, характеризующего скорость гидратации смеси, характерны для всего исследованного диапазона увеличения предварительного сжатия.

Оценить полученный эффект можно сопоставив графики зависимости давления расширения НРС от пригрузки блокирующего устройства, ограничивающего его объемные изменения, и предварительного сжатия (рис. 3.24).



1, 3 – результаты лабораторных экспериментов; 2, 4 – корреляционные кривые

Рисунок 3.24 – Графики зависимости давления расширения НРС в возрасте 24 часа (P_{24}) от пригрузки блокирующего устройства (1, 2) и предварительного сжатия (3, 4)

В исследуемом диапазоне предварительное сжатие НРС позволяет повысить давление, развиваемое в возрасте 24 часа в 1,05-1,37 раза, а максимальный эффект наблюдается в диапазоне 0-4 МПа.

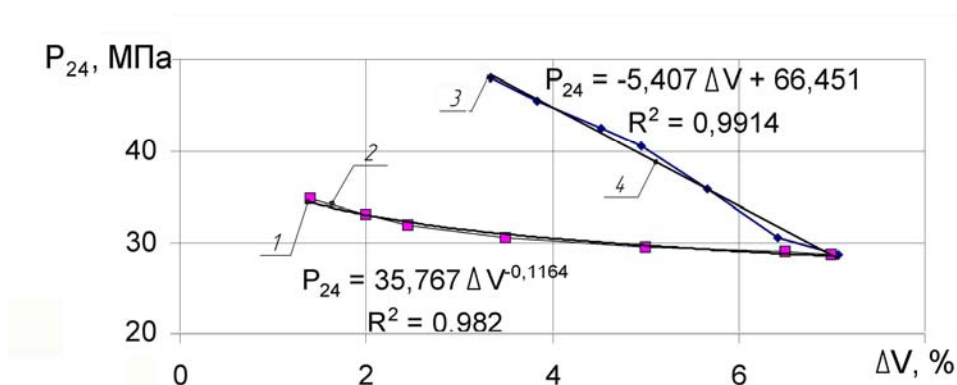
При ограничении объемных изменений с помощью блокирующего устройства, давление расширения линейно зависит от величины пригрузки и удовлетворительно, с коэффициентом корреляции 0,997, описывается зависимостью вида

$$P_{24} = 0,347P_0 + 28,886, \text{ МПа.} \quad (3.3)$$

В случае предварительного сжатия НРС давление расширения, с коэффициентом корреляции 0,958, описывается квадратичной зависимостью

$$P_{24} = -0,0662P_0^2 + 2,1319P_0 + 30,441, \text{ МПа.} \quad (3.4)$$

Графики, иллюстрирующие зависимость давления расширения от объемных деформаций, для рассматриваемых случаев, приведены на рис. 3.25.



1, 3 – результаты лабораторных экспериментов; 2, 4 – корреляционные кривые

Рисунок 3.25 – Графики зависимости давления расширения НРС в возрасте 24 часа (P_{24}) от объемных деформаций (ΔV) при их ограничении пригрузкой блокирующего устройства (1, 2) и предварительным сжатием (3, 4)

Эмпирическая зависимость величины давления расширения НРВ-80 (P_{24}) в возрасте 24 часа от допустимых объемных деформаций (ΔV), с коэффициентом корреляции 0,98, может быть описана степенной зависимостью

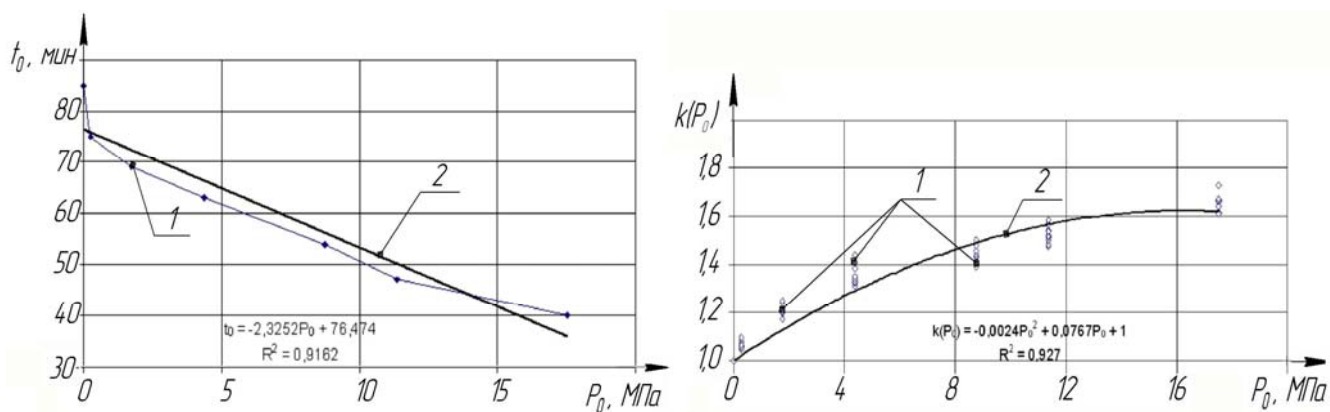
$$P_{24} = 35,767V_0^{-0,1164}, \quad (3.5)$$

что согласуется с проведенными ранее исследованиями. Зависимость величины давления расширения (P_{24}) от допустимых объемных деформаций (ΔV) при предварительном сжатии материала в диапазоне 0 – 17,5 МПа с коэффициентом корреляции 0,991 может быть описана линейной зависимостью

$$P_{24} = -5,407\Delta V + 66,45. \quad (3.6)$$

Известно, что одним из индикаторов начала гидратации оксида кальция является образование и рост новых кристаллов. Точно установить время начала роста кристаллов гидроксида кальция и динамику увеличения их объема в начальный период (первая стадия работы НРС) возможно только методом рентгеномикроскопии. Исследование влияния предварительного сжатия НРС на время начала гидратации в этом случае достаточно сложно осуществить технически. Поэтому в данной работе индикатором начала роста новых структурных единиц и увеличения их объема служит изменение объема НРС в испытательной камере, которое фиксируется индикатором часового типа ИЧ-10. Поскольку жесткость испытательного и точность измерительного приборов во всех экспериментах были постоянными, в первом приближении можем говорить о начале активного структурообразования в исследуемом материале в случае фиксации начала увеличения объема НРС индикатором ИЧ-10. Зависимость времени начала активного роста структурных новообразований от величины предварительного сжатия НРС представлена на рис. 3.26 а.

Анализ рисунка 3.26 а позволяет сделать вывод, что предварительное сжатие НРС приводит к повышению скорости роста новых структурных единиц в растворе и увеличению их объема. При этом в исследуемом диапазоне прослеживается линейная зависимость между величиной предварительного сжатия НРС (P_0) и временем начала гидратации (t_0).



1 – результаты лабораторных экспериментов; 2 – корреляционная кривая

а)

б)

Рисунок 3.26 – Графики, зависимости времени начала активного роста структурных новообразований (t_0) (а) и коэффициента предварительного сжатия $k(P_0)$ (б) НРС от предварительного сжатия НРС (P_0)

Указанная зависимость с коэффициентом корреляции 0,916 описывается уравнением

$$t_0 = -2,325P_0 + 76,474, \text{ мин.} \quad (3.7)$$

Количественную оценку эффекта повышения давления расширения НРС при его предварительном сжатии предлагается вести с помощью коэффициента предварительного сжатия $k(P_0)$, который равен отношению давления расширения НРС после его предварительного сжатия к расширению, развиваемому смесью без сжатия. Для учета различного времени начала гидратации за нулевую отметку будем принимать время начала активного структурообразования в НРС.

Формула расчета давления расширения НРС $P(t_i, P_{0i})$ при его предварительном сжатии давлением P_0 , примет вид

$$P(t_i, P_{0i}) = P^*(t_i) \cdot k(P_0), \quad (3.8)$$

где $P^*(t_i)$ – давление расширения через время t_i , развиваемое образцом НРС без предварительного сжатия (эталонный образец), МПа.

Статистический анализ факторов, определяющих коэффициент влияния предварительного сжатия, показал, что он функционально не зависит от временного этапа работы НРС, а зависит только от величины предварительного нагружения. При этом с коэффициентом корреляции 0,927 он может быть описан квадратичной зависимостью

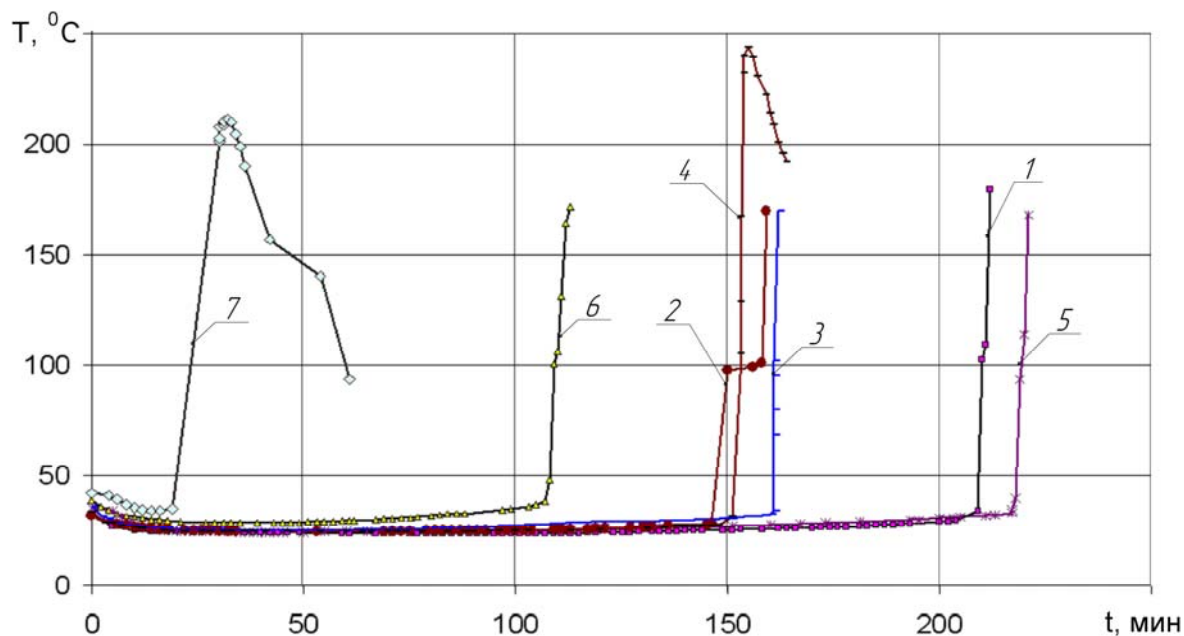
$$k(P_0) = -0,0024P_0^2 + 0,0767P_0 + 1. \quad (3.9)$$

График изменения указанного коэффициента от величины предварительного сжатия приведен на рисунке 3.26 б. Пользуясь зависимостями (3.8) и (3.9) можем определить давление, развиваемое НРС в любой момент времени при предварительном сжатии его в диапазоне 0-17,5 МПа. Проведенные исследования послужили основой для создания способа разрушения горных пород [295], являющегося технической реализацией выявленного эффекта.

Поскольку создание предварительного сжатия смеси механическим способом в шпуровых и скважинных зарядах не всегда возможно, также были проведены исследования, направленные на поиск химических добавок, позволяющих максимально уплотнить раствор НРС до момента его твердения [296, 297]. В качестве базовой смеси, к которой велся подбор добавок, была выбрана НРВ-80, выпускаемая промышленностью Украины. В качестве добавок исследовались два пластификатора СП-6 и Sika BV 3М.

Проведенные ранее исследования показали, что в качестве индикатора скорости процесса гидратации может выступать динамика роста температуры НРС. Поэтому для исследования влияния доли пластификаторов на скорость гидратации НРС были проведены лабораторные эксперименты. Содержание пластификаторов изменялось от 5 до 18%, их добавление проводилось с замещением соответствующей доли воды для соблюдения водотвердого отношения. Образцы помещались в цилиндрическую емкость в виде сосуда Дьюара с водой температурой 30 °С. Поскольку сопротивление расширению состава не оказывалось, образование новых поверхностей при перекристаллизации оксида кальция происходило без дополнительных потерь энергии, рост объема происходил более интенсивно, чем в шпуровом за-

ряде, и скачкообразно. Время начала третьей стадии гидратации практически совпало с интенсивным ростом температуры и переходом химически несвязанной воды в пар. Графики, характеризующие скорость гидратации НРС на разных стадиях с различным содержанием пластификаторов, представлены на рис. 3.27.



1 – без пластификаторов; 2, 3, 4 – с добавлением СП-6 5,5 масс. %, 12,5 масс. %, 18 масс. % соответственно; 5, 6, 7 – с добавлением Sika BV 3M 5,5 масс. %, 12,5 масс. %, 18 масс. % соответственно

Рисунок 3.27 – Графики зависимости температуры НРС от времени гидратации

Анализ результатов позволил сделать выводы:

– добавление СП-6 приводит к повышению скорости гидратации НРС в свободном состоянии на 25-27% независимо от его содержания в исследуемом диапазоне;

– добавление Sika BV 3M в количестве 5-7% приводит к незначительному снижению скорости гидратации, а повышение его содержания до 18% приводит к резкому росту скорости гидратации.

Добавление пластификатора на базе лигносульфонатов редуцирующего количество воды Sika BV 3M в диапазоне 0-7% практически не влияет на скорость гидратации. Поэтому он был выбран в качестве добавки.

Эксперименты по определению развиваемого усилия расширения НРС при замещении в растворе воды пластификатором Sika BV 3M (рис. 3.28) проводились в режиме заданной жесткости при свободном состоянии смеси в начальный момент.

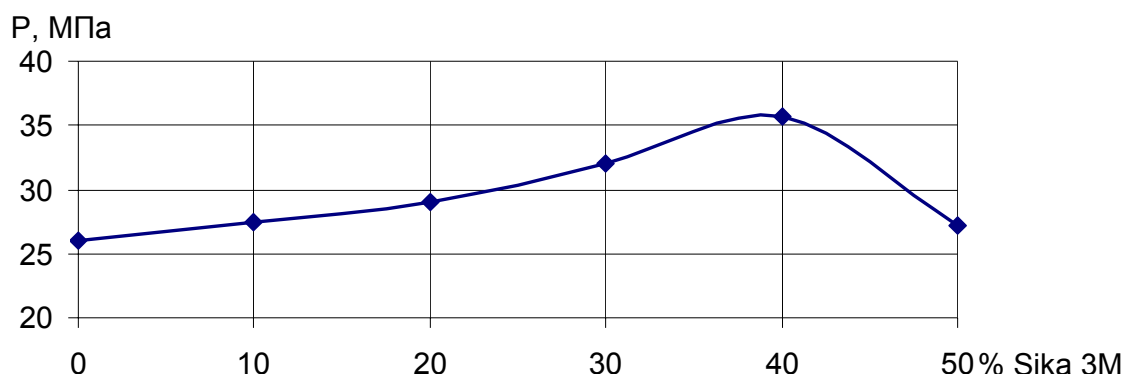


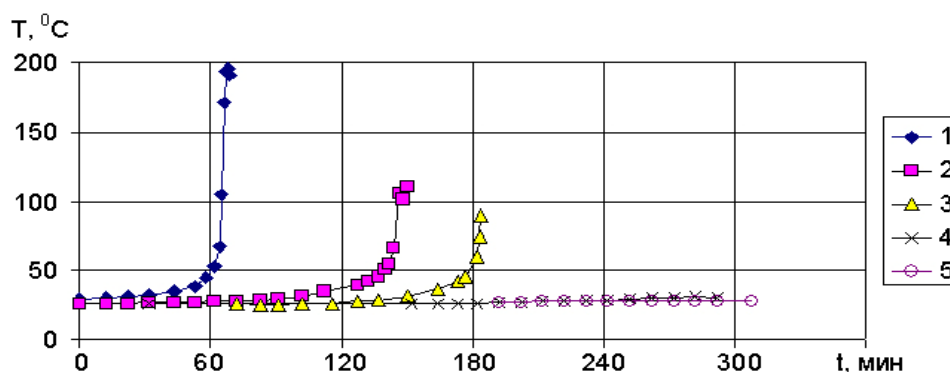
Рисунок 3.28 – Графики зависимости давления расширения НРС в рабочей камере через 24 часа от доли замещения воды в смеси пластификатором Sika BV 3M

Замещение массовой доли воды пластификатором Sika BV 3M до 40 масс. % приводит к повышению усилия расширения. Наибольший эффект достигается при содержании пластификатора 38 масс. %. При замещении Sika BV 3M 40 масс. % воды, развиваемое усилие распора НРС в возрасте 24 часа повышается на 37%. Дальнейшее повышение содержания пластификатора приводит к снижению усилия расширения. Характерно, что в возрасте 6 часов усилие расширения, развиваемое составом НРС, практически не зависит от добавления пластификатора.

3.4.3 Повышение эффективности работы невзрывчатых разрушающих смесей за счет регулирования теплообменных процессов

Проведение экспериментальных работ по применению НРС для разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок позволило сделать вывод о существенном несоответствии в скорости роста давления расширения, получаемого в лабораторных условиях с натурными наблюдениями, даже при их работе в одном температурном поле. Для изучения этого явления были проведены лабораторные исследования особенностей протекания реакции гидратации в различных материалах вмещающих заряд НРС [293]. После обработки результатов экспери-

мента были получены графики, характеризующие скорость гидратации НРС в оболочках из различных материалов (рис. 3.29).



1, 2, 3, 4, 5 – оболочка из пенопласта, пластика, дерева (сосна), гипса, стали соответственно

Рисунок 3.29 – Графики роста температуры НРС

Анализ результатов эксперимента показывает, что НРС, помещенный при одинаковой температуре в материалы с разными теплофизическими свойствами, имеет разную скорость гидратации, а также разную скорость и абсолютную величину приращения объема. В качестве критерия, позволяющего учесть теплофизические свойства материалов, целесообразно принять коэффициент температуропроводности. Так, для проведенного эксперимента температуропроводность составила: пенопласт – $0,000130 \text{ м}^2/\text{с}$, пластик – $0,000199 \text{ м}^2/\text{с}$, сосна – $0,000212 \text{ м}^2/\text{с}$, гипс – $0,000382 \text{ м}^2/\text{с}$, сталь – $0,01273 \text{ м}^2/\text{с}$.

Поскольку рассматриваемый процесс является экзотермическим, а на скорость реакции гидратации оказывает существенное влияние температура, то необходим учет теплообменных процессов между НРС и вмещающим его материалом. Другими словами происходит рассеяние тепловой энергии от самонагревающегося в результате физико-химических превращений состава НРС в окружающий массив. Чем больше тепловой энергии сохраняет смесь, тем выше скорость ее гидратации и рост структурных новообразований. Таким образом, при применении НРС необходимо учитывать не только температуру среды, в которую он помещается, но и ее температуропроводность. На основании проведенных исследований предложена техническая реализация полученного эффекта в виде спо-

соба разрушения твердых тел, предусматривающая формирование теплоизоляционной оболочки между НРС и стенками шпура и принудительное воздействие на скорость гидратации НРС [298].

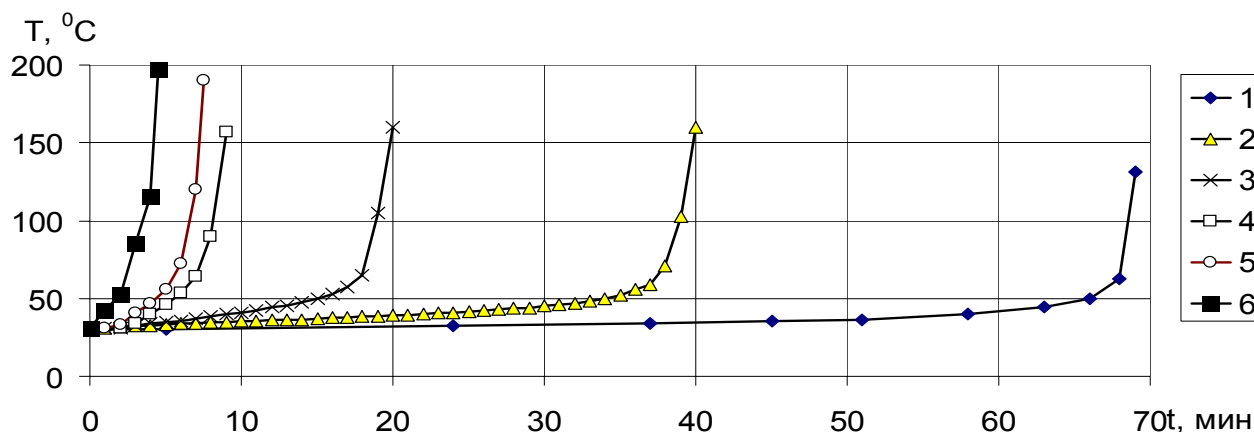
3.4.4 Повышение эффективности работы невзрывчатых разрушающих смесей с помощью электрического поля

Важнейшей практической задачей применения НРС в условиях подземных горных выработок является управление временем разрушения пород. При использовании химических добавок для управления скоростью гидратации НРС ускорение реакции наблюдается сразу после приготовления смеси. Поэтому приготовление общего количества смеси для заряжания большого количества шпуров является затруднительным, а обеспечение поочередного разрушения остается практически нерешенной задачей. Поиск способа управления гидратацией НРС для обеспечения необходимой очередности разрушения пород, который позволил бы сократить время разрушения в условиях подземных горных выработок, является важной научной задачей. Физической предпосылкой, позволяющей подойти к решению поставленной задачи, является установленная в лабораторных условиях особенность гидратации НРС в электрическом поле [299].

В результате проведения первого этапа экспериментов с образцами НРС в воздушной среде с температурой 30°C были получены графики изменения температуры НРС во времени при воздействии электрического поля различной напряженности. Графики изменения температуры НРС во времени, при воздействии на образец электричества при расстоянии между электродами 7 см, представлены на рисунке 3.30.

Базовым для проведения сравнения был выбран образец НРС, через который ток не пропускали. Из графиков видно, что для всех образцов наблюдается рост скорости гидратации при воздействии на них электричества. Повышение напряжения более 20 В при расстоянии между электродами 7 см, приводит к уско-

рению реакции более чем в 10 раз. Напряжение 20 и более В приводит к расширению смеси в течение 10 и менее минут.

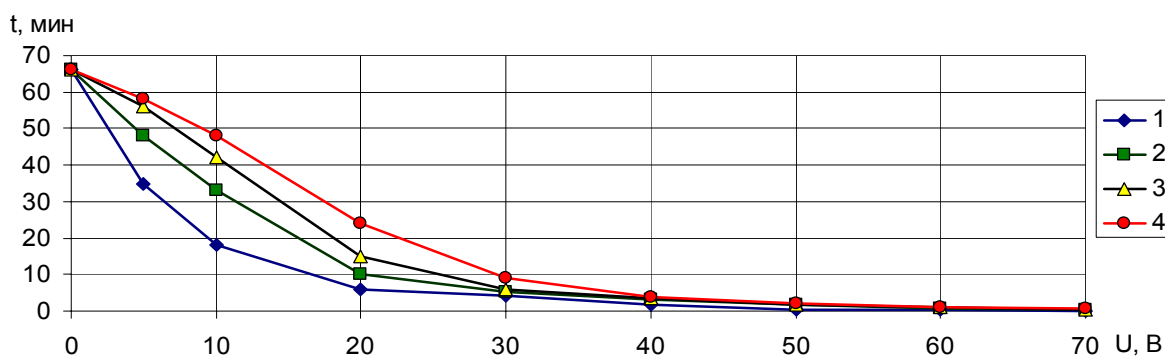


1 – без воздействия электричества; 2, 3, 4, 5, 6 – при воздействии электричества с напряжением 5 В, 10 В, 20 В, 30 В, 40 В соответственно

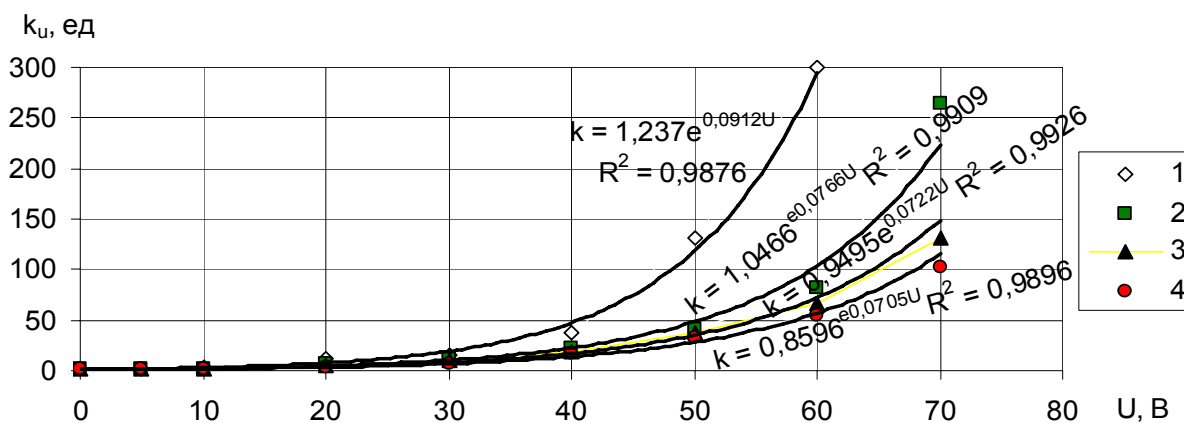
Рисунок 3.30 – Графики изменения температуры НРС во времени при расстоянии между электродами 7 см и воздействии на образец электричества

Также были построены графики зависимости времени роста критической температуры (50°C), которая соответствует времени протекания 1 и 2 стадий гидратации НРС, от величины пропускаемого напряжения (рис. 3.31 а). Количественную оценку полученного эффекта ускорения гидратации НРС предлагается проводить с помощью коэффициента ускорения k_u . Этот коэффициент равен отношению времени протекания 1 и 2 стадий гидратации в базовом образце к аналогичному времени в испытываемом образце (рис. 3.31 б). Полученные данные хорошо аппроксимируются экспоненциальными зависимостями. Например, при расстоянии между электродами 7 см $k_u = 1,237e^{0,0912U}$, с коэффициентом корреляции 0,987. Из полученных результатов видно, что при воздействии напряжения в диапазоне 5-60 В скорость реакции повышается до 300 раз.

Поскольку эффективность ускорения реакции при увеличении расстояния между электродами снижается, увеличение его более 30 см нецелесообразно. Это вызывает необходимость повышения напряжения, что, в свою очередь, способствует интенсивному пригоранию контактов и оплавлению электрического провода.



а)



б)

1, 2, 3, 4 – расстояние между электродами 7 см, 14 см, 21 см, 30 см соответственно

Рисунок 3.31 – Графики зависимости времени протекания 1 и 2 стадий гидратации НРС (а) и коэффициента ускорения гидратации (б) от электрического напряжения

При расстоянии между электродами 7-30 см эффективное напряжение составляет 20-30 В. Полученные результаты показали принципиальную возможность управления скоростью гидратации НРС воздействием электрического поля.

Задачей второго этапа исследований было определение закономерностей протекания процесса в термокинетических условиях, характерных для горных пород в подземных горных выработках, в режиме реального времени при инициировании ускорения реакции с заданным интервалом. Температура окружающей среды при экспериментах составляла 23 °С. При этом одновременно фиксировали изменение температуры смеси и увеличение ее объема. Результаты, полученные при напряжении 30 В, представлены на рис. 3.32.

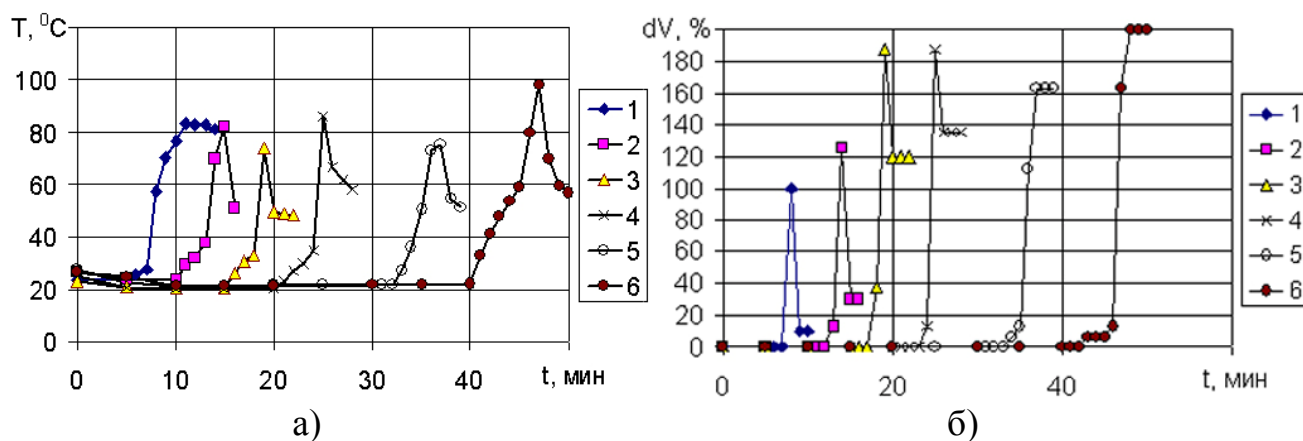


Рисунок 3.32 – Графики изменения температуры (а) и объема (б) НРС во времени при воздействии на образец электричества с напряжением 30 В через 5 мин (1); 10 мин (2); 15 мин (3); 20 мин (4); 30 мин (5); 40 мин (6) после приготовления

Анализ позволил установить, что увеличение интервала времени между приготовлением смеси и воздействием электричества приводит к изменению динамики роста температуры смеси и фазового состояния продуктов расширения. Так, при времени инициирования 5 мин происходит непродолжительный рост температуры в течение 2 мин. При достижении температурой отметки 30°C наблюдается скачок, характеризующий переход на третью стадию гидратации смеси и сопровождающийся выделением большого количества пара, что приводит к росту объема образца на 100%. После охлаждения и конденсации пара объем продуктов расширения уменьшается до объема твердой фазы и составляет 10%.

При времени инициирования 40 минут, рост температуры до ее скачка происходит в течение 6 минут, при этом скачок наблюдается при достижении температурой отметки 60°C . Объем смеси после расширения увеличивается на 200%, пар не выделяется, и объем остается постоянным после охлаждения образца. Анализ графиков показывает, что увеличение времени инициирования ускорения реакции с помощью электричества приводит к увеличению доли твердой фазы продуктов расширения и росту коэффициента объемного расширения. График зависимости отношения объемного увеличения твердой фазы НРС $dV_{\text{тв}}$, %, к об-

щему объемному расширению смеси dV , %, после воздействия электричества с напряжением 30 В от времени инициирования t , мин приведен на рисунке 3.33 а.

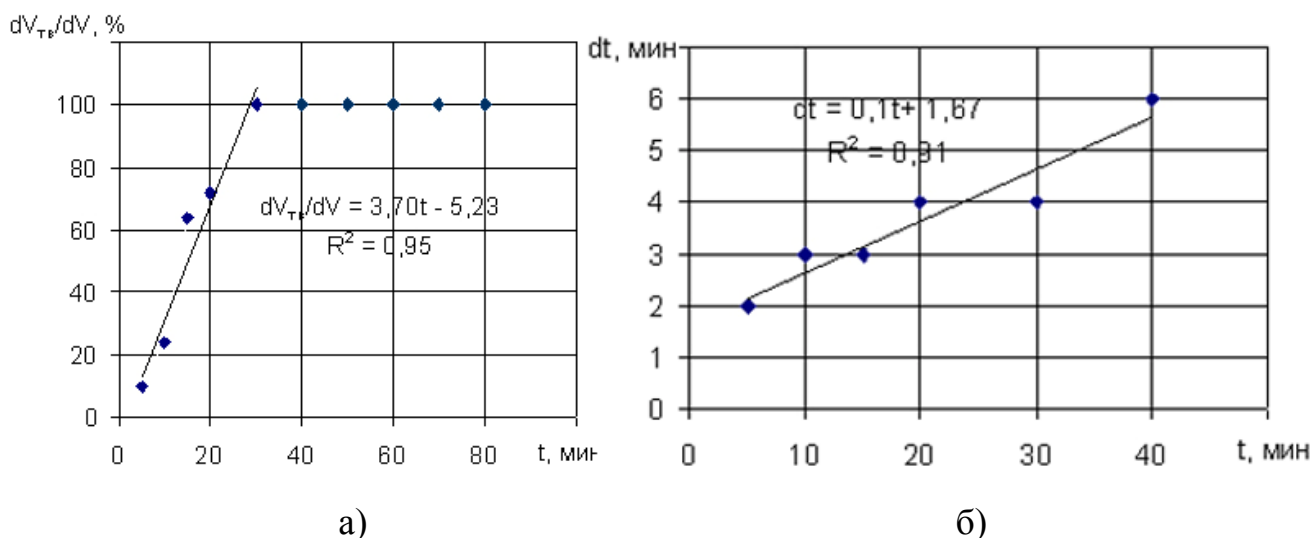
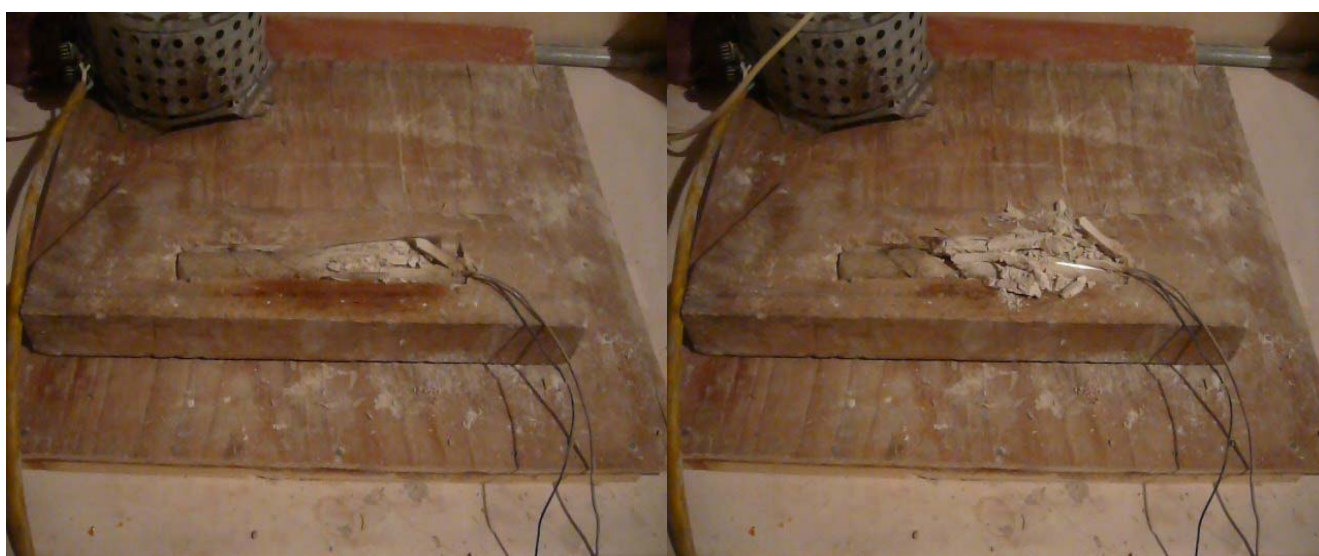


Рисунок 3.33 – Графики зависимости отношения объемного увеличения твердой фазы НРС к общему увеличению объема смеси (а) и времени перехода НРС на третью стадию гидратации (б) после воздействия электричества от времени инициирования t , мин

При времени инициирования более 30 минут для напряжения 30 В парогазовые продукты не выделяются. Соответственно это время является минимально необходимым для избегания провоцирования произвольного выброса смеси. Рост доли твердой фазы при расширении смеси в диапазоне инициирования 0-30 минут происходит по зависимости, близкой к линейной, и может быть аппроксимирован с коэффициентом корреляции 0,95 зависимостью вида $dV_{тв}/dV = 3,70t - 5,23$. Уменьшение количества парогазовых выделений при увеличении времени инициирования объясняется переходом химически несвязанной воды в структурно связанное состояние в молекулах гидроксида кальция. При увеличении времени инициирования t наблюдается увеличение времени перехода на третью стадию гидратации НРС dt , характеризующуюся скачком роста температуры и объема смеси после воздействия электричества (рис. 3.33 б). Повышение времени dt объясняется снижением количества химически несвязанной воды в растворе и, соответственно, повышением электрического сопротивления смеси.

На следующем этапе проводились исследования влияния величины напряжения на время разрушения. Эксперименты повторялись при напряжении 10-30 В и времени задержки 0-1 час. В результате экспериментов установлено, что возможно два режима работы НРС в электрическом поле. В первом (стабильном) режиме происходит стабильное прогрессирующее с небольшой скоростью разрушение, что вызвано увеличением в объеме твердой фазы раствора НРС (рис. 3.34 а, б). Общие выводы о величине напряжения совпадают с изложенными выше.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 3.34 – Разрушение в стабильном (а, б) и динамическом (в, г) режимах

Во втором (динамическом) режиме наблюдается неуправляемый рост скорости гидратации и происходит быстрое разрушение объекта, близкое к взрыву с характерным звуковым эффектом (рис. 3.34 в, г).

Для решения конкретной задачи, регулируя напряжение, можно выбрать подходящий режим разрушения. Проведенные эксперименты подтвердили результаты, полученные на первых двух этапах исследований. Кроме того, исследования в стенде показали, что при динамическом режиме работы НРС давление расширения на 10-20% меньше, чем при статическом режиме, соответствующем работе НРС без ускорения. Проведенные исследования позволили разработать и запатентовать способы разрушения горных пород [300, 301].

3.5 Модифицированные невзрывчатые разрушающие смеси для условий подземных горных выработок

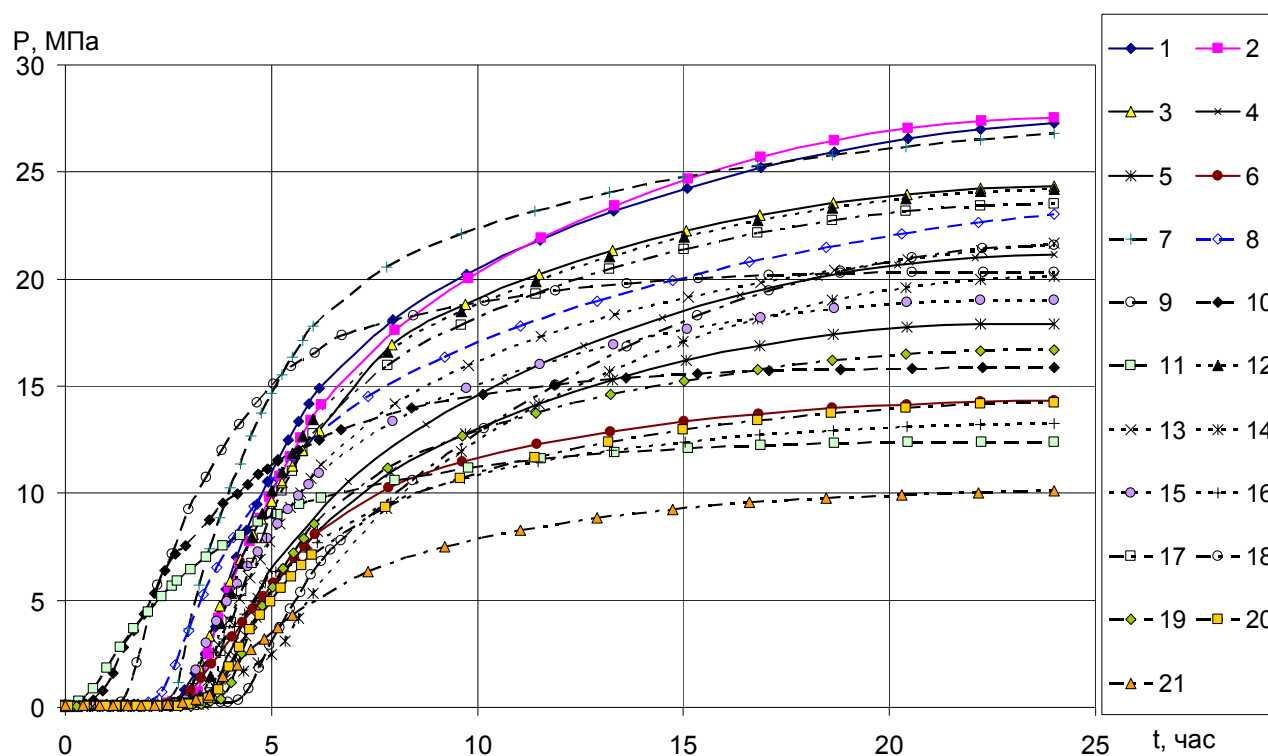
3.5.1 Лабораторные исследования комплексных смесей с добавками портландцементов

Одним из основных требований, предъявляемых к НРС, является сохранение остаточной прочности твердеющего раствора после окончания гидратации. НРС в чистом виде после расширения в условиях свободного перемещения превращается в порошок, что не позволяет сохранить эффект сжатия, создаваемый расширением смеси. Это послужило предпосылкой использования в качестве добавки к НРС портландцементов, имеющих сходный механизм гидратационного твердения. Было проведено исследование комплексных смесей, в которых в качестве основного агента использовали НРВ-80, а в качестве добавок применялись портландцементы марки 400 типов ПЦ I, ПЦ II/A, ПЦ II/B производства ПАО «Евроцемент Украина» и ПЦ III производства ПАО «Хайдельберг Цемент Украина» [302]. Процентное содержание цементов изменялось в диапазоне 8-50% по сухой массе (табл. 3.1). Исследования проводились в стенде в режиме 1.

Таблица 3.1 – Массовое соотношение компонентов при исследовании НРС с добавками портландцементов

№ эксперимента	НРВ-80, гр.	H ₂ O, гр.	Тип цемента			
			ПЦ-I, гр.	ПЦ-IIА, гр.	ПЦ-IIБ, гр.	ПЦ-III, гр.
1	60	20	-	-	-	-
2-5	55	20	5	5	5	5
6-9	50	20	10	10	10	10
10-13	45	20	15	15	15	15
14-17	40	20	20	20	20	20
18-21	30	20	30	30	30	30

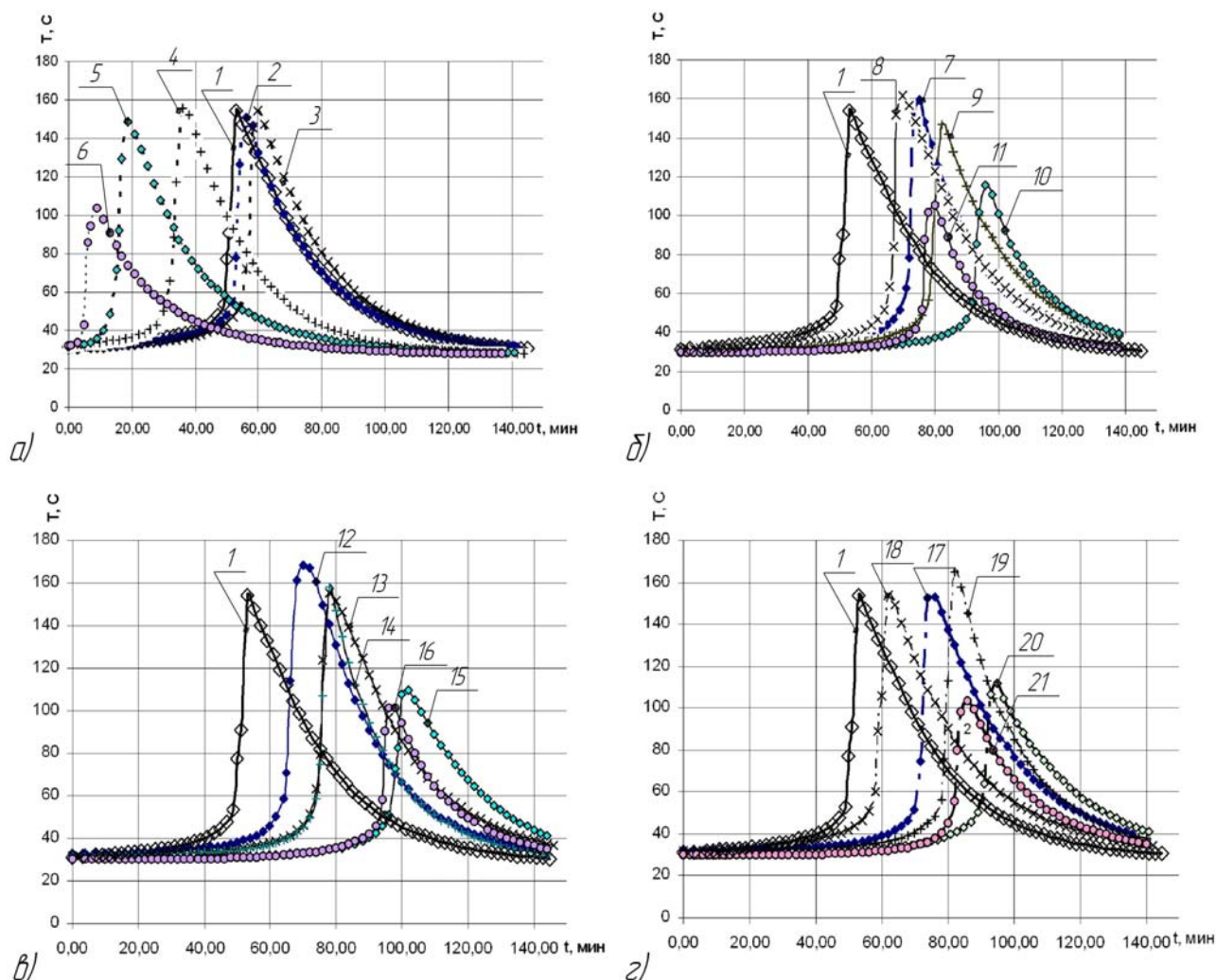
Графики роста давления расширения представлены на рис. 3.35.



1 – без добавок; 2, 3, 4, 5, 6 – с добавлением ПЦ I 8,3, 16,6, 25, 33, 50 масс. %; 7, 8, 9, 10, 11 – с добавлением ПЦ IIБ 8,3, 16,6, 25, 33, 50 масс. %; 12, 13, 14, 15, 16 с добавлением ПЦ IIА 8,3, 16,6, 25, 33, 50 масс. %; 17, 18, 19, 20, 21 – с добавлением ПЦ III 8,3, 16,6, 25, 33, 50 масс. % соответственно

Рисунок 3.35 – Графики роста давления расширения НРС в рабочей камере станда при добавлении портландцементов

Графики изменения температуры комплексных смесей с добавлением портландцементов представлены на рис. 3.36. Графики изменения объема смесей при расширении и скорости роста давления приведены в приложении Г, рис. Г1, Г2.



1 – без добавок; 2, 3, 4, 5, 6 – с добавлением ПЦ ПБ 8,3, 16,6 25, 33, 50 масс. %; 7, 8, 9, 10, 11 – с добавлением ПЦ Ш 8,3, 16,6 25, 33, 50 масс. %; 12, 13, 14, 15, 16 – с добавлением ПЦ I 8,3, 16,6 25, 33, 50 масс. %; 17, 18, 19, 20, 21 – с добавлением ПЦ ПА 8,3, 16,6 25, 33, 50 масс. % соответственно

Рисунок 3.36 – Графики изменения температуры НРС с добавлением:

а) ПЦ ПБ; б) ПЦ Ш; в) ПЦ I; г) ПЦ ПА

Анализ приведенных графиков позволяет сделать следующие выводы. Добавление в НРС всех типов портландцементов приводит к снижению давления

расширения смеси в возрасте 24 часа, что объясняется снижением количества оксида кальция в их составе, способного при полной реакции с водой обеспечить максимальное увеличение объема.

Максимальное снижение давления наблюдается при добавлении ПЦ III, а минимальное при добавлении ПЦ I. Так, например, добавление в состав смеси 50% ПЦ III приводит к снижению давления расширения на 63% относительно чистого НРС, а добавление 50% ПЦ I – на 48%. Около 70% смещений для чистого НРС реализуются в первые 8 часов после затворения. Так в проведенном эксперименте через 8 часов после затворения НРС давление расширения составило 18,2 МПа, из 27 МПа в возрасте 24 часа. Выше было только давление смеси с добавкой 8,3% ПЦ IIБ, которое составило 23 МПа. На ранних этапах гидратации НРС давление расширения выше по отношению к чистому составу для смесей с добавлением ПЦ IIБ, хотя максимальное давление в возрасте 24 часа всегда ниже чистого НРС. Причем повышение содержания портландцемента приводит к повышению давления на ранних стадиях и пропорциональному его снижению в возрасте 24 часа.

Добавление портландцементов по-разному влияет на время начала роста давления расширения. При добавлении ПЦ I, ПЦ IIА оно меняется незначительно, при ПЦ IIБ сокращается, а при добавлении ПЦ III увеличивается. Так, например, добавление в состав смеси 50% ПЦ III приводит к увеличению времени начала расширения на 20% относительно чистого НРС, а добавление 50% ПЦ IIБ – к сокращению этого времени в 8,7 раз. Кроме этого изменяется скорость роста давления расширения на разных этапах работы НРС. Максимальная скорость роста давления обеспечивается незначительным добавлением портландцементов, в проведенных экспериментах до 8,3%. Так наибольшая скорость до 10 МПа/час наблюдается при добавлении 8,3% портландцемента ПЦ IIБ, минимальная – при добавлении портландцемента ПЦ I (при 8,3% – 7,1 МПа/час). Добавление 8,3% ПЦ IIА приводит к повышению скорости до 9,8 МПа/час, а ПЦ III до 7,8 МПа/час. При этом чистый НРС имеет максимальную скорость роста давления расширения

7,06 МПа/час. Таким образом, можно сделать вывод, что добавление портландцементов до 8,3 масс. % приводит к увеличению скорости роста давления.

Рост объема смеси происходит в твердой фазе раствора и отражает тот же процесс перекристаллизации и структурной перестройки в составе НРС в процессе его гидратации, поэтому результаты роста объемных изменений и скорости их роста коррелируют с результатами для давления расширения.

Из рис. 3.36 можно сделать вывод, что ускорителем реакции является только портландцемент ПЦ ПБ. Замедляют скорость гидратации в порядке убывания влияния: ПЦ Ш, ПЦ I и затем ПЦ ПА. При этом добавление портландцементов в небольшом количестве (до 8,3 масс. %) приводит к незначительному повышению максимальной температуры смеси, а дальнейшее повышение содержания портландцементов к ее снижению. Это подтверждает результаты исследований роста давления.

Известно, что добавление в состав НРС шлаков доменного производства приводит к ускорению гидратации. Поскольку по типу портландцемента можно сделать вывод о содержании в нем минеральных добавок, в нашем случае доменных шлаков, общие выводы по результатам описанных исследований следующие.

Добавление портландцемента ПЦ I с содержанием минеральных добавок до 6% в общем случае приводит к замедлению реакции гидратации, что видно по динамике изменения температуры смеси и отражается в снижении давления расширения относительно чистого НРС. При исследовании в стенде не отмечено значительного изменения времени начала роста давления, а скорость роста давления практически не отличается от скорости чистого НРС. Это, вероятно, объясняется снижением доли оксида кальция в общем объеме смеси и пропорциональным снижением скорости реакции гидратации. Так добавление в НРС 50 масс. % ПЦ I приводит почти к прямо пропорциональному снижению давления расширения на 48%.

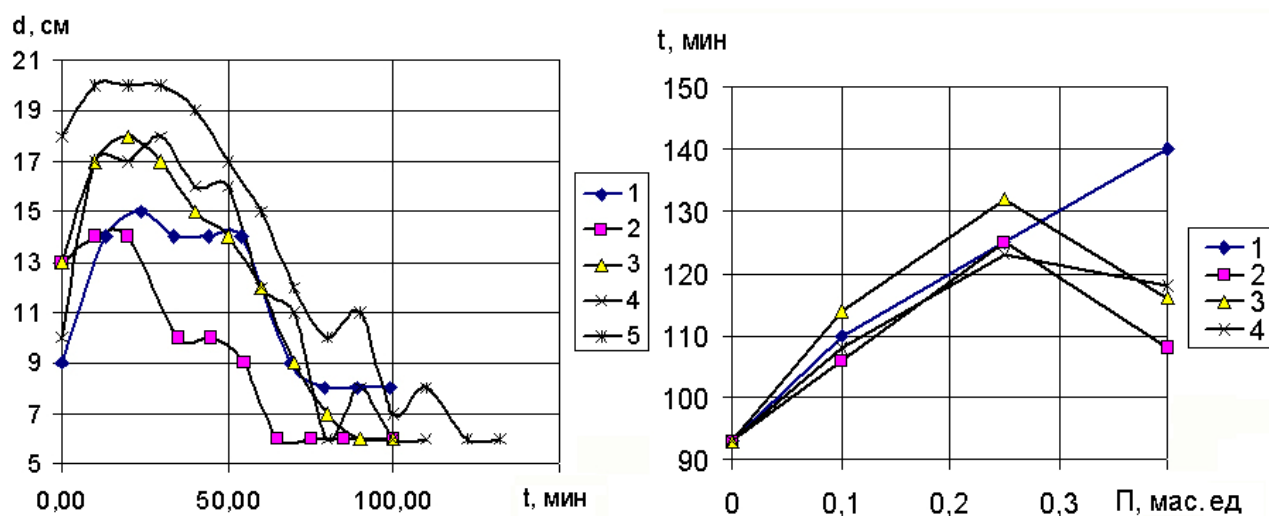
Добавление портландцемента ПЦ ПА с содержанием доменных шлаков 6-20% в общем случае также приводит к замедлению реакции гидратации, но в меньшей степени чем ПЦ I, что отчетливо видно из графиков изменения темпера-

туры смесей. При исследовании в стенде также не отмечено значительного изменения времени начала роста давления. Однако скорость роста давления расширения увеличивается относительно скорости чистого НРС до 40%. Полученные результаты объясняются одновременным протеканием двух процессов. С одной стороны снижением доли оксида кальция в общем объеме смеси приводит к снижению скорости реакции гидратации, с другой – добавление шлаков в составе портландцементов приводит к ее ускорению. При этом общее количество основного агента, вызывающего расширение смеси, снижается, что приводит к снижению конечного давления в возрасте 24 часа.

Добавление портландцемента ПЦ ПБ с содержанием шлаков 20-35% приводит к ускорению реакции гидратации, что отмечается по всем описанным экспериментам. Достаточно высокое содержание шлаков оказывает эффект катализатора реакции и приводит к сокращению времени начала гидратации и повышению ее скорости. Это позволяет обеспечить более высокое давление расширения в начальные сроки, однако конечное давление в возрасте 24 часа снижается по причине сокращения содержания основного агента, вызывающего расширение смеси.

Добавление портландцемента ПЦ III с содержанием шлаков более 35% приводит к снижению скорости реакции гидратации вопреки ожидаемому дальнейшему ее ускорению. Это объясняется тем, что при получении этого цемента совместно измельчают портландцементный клинкер, гранулированный доменный шлак и добавку гипса. Добавление гипса приводит к снижению коэффициента объемного расширения НРС, поскольку скорость гидратации оксида кальция в присутствии гипса снижается. Что объясняется увеличением сил сцепления частиц, их более плотным срастанием в период кристаллизации и формированием кристаллизационного каркаса, препятствующего объемному увеличению смеси. Это отражается в результатах экспериментов. Так при добавлении ПЦ III наблюдается максимальное снижение давление расширения по сравнению с остальными портландцементами, время начала роста объема смеси увеличивается, скорость реакции гидратации по результатам замера температуры замедляется.

Результаты экспериментов по определению подвижности смесей и сроков схватывания представлены на рис. 3.37.



1 – без добавок; 2, 3, 4, 5 – с добавлением 25 мас. % ПЦ I, ПЦ IIА, ПЦ IIБ, ПЦ III

а)

1, 2, 3, 4 – с добавлением 25 мас. % ПЦ I, ПЦ IIА, ПЦ IIБ, ПЦ III

б)

Рисунок 3.37 – Графики зависимости подвижности смесей (а) и времени начала схватывания (б) от добавления портландцементов

Анализ графиков показывает, что добавление в НРС портландцементов приводит к изменению подвижности смеси и времени схватывания. Общая тенденция изменения подвижности сохраняется для всех смесей. В первые 10 минут после приготовления смесей их подвижность повышается, затем стабилизируется, после чего начинает уменьшаться. При этом сразу после затворения смеси все портландцементы вызывают повышение ее подвижности, в наименьшей степени ПЦ IIА (в 1,11 раза), в наибольшей ПЦ III (в 2 раза). Все цементы, кроме ПЦ I, в течение первых 50 минут после затворения смеси вызывают повышение ее подвижности, по сравнению с чистым НРС. Добавление ПЦ I приводит к непродолжительному, до 15 минут, росту подвижности смеси и дальнейшему ее снижению до значений меньших, чем чистого НРС. Добавление портландцементов до 0,25 масс. ед. приводит к повышению сроков схватывания смесей. Дальнейшее

повышение содержания портландцементов приводит к сокращению времени схватывания для всех типов цементов кроме ПЦ I, для которого рост времени схватывания продолжает расти пропорционально его массовой доле.

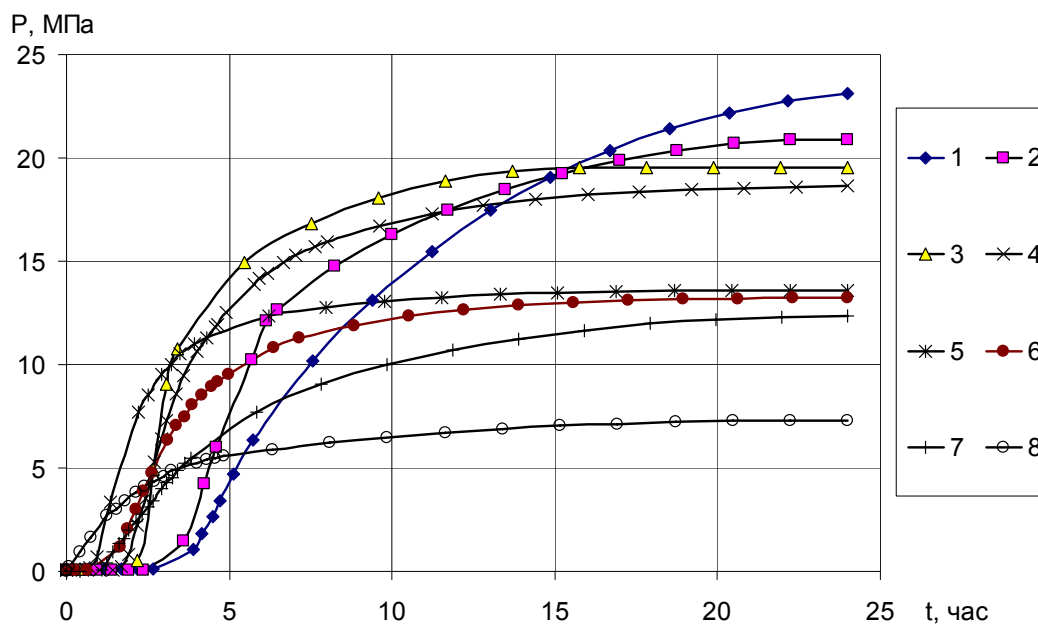
Полученные результаты объясняются тем, что содержание доменных шлаков, ускоряющих реакцию гидратации оксида кальция в ПЦ I, незначительное (до 6%), поэтому добавление содержания портландцемента приводит к росту времени схватывания. Для остальных случаев при повышении содержания портландцементов повышается доля доменных шлаков в смеси, что вызывает повышение ее скорости схватывания, однако время начала схватывания при добавлении портландцементов до 0,4 масс. ед. больше, чем для чистого НРС. Таким образом, можно сделать вывод, что введение портландцементов улучшает эксплуатационные характеристики невзрывчатых смесей.

Таким образом, проведенные исследования доказывают возможность регулирования скорости роста давления расширения, динамики и максимального значения этого давления, что позволяет создавать комплексные смеси НРС для различных задач, в том числе решаемых в условиях подземных горных выработок.

3.5.2 Лабораторные исследования комплексных смесей с добавками этановой кислоты

Целью исследований был поиск рецептуры НРС, позволяющей ускорить гидратацию без дополнительного выделения тепла и обеспечить высокие давления в течение 5-8 часов после приготовления. В качестве базовой смеси, к которой велся подбор добавок, был выбран НРВ-80. В качестве дополнительного реагента, после поисковых исследований, была выбрана этановая кислота CH_3COOH [303]. Результаты испытаний в стенде приведены на рис. 3.38. в виде графиков роста давления расширения.

Графики изменения объема смесей при расширении и скорости роста давления приведены в приложении Г, рис. Г3, Г4.



1 – без добавок; 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – при добавлении этановой кислоты 0,56, 0,9, 1,13, 1,65, 1,98, 2,17, 2,20 масс. % соответственно

Рисунок 3.38 – Графики роста давления расширения НРС в рабочей камере стенда при добавлении этановой кислоты

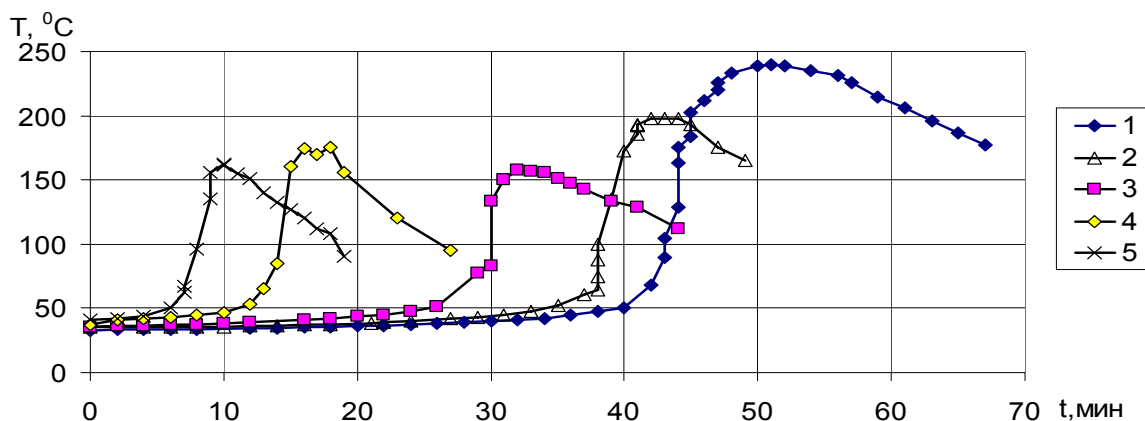
Анализ результатов показывает, что добавление этановой кислоты приводит к ускорению роста давления расширения, однако вызывает снижение величины конечного давления в возрасте 24 часа (рис. 3.38). Поскольку интересующий по постановке задачи временной диапазон 5-8 часов после приготовления состава, можно сделать вывод, что максимального давления в этом временном отрезке можно достичь при добавлении этановой кислоты 0,56-1,13 масс. %. При этом давление в возрасте 24 часа снижается на 10-24%; однако в первые 10-12 часов после приготовления оно больше, чем при смеси без добавок, и составляет 90-94% от конечного. В первые 5 часов после приготовления развиваемые давления в 1,49-3,18 раза выше, чем для чистой смеси без добавок, при этом развиваемые давления составляют 33-76% от давления в возрасте 24 часа, в то время как смесь без добавок развивает за это время 22% от максимального давления.

Дальнейшее повышение содержания этановой кислоты приводит к росту давления расширения в ранние сроки (до 4-5 часов), но вызывает значительное снижение конечного давления. Так при добавлении 1,6-2 масс. % конечное давле-

ние снижается в 1,7-1,9 раза по сравнению с исходной смесью. Это не позволит гарантировать разрушение объекта в случае предельных расстояний между шпурами или наличия локальных зон повышенной прочности из-за отсутствия резерва усилия расширения.

По полученным результатам (см. рис. 3.38) можно сделать вывод, что время начала роста давления при добавлении этановой кислоты сокращается. Так для диапазона добавки 0,56-1,13 масс. % оно сокращается в 1,09-2 раза. Кроме этого изменяется скорость роста расширения на разных этапах работы НРС. Максимальная скорость роста давления расширения обеспечивается добавлением 0,9 масс. % этановой кислоты и составляет 10,15 МПа/час.

Исследование динамики изменения температуры смесей в процессе гидратации с различным содержанием этановой кислоты были проведены при нахождении образцов в свободном состоянии в воздушной среде (рис. 3.39).



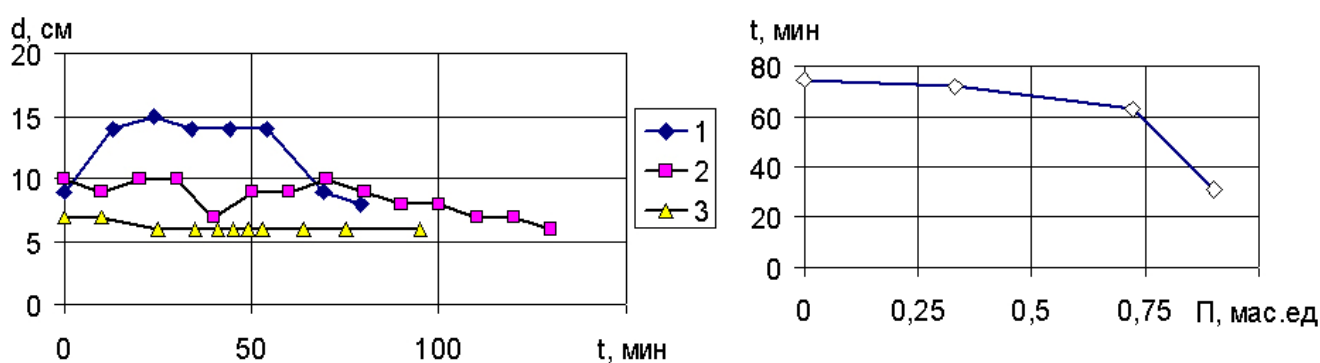
1 – без добавок; 2, 3, 4, 5 – при добавлении этановой кислоты 0,33, 0,66, 0,9, 1,67 масс. % соответственно

Рисунок 3.39 – Графики изменения во времени температуры НРС в оболочке при добавлении этановой кислоты

Анализ результатов позволил сделать выводы, что с добавлением этановой кислоты повышается скорость гидратации состава на первой и второй стадиях. Так, при добавлении 1,67 масс. % этановой кислоты время первой и второй стадий гидратации, по сравнению с базовой смесью, сократилось в 5 раз. Дальнейшее

повышение содержания этановой кислоты в данном температурном поле приводит к развитию микровыброса в течение 1-2 минут после смешивания компонентов, что не позволяет выполнить соответствующие замеры. Кроме того, было отмечено снижение максимальной температуры, развиваемой смесью при введении этановой кислоты. Температура снизилась от 240°C , в случае чистого НРС, до 161°C – при добавлении 1,67 масс.% этановой кислоты.

Результаты экспериментов по определению подвижности смесей и сроков схватывания представлены на рис. 3.40.



1 – без добавок; 2, 3 – при добавлении этановой кислоты 0,34, 0,9 масс. % соответственно

а)

б)

Рисунок 3.40 – Графики изменения подвижности во времени (а) и времени схватывания НРС (б) при добавлении этановой кислоты

Анализ графиков показывает, что введение в НРС этановой кислоты приводит к резкому снижению подвижности смеси. Так добавление 0,33% CH_3COOH приводит к снижению подвижности в ранние сроки в два раза, а при добавлении 0,9% CH_3COOH смесь теряет подвижность в течение 10-15 минут после приготовления, дальнейшее повышение содержания кислоты приводит к отсутствию подвижности смеси сразу после ее приготовления. Добавление CH_3COOH приводит к сокращению времени схватывания непропорционально массовой доле добавки. Введение больше 0,72% CH_3COOH приводит к резкому ускорению схватываемости смеси, добавление CH_3COOH более 0,9% приводит к схватываемости

смеси в течение нескольких минут после приготовления. Характерно, что интенсивное повышение температуры смеси в испытательном кольце отмечается после начала схватывания НРС. Таким образом, добавление этановой кислоты способствует более раннему наступлению и более интенсивному протеканию второй стадии гидратации, что подтверждается результатами экспериментов по исследованию динамики роста давления расширения.

В общем случае можно сделать вывод, что введение этановой кислоты приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик невзрывчатых смесей, но одновременно приводит к ускорению роста их давления расширения. При добавлении в смесь этановой кислоты 0,56-1,13 масс. % в первые 10-12 часов после приготовления смеси развивается давление большее, чем при смеси без добавок, однако величина конечного давления в возрасте 24 часа снижается.

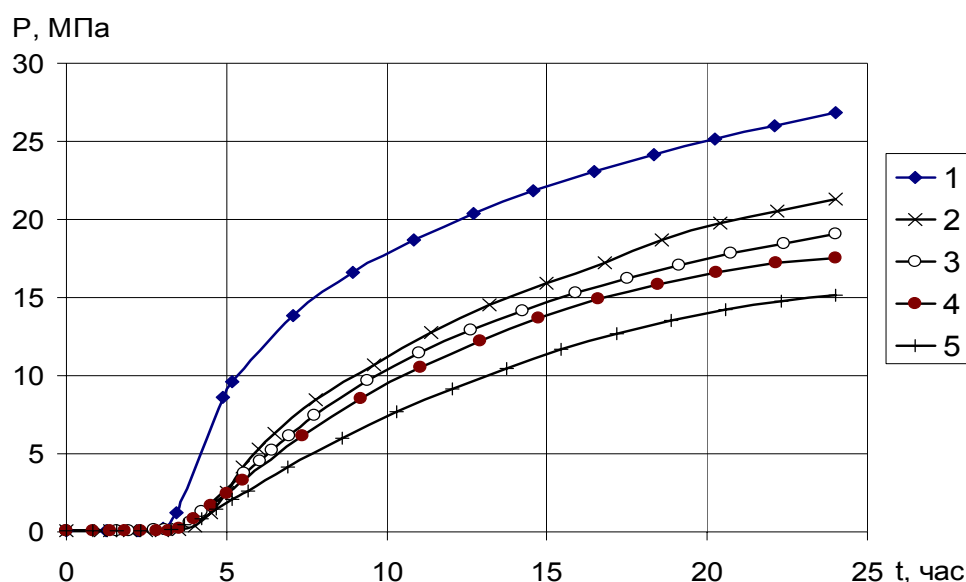
Проведенные исследования позволили разработать и запатентовать невзрывчатую разрушающую смесь [304], содержащую следующие компоненты, масс. %: кальцинированная сода – 2,0 – 9,0, лигносульфонат технический модифицированный – 0,40 – 2,5, этановая кислота – 0,25 – 1,1, оксид кальция из обожженных известняка и гипса – остальное.

3.5.3 Лабораторные исследования комплексных невзрывчатых разрушающих смесей с добавками гумата натрия

Существующие НРС ориентированы на применение в шпуровых зарядах диаметром до 50 мм. Так, например, в руководствах по применению НРС [239, 246], приведены рекомендации по технологии и организации работ по разрушению и разборке строительных конструкций при помощи НРС и указано, что оптимальными являются шпуры с диаметрами 35-50 мм, также указано, что применение НРС эффективно при температуре разрушаемого материала не менее 2 °С и не более 30 °С. Повышение температуры разрушаемого объекта выше 30 °С в приводит к самопроизвольному выбросу смеси из шпура.

В данной работе рассматриваются не только шпуровые заряды, но и предлагаются технологические решения, основанные на применении НРС в скважинных зарядах с диаметром 76-100 мм и более. При этом процесс самонагрева состава будет протекать быстрее, чем в шпуре, что связано с большим количеством вещества, и может послужить причиной произвольного выброса НРС. В основном температурный режим в подземных горных выработках 20-35 °С, а, например, для шахты им. Засядько для глубины 1400 м температура пород составляет 58 °С.

Поэтому целью исследований был поиск рецептуры НРС, работающей в условиях скважинных зарядов и температур, присущих горным породам на современных глубинах разработки. В качестве базовой смеси, к которой велся подбор добавок, был выбран порошок НРВ-80. В качестве дополнительного реагента после ряда поисковых экспериментов был выбран гумат натрия. При этом добавление гумата натрия происходило с одновременным введением в состав воды в том же количестве. В противном случае смесь представляла собой сухую комковатую массу, неудобную при эксплуатации. Результаты испытаний на стенде при температуре окружающей среды 35 °С приведены на рис. 3.41.



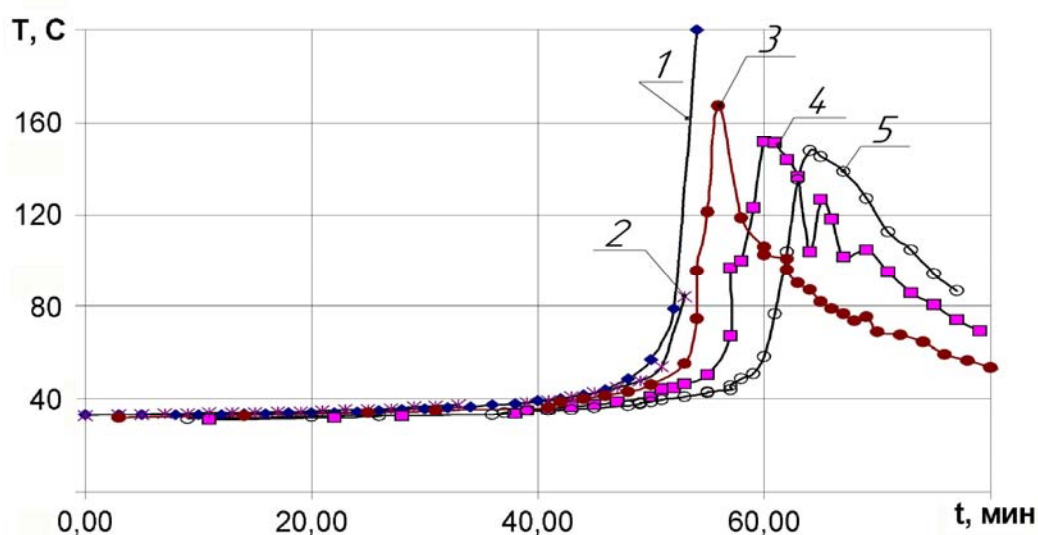
1 – без добавок; 2, 3, 4, 5 – при добавлении 1,2, 2,3, 5,5, 10 масс. % гумата натрия соответственно

Рисунок 3.41 – Графики роста давления расширения НРС во времени

Графики изменения объема смесей при расширении и скорости роста давления приведены в приложении Г, рис. Г5, Г6. Анализ результатов позволяет сделать выводы, что добавление гумата натрия приводит к замедлению роста давления и снижению его конечной величины в возрасте 24 часа (рис. 3.41). При этом характерным является выполаживание кривой роста давления расширения при введении добавки, и отсутствие характерного скачка роста давления на второй стадии гидратации сразу после начала протекания активной стадии. Из ранее проведенных исследований известно, что непроизвольный выброс НРС связан с изменением фазового состояния химически несвязанной воды из жидкого в газообразное, что вызвано повышением температуры состава. При этом, чем более поздняя стадия гидратации, тем большее количество воды перешло в химически связанное состояние и, соответственно, вероятность выброса меньше. Таким образом, наиболее опасным с точки зрения развития выброса является начальный период гидратации НРС, на протяжении которого происходит рост скорости реакции. Для смеси без добавок этот период характеризуется временным диапазоном первого часа активной стадии гидратации с максимумом скорости 5 МПа/час. Полученные результаты экспериментов над НРС с добавлением гумата натрия (рис. 3.41) показывают, что скорость роста давления, а соответственно и скорость протекания реакции на начальной стадии, снижается при добавлении от 1,2 до 10% гумата натрия в 1,51-4 раза. При этом давление в возрасте 24 часа уменьшается в 1,25-1,76 раза. Следует отметить, что время начала реакции при добавлении гумата натрия увеличивается незначительно. Так, добавление 10% гумата натрия приводит к увеличению времени начала роста давления всего на 45 минут. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что дальнейшее повышение количества гумата натрия нецелесообразно, поскольку приводит к снижению давления расширения более чем в 1,76 раза, значительно не замедляя скорости реакции.

Исследования динамики изменения температуры НРС в процессе гидратации с различным содержанием гумата натрия при температуре окружающей среды 35 °С (рис. 3.42) в целом подтверждают результаты описанных выше экспериментов в части снижения скорости гидратации на первой и второй стадии, а также

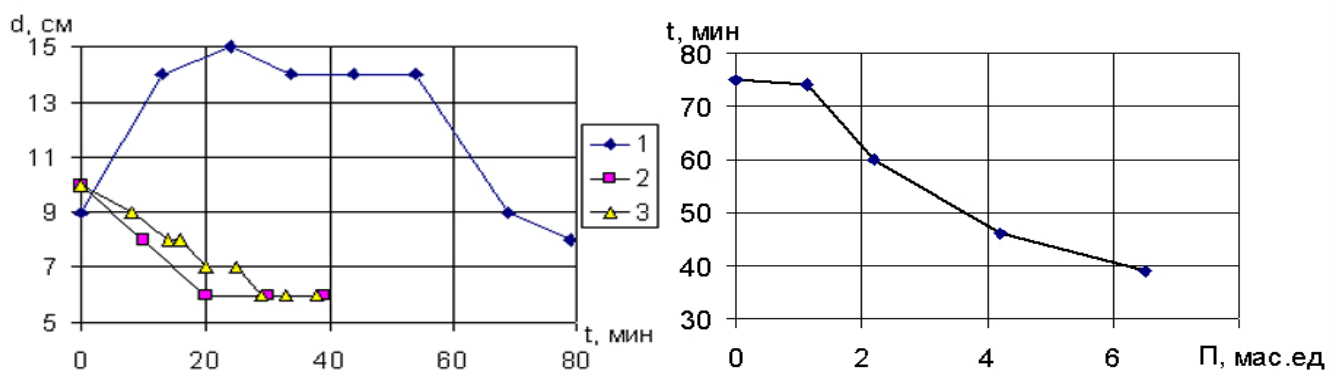
незначительном увеличении времени начала реакции при добавлении в НРС гумата натрия. Кроме того, снижается максимальная температура состава при изменении его фазового состояния. Так, при добавлении 6 масс. % гумата натрия, температура снизилась от 230 °С, в случае чистого НРС, до 151 °С.



1 – без добавок; 2, 3, 4, 5 – при добавлении 1,2, 3,6, 4,8, 6 масс. % гумата натрия

Рисунок 3.42 – Графики изменения температуры НРС во времени

Результаты экспериментов по определению подвижности смеси и сроков схватывания представлены на рис. 3.43 соответственно.



1 – без добавок; 2, 3 – при добавлении 2,1 масс. % (при $V/T=0,34$), 3,4 масс. % (при $V/T=0,37$) гумата натрия

а)

б)

Рисунок 3.43 – Графики изменение подвижности смеси во времени (а) и времени схватывания НРС (б) при добавлении в состав гумата натрия

Анализ графиков показывает, что введение в НРС гумата натрия приводит к резкому снижению ее подвижности. В отличие от базовой смеси, для которой наблюдается непродолжительное повышение подвижности на начальном этапе, при добавлении гумата снижение подвижности происходит сразу. При этом, чем меньше В/Т смеси, тем более резко происходит снижение подвижности. НРС полностью теряет подвижность в течение 20-27 минут, то есть в 3-4 раза быстрее смеси без добавок. Введение гумата натрия без дополнительного добавления воды приводит к нулевой подвижности НРС сразу после приготовления. В случае одновременного добавления с гуматом воды скорость потери подвижности зависит от В/Т.

Введение гумата натрия приводит к сокращению времени схватывания непропорционально массовой доле добавки (рис. 3.43 б). При этом характерно, что схватывание смеси не коррелирует с потерей подвижности. Так добавление 2,1% гумата натрия вызывает потерю подвижности смеси в 4 раза, а сокращение времени схватывания всего в 1,25 раза.

Таким образом, введение в НРС гумата натрия за счет связывания свободной воды обеспечивает регулирование и стабилизацию скорости гидратации, а в совокупности с остальными компонентами, приводит к ограничению произвольных выбросов смеси из полостей диаметром 50-100 мм в условиях подземных горных выработок. В результате исследований была разработана и запатентована невзрывчатая разрушающая смесь [305], содержащая следующие компоненты, масс. %: кальцинированная сода – 3,0 – 9,0, сульфитно-дрожжевая барда (СДБ) – 0,5 – 3,0, гумат натрия – 1 – 6, негашенная известь – остальное.

3.6 Аналитико-экспериментальный метод расчета динамики роста давления расширения невзрывчатых разрушающих смесей

Проведенные исследования физико-механических свойств НРС послужили основой для разработки метода расчета давления, развиваемого смесью в шпурах и скважинах.

Несмотря на то, что основное рабочее вещество (СаО), определяющее свойства смесей одинаковое, рецептуры НРС могут существенно отличаться, что оказывает влияние на динамику роста и величину максимального давления расширения. Разные партии имеют различное исходное сырье, что связано с колебаниями химического состава. Технология производства НРС не позволяет точно соблюдать пропорции входящих химических веществ. Перечисленные факторы объясняют разброс свойств не только между партиями НРС, но даже в пределах одной партии. Поэтому при промышленном использовании НРС необходима периодическая оценка их качества.

В общем случае порядок проведения исследований следующий:

1. Путем испытаний на стенде [269] проб, отобранных из каждой партии НРС, строят диаграмму «время (t_i) – давление расширения (P^*)», фиксируя деформации ΔV^* и температуру T^* во время опыта. По результатам экспериментов получают зависимость $P^*(t_i, \Delta V^*, T^*)$.

2. Сравнивают полученную диаграмму с образцовой и определяют, попадает ли НРС в «рабочую зону», если нет, то НРС данной партии не пригодна для применения. «Рабочая зона» определяется диапазоном не ниже 70% от образцового варианта в заданный промежуток времени.

При отсутствии исходных данных о динамике роста давления НРС, образцовая диаграмма может быть построена по результатам испытаний образцов НРВ - 80 по зависимости, полученной с коэффициентом корреляции 0,974

$$P^*(t_i, \Delta V^*, T^*) = 11,28 \ln(t_i) - 5,13, \text{ МПа} \quad (3.10)$$

Эксперименты проводились без предварительного сжатия, при объемных деформациях $\Delta V^* = 6,5\%$, температуре $T^* = 23 \text{ } ^\circ\text{C}$, в качестве источника внешнего питания использовался пресс ЗИМ-5Р.

3. Полученная по результатам стендовых исследований зависимость $P^*(t_i, \Delta V^*, T^*)$ принимается в качестве эталонной. После чего проводится коррек-

тировка результатов стендовых испытаний путем учета влияния реальных горно-геологических условий, конструкции шпурового заряда и способа разрушения. Это достигается введением коэффициентов допустимых объемных изменений $k(\Delta V)$, температуры $k(T)$, предварительного сжатия $k(P_0)$.

Таким образом, расчет давления расширения НРС в заданных условиях может быть произведен по зависимости

$$P(t_i, \Delta V, T, P_0) = P^*(t_i, \Delta V^*, T^*) \cdot k(\Delta V) \cdot k(T) \cdot k(P_0), \text{ МПа} \quad (3.11)$$

При этом

– $k(\Delta V)$ – коэффициент допустимых объемных изменений ΔV , %

$$k(\Delta V) = \frac{[-8,373 \ln(\Delta V) + 39,073]}{[-8,373 \ln(\Delta V^*) + 39,073]}; \quad (3.12)$$

– $k(T)$ – коэффициент влияния температуры окружающей среды T , °С

$$k(T) = \frac{[17,27 \ln(T) - 27,98]}{[17,27 \ln(T^*) - 27,98]}; \quad (3.13)$$

– $k(P_0)$ – коэффициент влияния предварительного сжатия P_0 , МПа

$$k(P_0) = -0,0024P_0^2 + 0,0767P_0 + 1. \quad (3.14)$$

Зависимости (3.12-3.13) могут быть использованы при диапазоне объемных изменений 0,5-50%, температуре окружающей среды 11-36 °С, величине предварительного сжатия 0-17,5 МПа.

Полученная величина давления расширения смеси может быть использована при расчете параметров разрушения горных пород с помощью НРС.

Выводы по разделу 3

1. Установлены четыре стадии работы НРС, характеризующиеся изменением фазового состояния воды в растворе, фиксируемым ЯМР-спектрометром, динамикой расширения системы, установленной на основании испытаний на УНТС и интенсивностью тепловыделения, отслеживаемой с помощью электронных термометров. Экспериментально установлено, что максимальное расширение отмечается на третьей стадии работы НРС и связано с возрастанием новообразований гидроксида кальция и переходом раствора в твердую фазу, что отмечается по скачку интенсивности спектральной линии ЯМР.

2. Определено влияние внешних факторов на скорость протекания реакции на каждой стадии работы НРС. Так, на первой и второй стадиях основные факторы – температура окружающей среды, температура смешиваемых компонентов, геометрические параметры заполняемой полости и количество НРС. На третьей стадии скорость реакции практически не зависит от внешних факторов и определяется толщиной помола и химическими добавками НРС. Время протекания четвертой стадии работы определяется в основном температурой окружающей среды.

3. Установлено, что гидратационное твердение и расширение происходят по-разному в образцах НРС в свободном состоянии и при ограничении объемных изменений. Так, на основании анализа спектров ЯМР установлено, что в условиях жесткой оболочки процесс протекает более интенсивно, характеризуется резким изменением фазового состояния воды из адсорбированного в связанное. Выявлено влияние добавок пластификатора СП-6, этановой кислоты и гумата натрия на протекание процесса гидратации.

4. Установлено, что характер работы НРС зависит от температурного режима, жесткости системы «массив-НРС», диаметра шнура. Объемные изменения расширяющихся смесей и развиваемые при этом давления связаны линейной зависимостью. Величина возникающего в процессе гидратации напряжения в НРС обратно пропорциональна коэффициенту его расширения. При этом эмпири-

ческая зависимость величины давления материала НРВ-80 (P_{24}) в возрасте 24 часа от допустимых объемных деформаций (v_0), аппроксимирующая данные экспериментов на стенде с коэффициентом корреляции $R^2=0,98$, имеет вид $P_{24} = -8,373 \ln(V_0) + 39,073$.

5. Определены физико-механические свойства НРС при расширении в результате обработки данных испытаний в камере УНТС. Следует принимать в качестве максимального давления, вызванного расширением НРС, значение средних напряжений σ_{cp} . Модуль поперечной деформации при расширении НРС, независимо от программы нагружения равен 0,235-0,255. При разрушении с помощью НРС значение модуля деформации может быть рассчитано по зависимости $E = 1987,3e^{0,1182 \cdot \sigma_{cp}}$, а в случае помещения НРС в полость с податливыми стенками – по зависимости $E = 36,64 \ln(\sigma_{cp}) + 97,31$.

6. Установлено, что при помещении НРС в замкнутую полость давление его расширения и увеличение объема в любом пространственном направлении определяется сопротивлением стенок полости в соответствующем направлении. Эксперименты на УНТС позволили установить, что рост давления обеспечивает не весь объем НРС в образце, а некоторая его часть, находящаяся в непосредственной близости от границы с полостью в которую он помещен.

7. Уточнено влияние температуры на режим работы НРС в диапазоне 20-50 °С. Установлено, что время начала роста объема структурных новообразований экспоненциально зависит от температуры материала, вмещающего НРС объекта. В результате испытаний НРС на стенде в температурном поле 11-36 °С была получена эмпирическая зависимость величины давления расширения смеси НРВ-80 в возрасте 24 часа (P_{24}) от температуры (T) $P_{24} = 17,27 \ln(T) - 27,98$.

8. Впервые установлено, что предварительное сжатие НРС позволяет повысить давление расширения, развиваемое в возрасте 24 часа (P_{24}), в 1,05-1,37 раза. Зависимость давления расширения от величины предварительного сжатия состава P_0 с коэффициентом корреляции 0,958 описывается квадратичной зависи-

мостью вида $P_{24} = -0,0662P_0^2 + 2,1319P_0 + 30,441$, МПа. Проведенные исследования послужили основой для создания способа разрушения горных пород [295].

9. Впервые установлено влияние электрического поля на протекание реакции гидратации НРС. Доказано, что с помощью электричества можно интенсифицировать работу НРС. Так, при воздействии на образец НРС напряжения в диапазоне 5-60 В, при расстоянии между электродами 7 см, скорость реакции повышается до 300 раз. Получены коэффициенты ускорения реакции, которые хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью, например, для расстояния между электродами 7 см $k_p = 1,237e^{0,0912U}$. Установлено влияние величины напряжения и времени инициирования на долю твердой фазы продуктов расширения и режим разрушения. Проведенные исследования позволили разработать и запатентовать способы разрушения горных пород [300, 301].

10. Впервые разработаны модифицированные составы НРС с добавлением портландцементов, этановой кислоты [304] и гумата натрия [305], ориентированные на применение в условиях подземных горных выработок.

11. Разработан аналитико-экспериментальный метод расчета динамики роста давления расширения НРС в зависимости от допустимых объемных изменений, температуры и предварительного сжатия.

РАЗДЕЛ 4

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

4.1 Особенности разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей

Механизм разрушения горных пород взрывом изучен достаточно детально. Упрощенно нагружение горных пород при взрыве можно представить в виде двух последовательно проходящих этапов. Сначала действует волна сжатия, создающая динамическое поле напряжений, а затем давление продуктов взрыва, создающее квазистатическое поле. Эти два вида нагружения являются причиной образования сложной картины разрушения породы между зарядом и свободной поверхностью и реализуются в раскрытии существующих и возникновении новых радиальных, кольцевых и хаотически направленных трещин, а также в образовании отколов породы у свободной поверхности массива (если таковая имеется).

При разрушении с помощью НРС динамическое поле напряжений отсутствует, соответственно эффект воздействия на массив физически сходный с давлением продуктов взрыва, но разрушение происходит при значительно меньших скоростях. Поскольку скорость роста трещины определяется скоростью роста напряжений на краях трещины, то при разрушении НРС более вероятно развитие магистральной трещины, чем ветвление, так как ветвление трещин связывают с достижением критической скорости [306].

Исследования разрушения горных пород взрывом и с помощью НРС выполнялись на моделях из эквивалентных материалов. Было проведено несколько опытов. В масштабе 1:5 моделировался массив пород, вмещающий шпур диаметром 43 мм, содержащий на первом этапе патрон с ВВ, на втором – НРС. В первой серии опытов [307] исследования проводились на гипсовых плитах размерами 240x240x60 мм с прочностью на одноосное сжатие 1,8 МПа. Анализ состояния поверхностей шпуров, после проведения экспериментов, показал, что при взрывном разрушении стенки шпура пересечены системой радиальных трещин, а при

невзрывном – стенки практически гладкие. Таким образом, несмотря на наличие трех открытых поверхностей для испытываемых плит, очевидно вследствие динамического воздействия взрыва, околошпуровая область разрушается, в то время как при квазистатическом нагружении стенки шпура остаются не разрушенными.

В качестве моделей следующего этапа исследований использовались блоки из канифоли, заливаемой в специальные формы 70x70x210 мм. Моделировалась хрупкая среда. На рис. 4.1 а представлен результат разрушения модели взрывом. Наблюдается сильное измельчение материала модели в непосредственной близости от заряда, образуются несколько (семь) радиальных трещин и достаточно сильное разрушение в центральной части модели. На рис. 4.1 б представлен результат разрушения с помощью НРС. Из рисунка видно, что характер разрушения существенно отличается от взрывного. Зона дробления вокруг заряда отсутствует, развивается одна магистральная трещина.



а)

б)

Рисунок 4.1 – Характер разрушения моделей из канифоли ВВ (а) и НРС (б)

Для понимания особенностей механизма разрушения был проведен опыт по разрушению канифольного блока с помощью НРС. Состояние модели фиксировали каждые 2 минуты цифровой фотосъемкой. Общий вид модели на разных стадиях разрушения приведен на рис. 4.2. Проведенные эксперименты позволили сделать следующие выводы. Разрушение происходит стадийно.

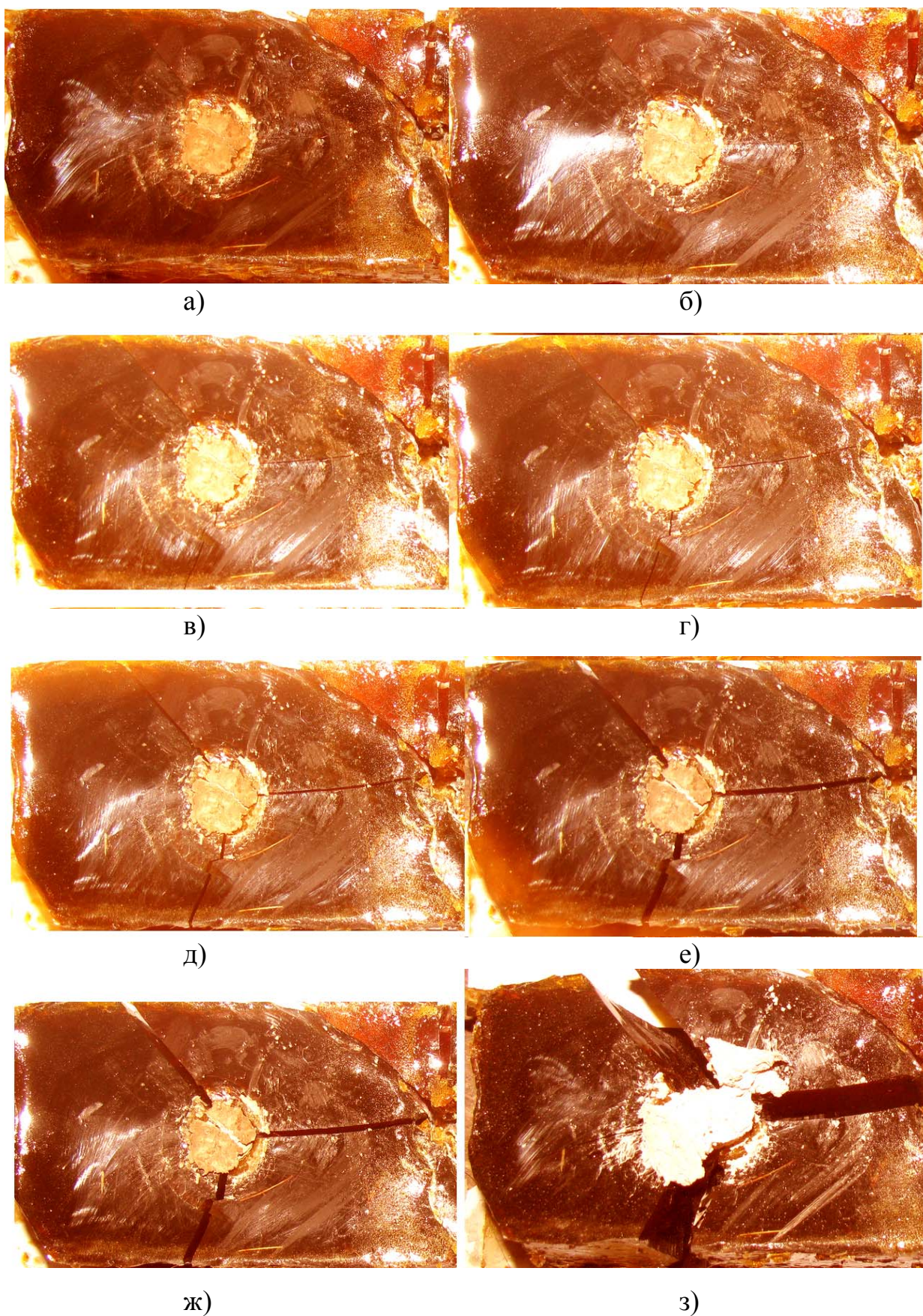


Рисунок 4.2 – Разрушение модели из канифоли с помощью НРС. Состояние через: а) 80 мин; б) 94 мин; в) 96 мин; г) 98 мин; д) 100 мин; е) 102 мин; ж) 106 мин; з) 118 мин

Установлено, что если расстояние от заряда НРС до свободной поверхности небольшое, то трещина быстро прорастает сразу от контура шнура до свободной поверхности, а затем медленно раскрывается по мере расширения НРС. Если же до свободной поверхности большое расстояние (более 10 диаметров шнура), то трещина стремительно прорастает на определенный шаг, затем останавливается, а через некоторое время (от нескольких секунд до нескольких минут) продолжает расти. Рост трещины происходит скачкообразно. После этого берега трещины медленно раскрываются под действием давления от расширения НРС. Ветвление трещины не наблюдается.

Подтверждением описанного механизма стадийного продвижения трещин могут служить результаты наблюдений за разрушением негабаритных блоков гранита с помощью НРС (рис. 4.3).

На основании проведенных экспериментов предлагается рассматривать процесс разрушения пород при помощи НРС в два этапа. Сначала, в результате высвобождения накопленной в процессе роста структурных новообразований в НРС упругой потенциальной энергии и ее перехода в поверхностную, наблюдается стремительное прорастание радиальных трещин. Затем – остановка их роста и дальнейшее раскрытие берегов трещин, которое имеет затухающий ступенчатый характер. Отличие в характере и механизме взрывного и квазистатического разрушения позволяет сделать вывод, что для расчета параметров разрушения с помощью НРС не подходят методики, используемые при взрывном разрушении горных пород.

4.2 Разработка модели разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями с учетом существующего поля напряжений

Расчет параметров невзрывного разрушения должен основываться на адекватном отражении механизма этого процесса. Анализ современных представлений о разрушении твердых тел, проведенный в п. 1.4, показывает, что наиболее полное отражение особенностей разрушения горных пород с помощью НРС мо-

жет быть получено на основании локального силового критерия Гриффитса-Ирвина. С этих позиций предложено следующее решение [308].

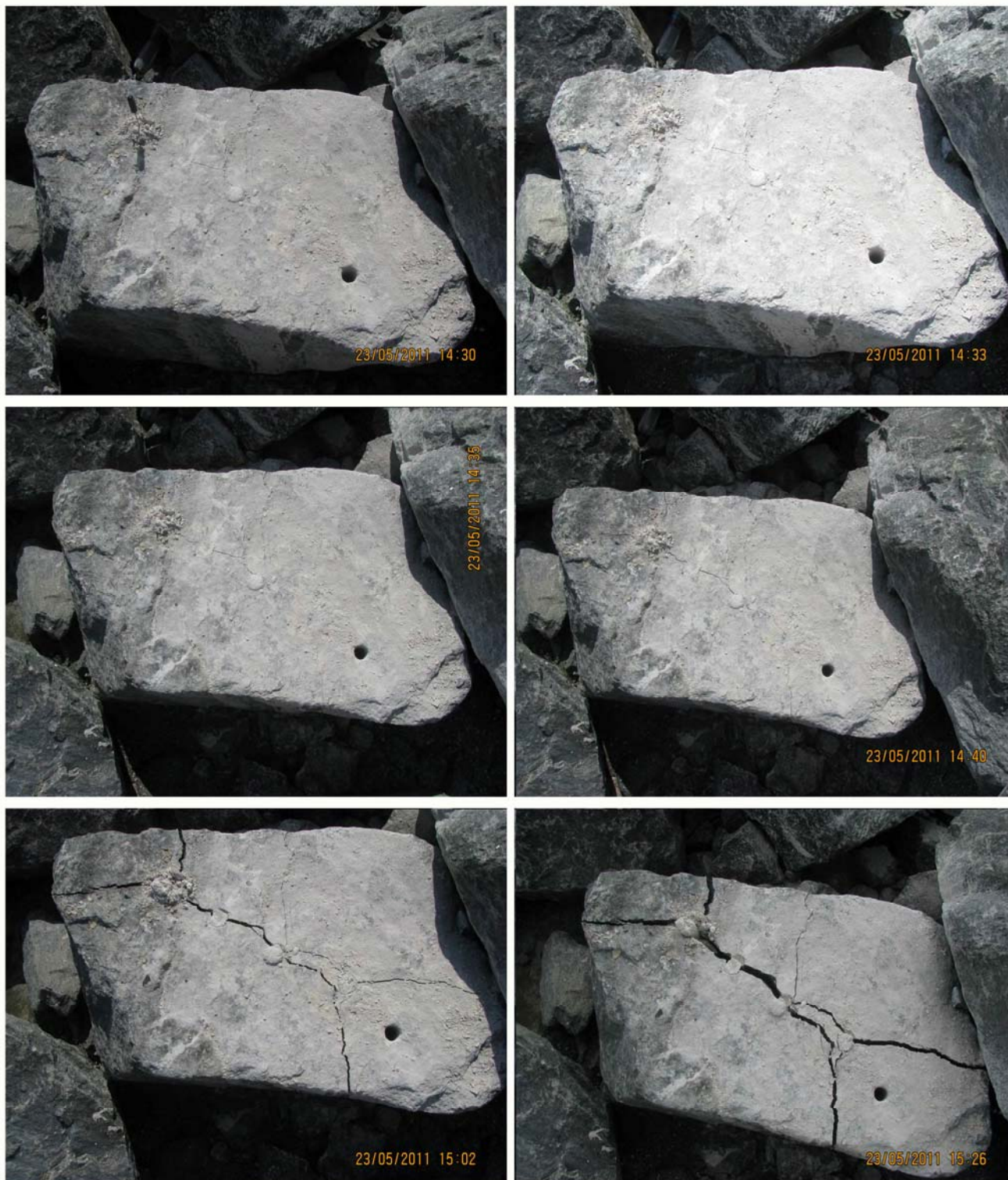
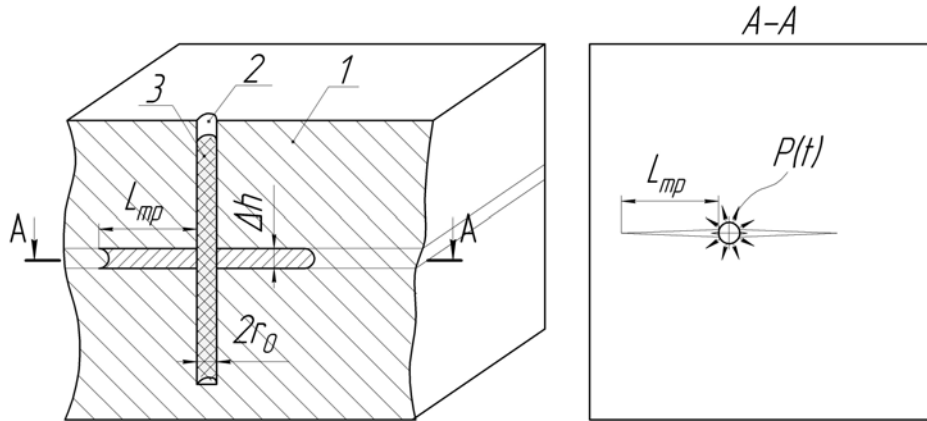


Рисунок 4.3 – Стадии разрушения гранитного блока с помощью НРС

Рассмотрим элементарный объем шпура круглого сечения радиусом r_0 и часть вмещающего его массива, ограниченного параллельными плоскостями, ориентированными нормально к оси шпура, с расстоянием между плоскостями равным Δh (рис. 4.4).



1 – разрушаемый объект; 2 – шпур; 3 – НРС

Рисунок 4.4 – Схема к расчету параметров разрушения с помощью НРС

Допустим, что в результате расширения НРС в объеме шпура ΔV

$$\Delta V = \pi r_0^2 \Delta h, \quad (4.1)$$

непосредственно перед разрушением реализуется некоторое квазигидростатическое давление равное давлению расширения P через некоторое время t

$$\sigma_{1нрс} = \sigma_{2нрс} = \sigma_{3нрс} = P. \quad (4.2)$$

Результаты испытаний НРС на УНТС, приведенные в раздел 3 показали, что материал затвердевшего НРС изотропен и обладает модулем упругости $E_{нрс}$, поэтому запишем энергию упругой деформации элемента объема в виде:

$$U = \frac{1}{2E_{нрс}} (\sigma_{нрс1}^2 + \sigma_{нрс2}^2 + \sigma_{нрс3}^2 - 2\mu_{нрс} (\sigma_{нрс1}\sigma_{нрс2} + \sigma_{нрс2}\sigma_{нрс3} + \sigma_{нрс3}\sigma_{нрс1})) \cdot \Delta V, \quad (4.3)$$

где E_{HPC} – модуль упругости НРС, МПа;

$\sigma_{1HPC}, \sigma_{2HPC}, \sigma_{3HPC}$ – главные напряжения в НРС, МПа;

μ_{HPC} – модуль поперечной деформации НРС.

Полагая, что на рассматриваемый объем извне действует поле напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, а также с учетом (4.3)

$$U = \frac{((P^2 + \sigma_1^2) + (P^2 + \sigma_2^2) + (P^2 + \sigma_3^2) - 2\mu_{HPC}((P^2 + \sigma_1\sigma_2) + (P^2 + \sigma_2\sigma_3) + (P^2 + \sigma_3\sigma_1))) \cdot \Delta V}{2E_{HPC}}. \quad (4.4)$$

Для простоты расчетов заменим множитель $(P^2 + \sigma_1^2) + (P^2 + \sigma_2^2) + (P^2 + \sigma_3^2) - 2\mu_{HPC}((P^2 + \sigma_1\sigma_2) + (P^2 + \sigma_2\sigma_3) + (P^2 + \sigma_3\sigma_1))$ на Q^2 , тогда с учетом (4.4)

$$U = \frac{Q^2}{2E_{HPC}} \cdot \pi r_0^2 \Delta h. \quad (4.5)$$

Следуя энергетическому критерию Гриффитса, полагаем, что в результате распространения трещин в двух противоположных направлениях от оси шпура напряженное состояние в элементе объема НРС ΔV полностью снимается и энергия расходуется на образование свободной поверхности:

$$\Delta S = 4\gamma_p \Delta h L_{mp}, \quad (4.6)$$

где γ_p – поверхностная энергия породы, Дж/м²;

L_{mp} – длина трещины, м.

Тогда, уравнение энергетического баланса (4.5), с учетом выражения (4.6) можно записать в виде:

$$\frac{Q^2}{2E_{HPC}} \cdot \pi r_0^2 \Delta h = 4\gamma_p \Delta h L_{mp}. \quad (4.7)$$

Откуда можем получить выражение для длины трещины

$$L_{mp} = \frac{Q^2 \cdot \pi \cdot r_0^2}{8E_{HPC} \cdot \gamma_p}. \quad (4.8)$$

Обычно в инженерных расчетах трещиностойкость твердых тел характеризуется не поверхностной энергией, а коэффициентом интенсивности напряжений K_I . Поскольку в нашем случае рост трещины будет вызван растягивающими напряжениями в направлении ортогональном оси трещины, имеют место трещины нормального разрыва. В этом случае коэффициент интенсивности напряжений K_I можно выразить через модуль упругости и поверхностную энергию:

$$K_I = \sqrt{2E_M \gamma_p}, \quad (4.9)$$

где E_M – модуль упругости породы, МПа.

Подстановка (4.9) в (4.8) приводит к выражению для длины трещины, записанному в виде

$$L_{mp} = \frac{Q^2 \cdot \pi \cdot r_0^2 E_M}{4E_{HPC} \cdot K_I^2}. \quad (4.10)$$

Проведя обратную замену Q^2 , получим формулу

$$L_{mp} = \frac{((P^2 + \sigma_1^2) + (P^2 + \sigma_2^2) + (P^2 + \sigma_3^2) - 2\mu_{HPC}((P^2 + \sigma_1\sigma_2) + (P^2 + \sigma_2\sigma_3) + (P^2 + \sigma_3\sigma_1))) \cdot \pi \cdot r_0^2 E_M}{4E_{HPC} \cdot K_I^2}. \quad (4.11)$$

В случае, когда на разрушаемый объект не действуют внешние напряжения или их величиной можно пренебречь, формула 4.11 примет вид

$$L_{mp} = \frac{3P^2 \cdot \pi \cdot r_0^2 E_M}{8E_{HPC} \cdot K_I^2} (1 - 2\mu_{HPC}). \quad (4.12)$$

В зависимости (4.12) значения E_{HPC} , μ_{HPC} , P можно определить экспериментально для конкретно применяемого типа НРС. Из приведенных в разделе 3 лабораторных испытаний свойств НРС, известно, что модуль поперечной деформации при расширении НРС может быть принят 0,235-0,255, значение модуля упругости НРС следует принимать 20-30 ГПа. Значение P целесообразно рассчитывать на основании предложенной в разделе 3 аналитико-экспериментальной зависимости.

Значения E_M , K_I характеризуют свойства разрушаемого объекта, при этом E_M является константой материала и может определяться экспериментально. Коэффициент интенсивности напряжений K_I может быть определен по нормативному документу [133], в котором рассмотрены методы определения характеристик трещиностойкости на лабораторных образцах.

В ряде случаев разрушение с помощью НРС может быть реализовано при работе заряда на отрыв (откол) на одну свободную поверхность, в таком случае магистральная трещина не образуется. При таком подходе параметры буровых работ необходимо рассчитывать таким образом, чтобы ближайший к открытой поверхности шпур с НРС срабатывал в квазисплошном массиве, образуя вторую свободную поверхность, а уже последующие шпуры продолжали разрушение за счет роста магистральной трещины.

Таким образом, с целью определения расстояния до свободной поверхности, используем методы механики сплошной среды. Для получения корректного решения, на наш взгляд, следует рассматривать задачу о нагружении упругого полупространства давлением P_p в цилиндрической полости радиуса R_p , расположенной на расстоянии ω от открытой поверхности (рис. 4.5).

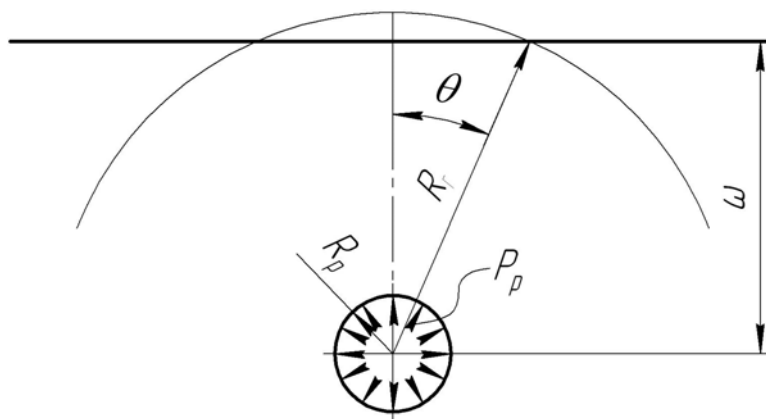


Рисунок 4.5 – Схема нагружения упругого полупространства квазистатическим внутришпуровым давлением НРС

Решение в строгой постановке сводится к отысканию бигармонической функции в двухсвязной области, удовлетворяющей условиям на внутренней и

внешней поверхностях. Такое решение связано со значительными математическими трудностями, которые не позволяют учесть многие геометрические и физические факторы реальных условий разрушения. Поэтому примем следующее допущение: величину наружного радиуса эквивалентного упругого цилиндра R_r будем определять в зависимости от угла θ выражением

$$\left. \begin{aligned} R_r &= \frac{\omega}{\cos \theta} \cdot n p u \cdot 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \cdot u \cdot n p u \cdot \frac{3\pi}{2} \langle 0 \leq 2\pi; \\ R_r &= \infty \cdot n p u \cdot \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Замена радиуса цилиндрической поверхности R_r вышеприведенным условием делает решение задачи нестрогим. Условие несколько искажает действительную картину распределения напряжений, что выражается в искусственном повороте площадок главных напряжений по отношению к их фактическому положению, т.е. при этом в качестве главных рассматриваются те же площадки, что и при решении осесимметричной задачи о нагружении цилиндра. Это допущение позволяет значительно упростить расчет, учесть влияние открытой поверхности произвольной конфигурации.

Формула Лямэ для осесимметричного нагружения толстостенного цилиндра [252], при условии (4.13), дает возможность получить зависимость распределения компонентов тензора напряжений в массиве горных пород с учетом влияния открытой поверхности:

$$\sigma_{r(\theta)} = \frac{P_p R_p^2 \cos^2 \theta}{\omega^2 - R_p^2 \cos^2 \theta} \left(1 \pm \frac{\omega^2}{R^2 \cos^2 \theta} \right). \quad (4.14)$$

Прочность горных пород на растяжение значительно меньше их прочности на сжатие, поэтому контуры зоны развития трещин под квазистатическим действием давления НРС будут определяться условием $\sigma_\theta = \sigma_{расм}$. Подставив в уравнение (4.14) $\sigma_{расм}$ и решив его относительно R , получим:

$$R^* = R_p \omega \frac{\sqrt{P_p}}{\sqrt{\sigma_{расм} \omega^2 - R_p^2 (\omega_{расм} - P_p) \cos^2 \theta}}, \quad (4.15)$$

где R^* – расстояние до внешней границы зоны развития трещин, м.

Проведенные экспериментальные работы позволили определить, что для создания магистральной трещины по строчке шпуров под углом 90 градусов к открытой поверхности, расстояние от нее до ближайшего шпура должно быть равно

$$\omega = R_{кр} \cos \theta, \quad (4.16)$$

где $R_{кр}$ – предельный радиус эквивалентного упругого цилиндра R_r , м;

φ – угол внутреннего трения породы, град.

При этом угол θ должен находиться в диапазоне $0 \leq \theta \leq \frac{\varphi}{2}$. В случае если $\omega > R_{кр}$, разрушение не происходит, а если $\theta > \frac{\varphi}{2}$, происходит образование откольной воронки.

Предложенная методика позволяет учесть влияние открытой поверхности произвольной конфигурации на распределение напряжений в зоне квазистатического действия НРС. Задаваясь функцией, описывающей линию открытой поверхности на плоскости, и получив из ее решения зависимость $R_r = f(\theta)$, преобразуем уравнение напряжений к виду

$$\sigma_{r\theta} = \frac{P_p R_p^2}{f^2(\theta) - R_p^2} \left[1 \pm \frac{f^2(\theta)}{R^2} \right], \quad (4.17)$$

откуда можно найти радиус зоны развития трещин при квазистатическом действии НРС. При наличии давления на внешней границе параметры напряженного состояния определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{P_p R_p^2 - P_r R_r^2}{R_r^2 - R_p^2} - \frac{(P_p - P_r) R_p^2 R_r^2}{R^2 (R_r^2 - R_p^2)}, \\ \sigma_\theta &= \frac{P_p R_p^2 - P_r R_r^2}{R_r^2 - R_p^2} + \frac{(P_p - P_r) R_p^2 R_r^2}{R^2 (R_r^2 - R_p^2)}. \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Таким образом, в ряде случаев, расчет параметров разрушения предлагается производить в два этапа. На первом определяется расстояние от ближайшего шпура с НРС до открытой поверхности, на втором рассчитывается расстояние между остальными шпурами с позиций развития магистральной трещины. Проведенные исследования позволяют рассчитать параметры невзрывного разрушения горных пород шпуровым способом в условиях широкого спектра горно-геологических и горнотехнических условий.

4.3 Разработка способов и средств направленного разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей

В практике ведения горных работ одной из актуальных задач является безопасное и управляемое разрушение пород в заданном направлении. Одним из перспективных современных методов разрушения является использование НРС.

Известные способы разрушения невзрывчатыми смесями включают бурение шпуров и заполнение их приготовленной рабочей смесью. В результате гидратации НРС увеличивает свой объем и создает за счет этого статические напряжения на стенки шпура, рост которых приводит к разрушению пород. В процессе гидратации смеси создается одинаковое во всех направлениях давление на стенки шпура. Места образования трещин и пути их развития определяются структурными ослаблениями и неоднородностями пород, имеющими случайный характер распределения по объему. Поэтому сложно исключить нежелательное разрушение по плоскостям, не совпадающим с рядами шпуров (рис. 4.6 а) или появление дополнительных трещин на стенках шпура, не совпадающих с магистральным направлением (рис. 4.6 б).



а)

б)

Рисунок 4.6 – Трещины, развиваемые по плоскостям, не совпадающим с рядами шпуров (а) и не совпадающие с магистральным направлением разрушения (б) при отколе блока

Таким образом, применение традиционной технологии разрушения НРС не позволяет обеспечить направленное разрушение путем создания магистральной трещины и поддержание ее роста в требуемом направлении при сохранении сплошности остальной части массива.

Изучение механизма образования трещины в породах проводилось путем анализа распределений напряжений вокруг шпура с НРС [309]. Исследование проводили с помощью численного математического моделирования МКЭ.

Решалась объемная задача в нелинейной постановке. Моделировался участок массива, вмещающий шпур с НРС диаметром 45 мм. Массив был представлен песчаником с пределом прочности на одноосное сжатие 80 МПа и пределом прочности на одноосное растяжение 8 МПа. Рост давления расширения НРС задавался путем пошагового повышения нагрузки с сохранением результатов предыдущего шага решения, то есть время задавалось неявно. Исходные данные для моделирования были взяты из кадастра физических свойств горных пород [275].

В качестве рабочей была принята первая теории прочности. Так как, для исследуемого материала допускаемые напряжения на растяжение $[\sigma_p]$ и на сжатие $[\sigma_c]$ различны, то условие прочности выражается в виде

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \leq [\sigma_p]; \\ |\sigma_3| \leq [\sigma_c] \end{array} \right\} \quad (4.19)$$

Результаты моделирования представлены на рис. 4.7 в виде картин распределения алгебраически наибольших σ_1 и наименьших σ_3 главных напряжений.

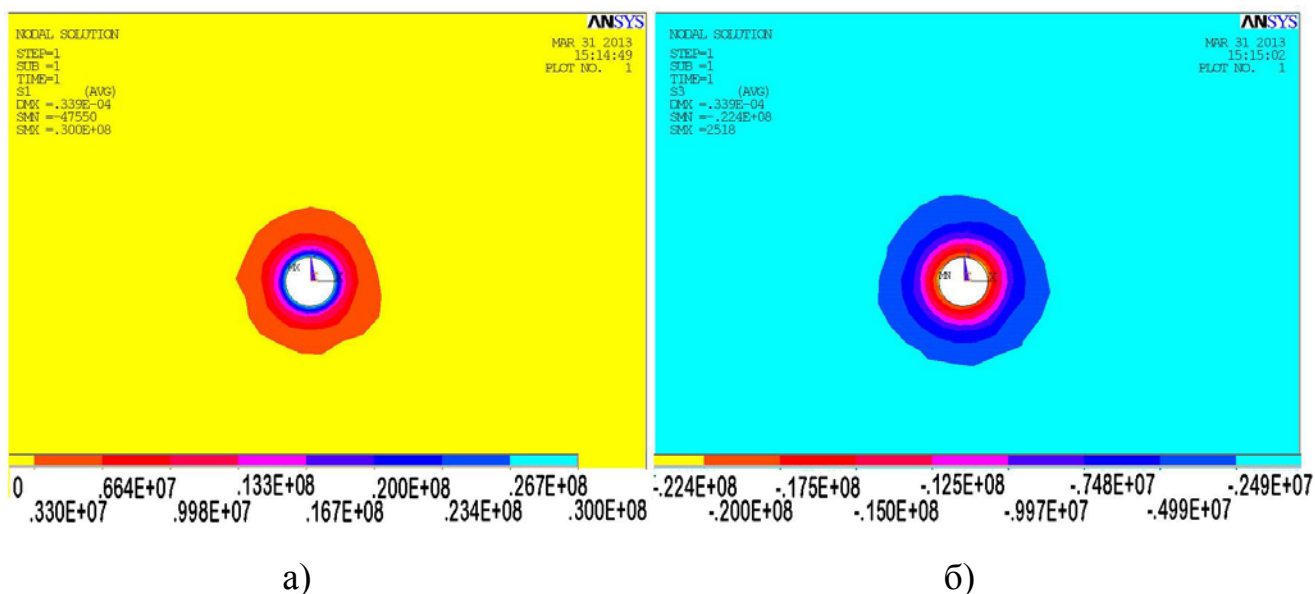


Рисунок 4.7 – Картины распределения главных напряжений σ_1 (а) и σ_3 (б) в модели при давлении расширения 30 МПа

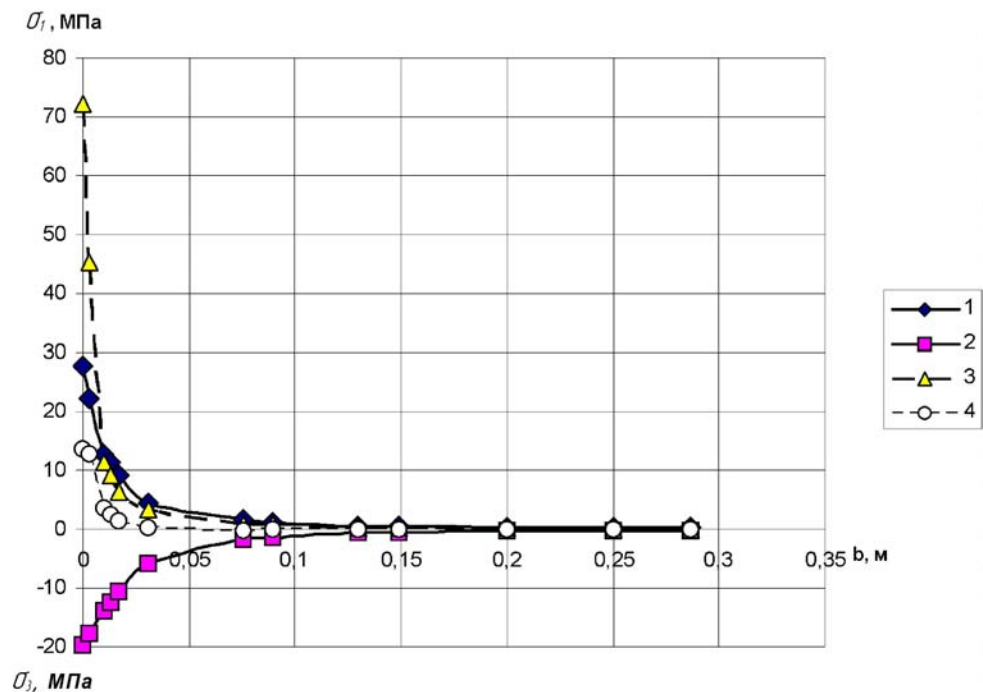
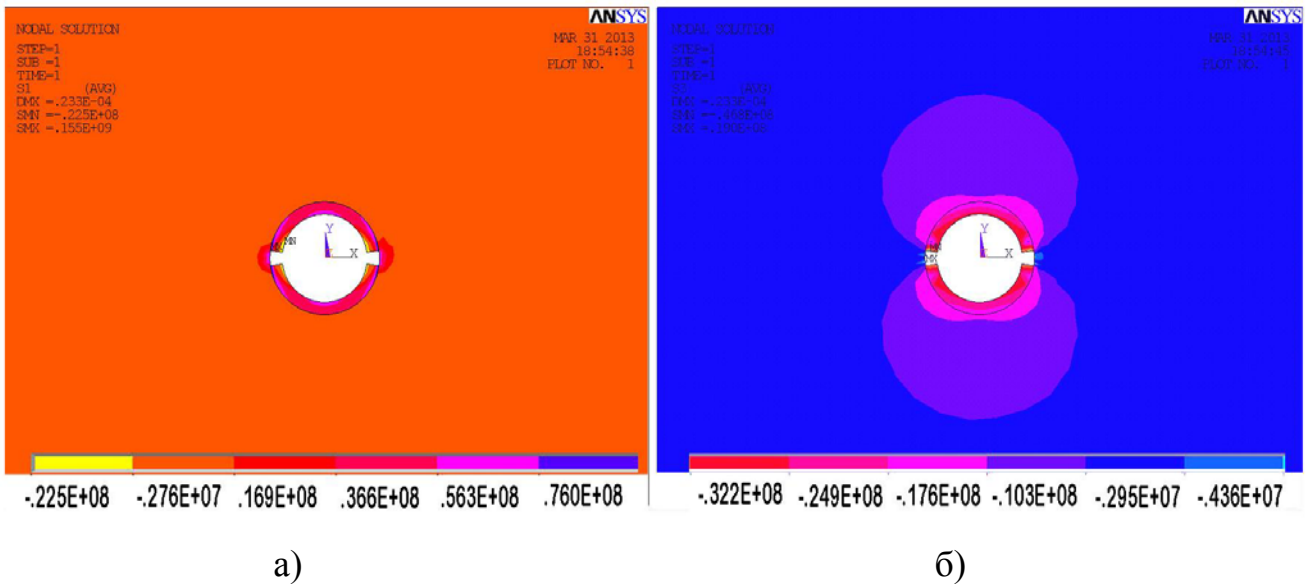
Анализ показывает: максимальные главные напряжения σ_1 и σ_3 возникают на стенках шпура; главные напряжения σ_1 во всей модели являются растягивающими или равны нулю; повышенные напряжения распределены равномерно вокруг шпура. По абсолютной величине максимальное значение σ_1 равно 27,7 МПа на стенках шпура, то есть в 3,4 раза превышают предел прочности песчаника на растяжение. Равномерное распределение напряжений создает условия (4.19) для образования трещины на стенках шпура по линии наименьшего сопротивления с учетом локальных ослаблений, что не позволяет управлять направлением разрушения. Главные напряжения σ_3 во всей модели являются сжимающими или равны нулю. Повышенные напряжения распределены равномерно вокруг

шпура по абсолютной величине, максимальное значение σ_3 равно – 19,6 МПа на стенках шпура, что в 4 раза меньше предела прочности песчаника на сжатие. То есть, условия (4.19) для разрушения от сжатия не возникают.

Для обеспечения направленного управляемого разрушения предлагается изменить равномерное поле напряжений на стенках шпура за счет формирования зон концентрации напряжений в требуемом месте. При этом, учитывая, что прочность горных пород на растяжение намного меньше прочности на сжатие, для обеспечения направленного разрушения эффективней создавать зоны концентрации растягивающих напряжений. Для создания концентраторов без изменения геометрии шпура предлагается использовать специальные патроны. Силовой элемент патрона может быть принципиально представлен в виде двух половин трубы, полученных продольным диаметральной разрезом. В этом случае помещение НРС в шпур в патронах обеспечивает возникновение в разрушаемом объекте, в одном из диаметральных направлений шпура, повышенных растягивающих напряжений и создание условий для роста магистральной трещины от стенок шпура вглубь массива. При этом предотвращается разрушение материала в направлениях, не совпадающих с направлением магистральной трещины.

Для проведения сравнения МКЭ был смоделирован и второй случай – помещение НРС в шпур в патроне при прочих равных условиях. Патрон моделировался материалом со свойствами стали СТ-3. Распределение главных напряжений представлены на рисунках 4.8 а, б, результаты моделирования в виде графиков изменения алгебраически наибольших и наименьших главных напряжений по мере удаления от стенки шпура по линии разрушения – на рис. 4.8 в.

Анализ рисунков 4.7-4.8 показывает, что использование предложенного способа направленного разрушения приводит к изменению характера распределения напряжений в околошпуровой области. Напряжения σ_1 в теле модели как растягивающие, так и сжимающие. Между элементами оболочки патрона σ_1 являются растягивающими, по абсолютной величине максимальное значение σ_1 равно 72,1 МПа на стенках шпура по линии направленного разрушения, то есть в



1, 2 – НРС помещена непосредственно в шпур; 3, 4 – НРС помещена в шпур в патроне с зазором между элементами патрона 6 мм

в)

Рисунок 4.8 – Распределение в модели главных напряжений:

а, б – в виде изополей σ_1 и σ_3 соответственно, при помещении НРС в шпур в патроне с зазором между элементами патрона 6 мм и давлении расширения 30 МПа;

в – в виде графиков распределения σ_1 и σ_3 в модели по линии разрушения при давлении расширения 30 МПа

9 раз превышают предел прочности песчаника на растяжение. На стенках шпура за границей зоны влияния зазора между элементами патрона НРС σ_1 являются сжимающими. Значит, можно утверждать, что неконтролируемого разрушения при использовании патронов не будет.

Кроме того, наибольшие главные напряжения σ_1 при использовании патронов по абсолютной величине в 2,6 раза больше, чем при помещении НРС непосредственно в шпур. При применении патронов характер распределения σ_3 совпадает с характером распределения σ_1 . Между элементами оболочки патрона σ_3 являются растягивающими, по абсолютной величине максимальное значение σ_3 равно 13,5 МПа на стенках шпура по линии направленного разрушения. На стенках шпура за границей зоны влияния зазора между элементами патрона НРС σ_3 являются сжимающими (максимальное значение – 17,6 МПа). Условия (4.19) для разрушения от сжатия также не возникают.

Анализ векторов перемещений массива в моделях с патроном и без патрона (рис. 4.9) показывает, что деформирование околошпуровой области происходит по-разному.

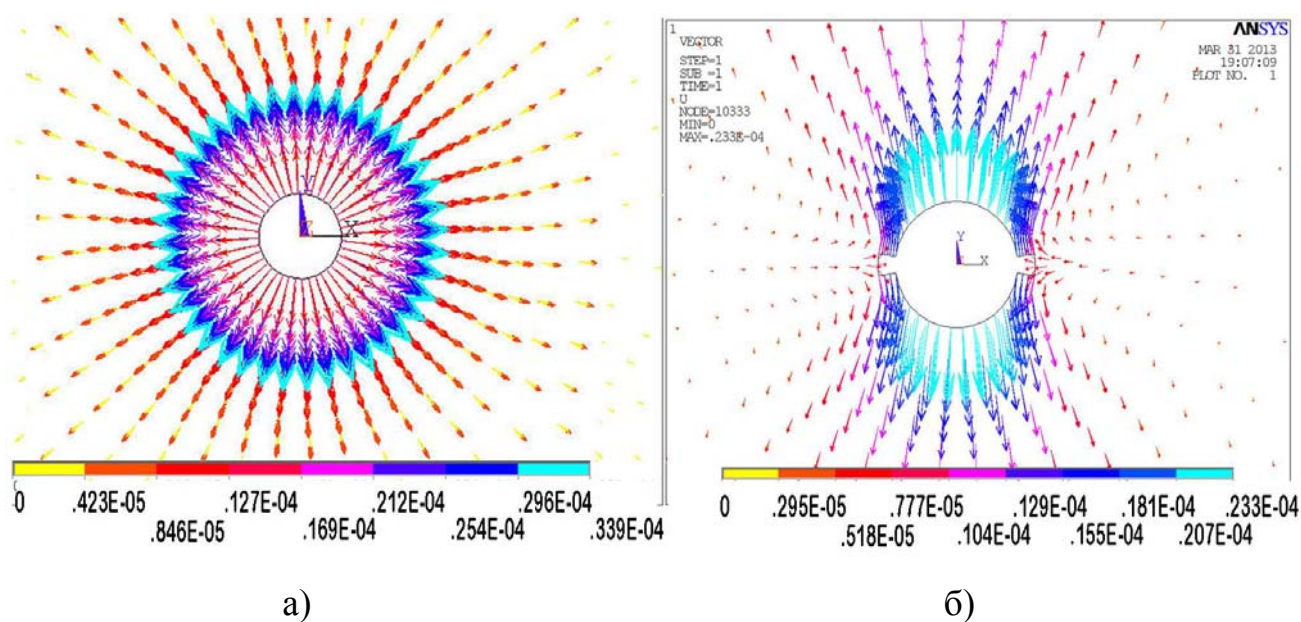


Рисунок 4.9 – Векторы перемещений в моделях без патрона (а) и с патроном НРС (б)

Так, смещения в моделях без патрона равномерно распределены от стенок шпура в радиальном направлении (рис. 4.9 а), а в модели с патроном смещения осесимметричны относительно зазора между оболочками патрона. При этом визуально наблюдается, что участки модели, соприкасаемые с оболочкой патрона, движутся во взаимно противоположных направлениях, что приводит к разрушению материала модели в зазорах (рис. 4.9 б).

Следовательно, применение патронов НРС приводит к изменению картины распределения напряжений вокруг шпура, возникновению критического состояния в породе в требуемом месте, в то время как остальная область экранирована от растягивающих напряжений. При этом наибольшие главные напряжения $\sigma_{1(n)}$, при использовании патронов с зазором между элементами 6 мм, по абсолютной величине в 2,6 раза больше, чем при помещении НРС непосредственно в шпур и в 9 раз больше предела прочности на растяжение породы.

Одним из важнейших параметров предлагаемого способа является зазор между элементами оболочки патрона. Для выяснения влияния этого параметра были проведены исследования, в которых зазор между элементами оболочки патрона изменяли в диапазоне 2-12 мм. В результате проведенных исследований [309, 310] получили распределение главных напряжений вокруг шпура с патроном НРС.

В качестве критерия увеличения напряжений при применении предлагаемого способа направленного разрушения целесообразно ввести коэффициент концентрации растягивающих напряжений на стенках шпура k_{σ_1} , который равен отношению максимальных главных напряжений $\sigma_{1(n)}$, возникающих в модели с патроном, к максимальным главным напряжениям $\sigma_{1(u)}$ для модели, имитирующей помещение НРС непосредственно в шпур. Поскольку напряжения $\sigma_{1(u)}$ при помещении НРС в шпур примерно равны давлению расширения НРС P , целесообразно принимать

$$k_{\sigma_1} = \frac{\sigma_{1(n)}}{P}. \quad (4.20)$$

График изменения коэффициента концентрации напряжений в зависимости от расстояния между элементами оболочки патрона представлен на рис. 4.10.

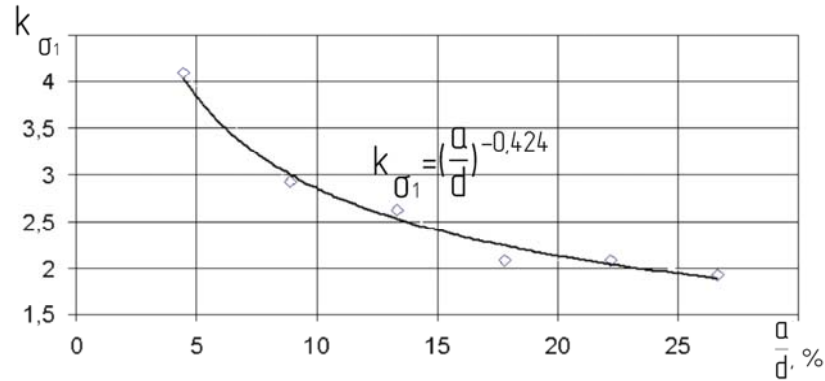


Рисунок 4.10 – График зависимости коэффициента концентрации растягивающих напряжений на контуре шпура от расстояния между элементами оболочки патрона НРС относительно диаметра шпура

Проведенные исследования показали, что при диапазоне зазора 4-27% от диаметра шпура, коэффициент концентрации растягивающих напряжений удовлетворительно описывается степенной зависимостью вида

$$k_{\sigma_1} = 1,078 \left(\frac{a}{d} \right)^{-0,424} . \quad (4.21)$$

Таким образом, с помощью предлагаемого способа можно повысить растягивающие напряжения в требуемом месте до 4 раз по сравнению с помещением НРС непосредственно в шпур.

Расчет расстояния между шпурами для направленного разрушения горных пород предлагается проводить по зависимости, полученной на основе формулы 4.11, в которую в качестве множителя введен полученный выше коэффициент концентрации растягивающих напряжений. Таким образом, формула примет вид:

$$L_{mp} = k_{\sigma_1} \frac{((P^2 + \sigma_1^2) + (P^2 + \sigma_2^2) + (P^2 + \sigma_3^2) - 2\mu_{НРС}(P^2 + \sigma_1\sigma_2) + (P^2 + \sigma_2\sigma_3) + (P^2 + \sigma_3\sigma_1))) \cdot \pi r_0^2 E_M}{4E_{НРС} \cdot K_I^2} . \quad (4.22)$$

Проверку описанного способа проводили в лабораторных условиях при разрушении гипсовых плит. Для этого в плитах бурили шпурь диаметром 27 мм, недобуривая 10 мм до донной части. Далее, в первом случае заливали смесь непосредственно в шпурь, во втором – в патроны НРС, которые помещали в шпурь. Патроны представляли собой две половины пластиковой тонкостенной трубы, полученные продольным диаметрально разрезом, с зазором 2 мм. Общий вид разрушенных плит приведен на рисунке 4.11.

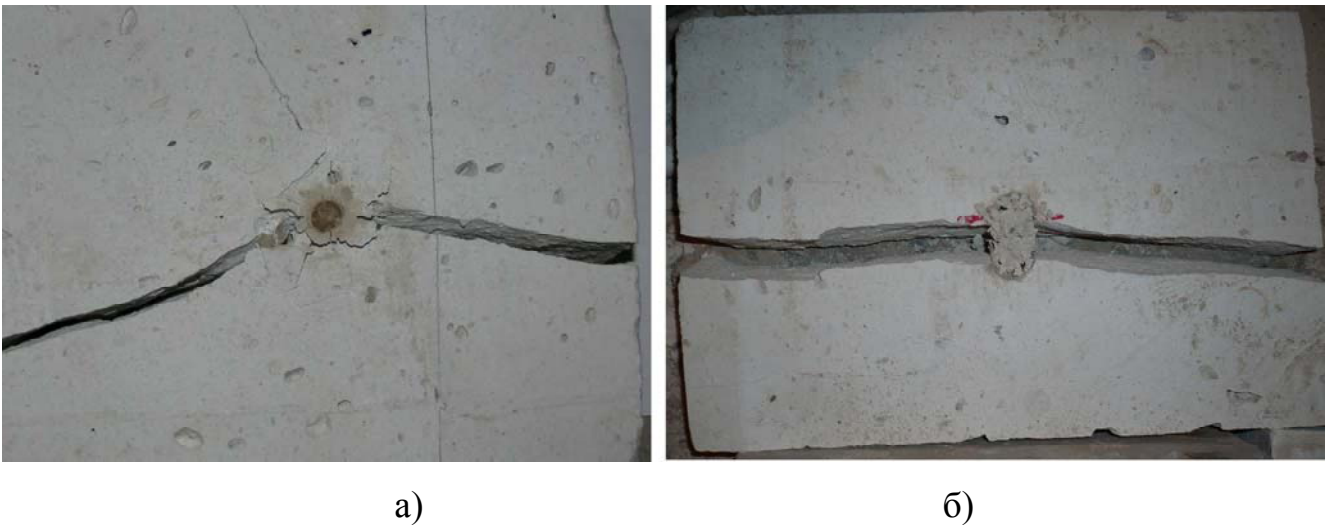


Рисунок 4.11 – Разрушенные гипсовые плиты при помещении НРС непосредственно в шпур (а) и в патроне (б)

Анализ характера разрушения показывает, что в первом случае в плите образовались две крупные и одна мелкая трещины, вышедшие на границу плиты, которые разрушили ее на три части. От стенок шпура образовались также две более мелкие трещины, не проросшие до границы плиты. При установке в шпур патронов с НРС в плите образовалась одна магистральная трещина в направлении, совпадающем с заданным (заданное направление обозначено чертой на плите), которая разрушила плиту по длинной стороне на две части. Других трещин не возникло, околошпуровая область осталась ненарушенной. Таким образом, характер разрушения плит был разный. Проведенный эксперимент подтвердил работоспособность предложенного способа.

Для возможности практической реализации предложенной идеи направленного разрушения были разработаны и запатентованы две конструкции патрона НРС (рис. 4.12). Предлагаемый [311] патрон НРС содержит герметичную оболочку, внутри которой помещена смесь, размещенную внутри контейнера, представляющего собой трубу с двумя продольными диаметрально расположенными прорезами, выполненными с верхнего торца трубы, и жестко закрепленной нижней крышкой. Конструкция патрона приведена на рис. 4.12 а.

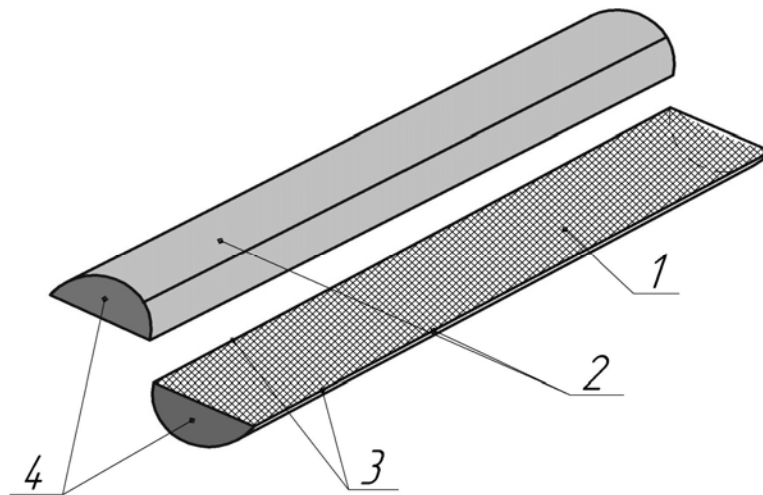


Рисунок 4.12 – Конструкции патрона НРС для направленного разрушения горных пород

а – общий вид патрона НРС [311]; б – поперечный разрез [311];

в – общий вид патрона НРС [312]

Прорези выполняются механическим способом с верхнего торца трубы так, чтобы в нижней части патрона на 0,5-1,0 диаметра труба осталась целой. Соборанный патрон помещается в шпур таким образом, чтобы прорезы, выполненные в трубе контейнера, совпадали с необходимым направлением разрушения. При размещении патрона в восходящих шпурах выполняется его фиксация с помощью деревянного клина.

Патрон НРС [312] содержит водонепроницаемую оболочку, которая выполнена не менее чем из двух половин трубы, полученных продольным диаметральной разрезом, каждая из которых имеет глухой торец, внутри которой помещен НРС. При этом длина патрона составляет 10-15 его диаметров, а водонепроницаемая оболочка выполнена из материала с модулем упругости не менее $1 \cdot 10^{11}$ Па с пределом прочности на одноосное сжатие не меньше 60 МПа. Конструкция патрона приведена на рис. 4.12 б.

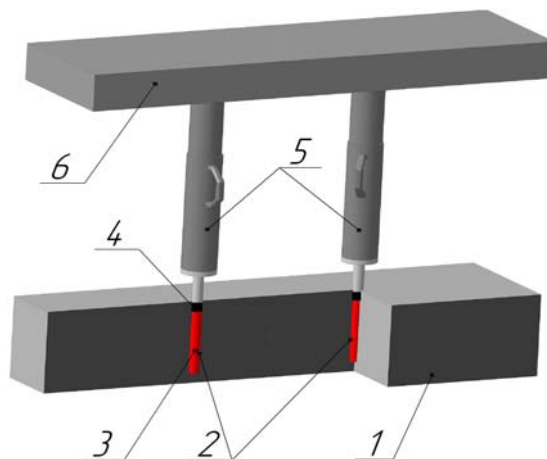
Помещение НРС в шпур в патронах обеспечивает возникновение в разрушаемом объекте, в одном из диаметральных направлений шпура, повышенных растягивающих напряжений. При превышении ими предела прочности пород на растяжение происходит разрыв связей в материале, и создаются условия для роста магистральной трещины от стенок шпура вглубь массива. При этом предотвращается разрушение в направлениях, не совпадающих с магистральной трещиной. Таким образом, проведенные исследования позволили разработать способ направленного разрушения горных пород, обосновать его параметры и предложить средства для его реализации.

4.4 Разработка способов разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей

На основании выявленных закономерностей кинетики расширения НРС под воздействием различных физических полей и намеченных направлений повышения эффективности их работы в шпуровых и скважинных зарядах были раз-

работаны и запатентованы следующие способы невзрывного разрушения горных пород.

В основу изобретения [295] поставлена задача усовершенствования способа разрушения горных пород, в котором за счет повышения скорости гидратации путем предварительного сжатия НРС обеспечивается возможность повышения давления на стенки шпура при расширении НРС. Разработанный способ разрушения горных пород включает бурение шпуров, размещение в них НРС, размещение в устьевой части шпура пакера и принудительное влияние на скорость течения реакции гидратации путем создания начального давления смеси в шпуре. При этом начальное давление НРС в шпуре может создаваться механическим способом, например с помощью гидростойки, или путем размещения в донной части шпура слоя НРС, который имеет более высокую скорость реакции гидратации. Сущность способа поясняется на рис. 4.13.



1 – разрушаемая горная порода; 2 – шпур; 3 – НРС; 4 – пакер; 5 – средство создания начального давления; 6 – кровля горной выработки

Рисунок 4.13 – Способ разрушения горных пород [295]

Размещение пакера в устьевой части шпура позволяет герметизировать шпур и предотвратить вытекание раствора НРС из шпура при его расширении и создании начального давления, что ограничивает объемные деформации НРС и повышает скорость роста давления. Создание начального давления НРС в шпуре позволяет повысить давление расширения и ускорить динамику его роста. Пара-

метрами способа является давление предварительного сжатия и расстояние между шпурами. Сжатие гидростойками типа СУГ и ГСК создает предварительное напряжение НРС более 17,5 МПа. Давление расширения НРС может быть рассчитано, в этом случае, по формулам 3.14, 3.11 из соображений максимума предварительного сжатия, для достижения необходимого времени разрушения. Расстояние между шпурами рассчитывается по формуле 4.12 .

Техническая реализация предложенного направления повышения эффективности работы НРС за счет регулирования теплообменных процессов осуществлена в изобретении [298]. Была поставлена задача создания способа разрушения твердых тел, в котором за счет новых технологических операций исключаются теплообменные процессы между раствором НРС и окружающей его средой, обеспечиваются управление скоростью реакции гидратации, доставка и надежное закрепление твердеющего расширяющегося состава в шпуре любой ориентации, что приводит к повышению качества разрушения.

В предлагаемом способе разрушения твердых тел [298], перед размещением НРС в шпур, между стенками шпура и раствором НРС создают термоизоляционный слой. НРС устанавливают в шпур в отдельных герметичных гибких тонкостенных ампулах. Воздействие на скорость течения реакции гидратации производят путем добавления в отдельные ампулы химических веществ, регулирующих скорость протекания реакции гидратации. После размещения НРС в шпуре производится его фиксация. Целесообразно термоизоляционный слой выполнять из тонкой оболочки из фольгированного термоизоляционного материала, например пенофола, а фиксацию ампул с НРС в шпуре производить быстротвердеющими водостойкими растворами. Создание термоизоляционного слоя между стенками шпура и раствором НРС позволяет снизить теплообмен НРС с разрушаемым объектом, что повышает эффективность работы НРС в условиях низких температур, высоких температур и под водой. Размещение НРС в шпуре в отдельных герметичных гибких тонкостенных ампулах позволяет предотвратить вытекание раствора из вертикального, восходящего или горизонтального шпура, препятствует нарушению требуемого соотношения порошка НРС и воды.

Воздействие на скорость реакции гидратации путем добавления в отдельные ампулы химических веществ, регулирующих скорость реакции гидратации, позволяет сократить время на разрушение объектов, при этом химический способ повышения скорости гидратации НРС может применяться в условиях повышенного водопритока и под водой. Фиксация ампул с НРС в шпуре позволяет надежно закрепить компоненты приготавливаемой смеси и предотвратить выброс твердого НРС из шпуров, чем обеспечивается повышение безопасности работ и исключается наличие дефектных шпуров.

Параметрами способа являются расстояние между шпурами, определяемое по зависимости 4.12, вид и глубина герметизации шпуров, исследования которых приведены ниже.

Для повышения эффективности работы НРС с помощью электричества были разработаны и запатентованы два способа разрушения горных пород.

В изобретении [300] решается задача разработки способа разрушения горных пород, в котором за счет новых технологических операций обеспечивается управление скоростью реакции гидратации и роста структурных новообразований в НРС, что позволяет управлять очередностью разрушения пород, приводит к сокращению времени разрушения и повышает эффективность использования предложенного способа в условиях подземных горных выработок.

Предлагаемый способ разрушения горных пород включает бурение шпуров, размещение в них НРС и принудительное влияние на скорость течения реакции гидратации путем пропускания через раствор НРС электрического тока с напряжением 10-120 В. Инициирование шпуров с НРС проводят в соответствии с необходимым порядком разрушения пород. Принудительное влияние на скорость гидратации НРС путем пропускания через раствор электрического тока позволяет управлять скоростью гидратации с сохранением температурного поля материала в необходимом диапазоне, который обеспечивает повышение давления на стенки шпура за счет роста структурных новообразований в НРС, при этом предотвращая образование газообразной фазы раствора. Изменение электрического напряжения в диапазоне 10-120 В позволяет регулировать скорость протекания гидратации

НРС, что дает возможность проводить инициирование шпуров с НРС в соответствии с необходимым порядком разрушения пород.

В основу изобретения [301] поставлена задача разработки способа разрушения горных пород, в котором за счет новых технологических операций обеспечивается разрушающее парогазовое давление на стенки шпура при незначительном повышении температуры и без выделения вредных газов в атмосферу, что приводит к повышению безопасности и эффективности использования предложенного способа в условиях подземных горных выработок.

Разработанный способ разрушения горных пород включает размещение в шпурах зарядов НРС и их герметизацию быстротвердеющими смесями, возбуждение реакции, сопровождающейся выделением газов, путем пропускания через раствор НРС электрического тока с напряжением 130-200 В.

Использование в качестве зарядов патронов с НРС позволяет за счет выкипания химически несвязанной воды из раствора, при повышении его температуры выше 100°C после инициирования заряда, создать высокое парогазовое давление на стенки шпура и обеспечить разрушение объекта без выделения в атмосферу вредных газов и значительного повышения температуры. Это позволяет эффективно и безопасно использовать предложенный способ в условиях подземных горных выработок. Герметизация шпуров с помощью быстротвердеющей смеси позволяет исключить выход газа через устьевую часть шпура и, соответственно, предотвратить снижение парогазового давления внутри зарядной камеры шпура, что обеспечивает высокую эффективность способа. Возбуждение реакции после твердения герметизирующей смеси путем пропускания через раствор НРС электрического тока с напряжением 130-200 В позволяет за счет беспламенного инициирования применить способ в условиях высокой газообильности и запыленности подземных горных выработок, проводить инициирование шпуров с НРС в соответствии с необходимым порядком разрушения пород и, соответственно, управлять очередностью их разрушения.

Параметрами описанных способов являются: расстояние между шпурами, определяемое по зависимости 4.12; величина напряжения и расстояние между

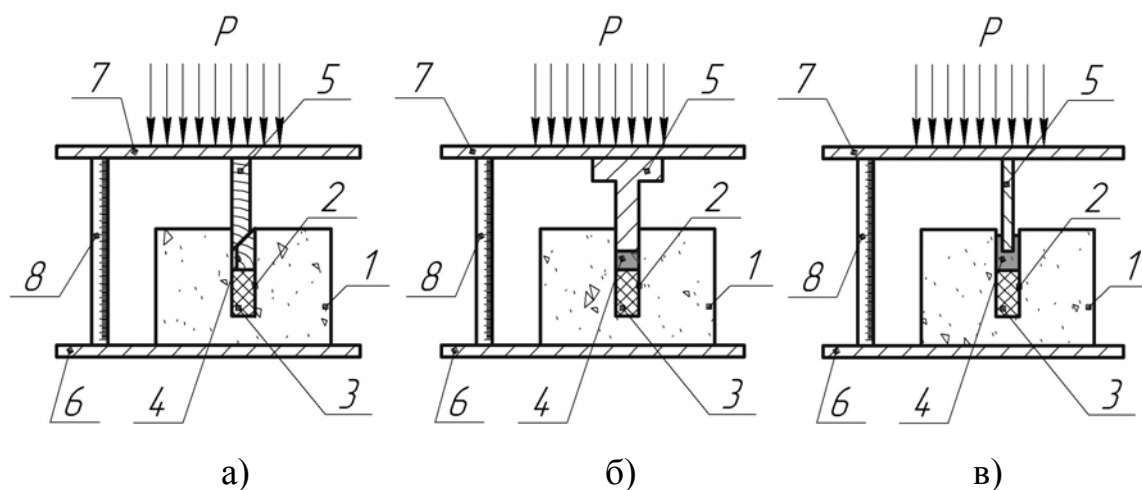
электродами, определяемые на основании результатов исследований, приведенных в разделе 3.4.4; вид и глубина герметизации шпуров, исследования которых приведены ниже.

При реализации разработанных способов разрушения горных пород на практике возникает вопрос о рациональном способе герметизации шпуровых зарядов НРС. Были проведены исследования эффективности применения различных способов герметизации шпуровых зарядов НРС. При этом к способам выдвигалось три требования: минимальная скорость вступления в работу (желательно меньше времени начала активной стадии гидратации НРС), надежность герметизации устьевого части шпура или скважины (газонепроницаемость), сопротивление суммарному давлению расширения НРС в твердой и газообразной фазах. Таким образом, классический способ герметизации шпуров с ВВ глиняными пыжами или пластичной забойкой не удовлетворяет выдвинутым требованиям, так как забойку выдавливает продуктами расширения НРС.

Были исследованы следующие способы герметизации:

- 1) деревянные клинья (обычный клин и самозапирающийся составной клин), под которые устанавливали слой глины;
- 2) заливка быстротвердеющей смеси «Би-крепь»;
- 3) использование смолы полимерных ампул для химического анкерования АРПБ-М – быстрые (ампулы содержат смесь полиэфирной смолы, минерального наполнителя и отвердителя).

Исследования проводили на бетонных блоках размерами 0,20x0,20x0,20 м, в которых были пробурены шпуры глубиной 15 см. В донную часть шпуров помещали диски из пенополиэтилена. В устьевую часть шпура помещали герметизирующий элемент. Пенополиэтилен, помещенный в донную часть шпура, имел низкое сопротивление сжатию (на 2 порядка меньше усилия закрепления) и играл роль ограничителя для герметизирующего элемента. В ходе эксперимента на герметизирующий элемент через прижимное устройство прикладывали нагрузку с помощью механического пресса ЗИМ 5Р, между плитами которого был помещен блок. Деформации фиксировали с помощью линейки (рис. 4.14).



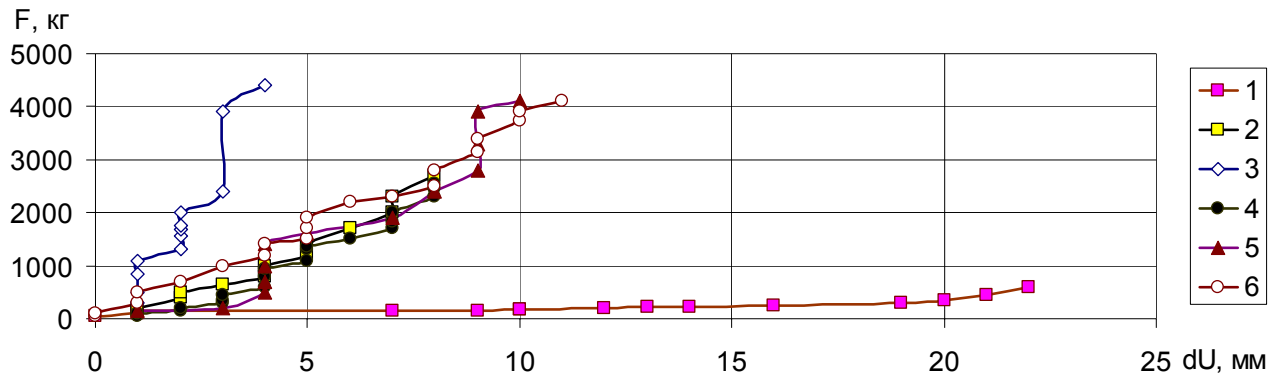
1 – блок; 2 – шпур; 3 – диски из пенополиэтилена; 4 – герметизирующий элемент (а – клин, б – «Би-крепь», в – полимерная ампула); 5 – прижимное устройство; 6 – нижняя плита пресса; 7 – верхняя (подвижная) плита пресса; 8 – линейка

Рисунок 4.14 – Принципиальная схема экспериментов

При нагружении усилие пресса передавалось на герметизирующий элемент, который за счет сил трения и адгезии оказывал сопротивление перемещению. При этом фиксировалось усилие на прижимное устройство и перемещение плит. При превышении усилием сжатия сил сопротивления происходило перемещение герметизирующего элемента внутри шпура, что характеризовалось падением усилия на прижимное устройство и скачком перемещения плит. Сравнение результатов моделирования проводилось по графикам зависимости смещений герметизирующего элемента от усилия вдавливания. При этом смещения герметизирующего элемента определялись суммой сил адгезии, трения между шпуром и герметизирующим элементом и сжатия материала-герметизатора.

Графики, отражающие нагрузочно-деформационные характеристики различных герметизирующих элементов, приведены на рис. 4.15.

Из графиков видно, что наилучшим вариантом является деревянный клин. Он обеспечивает сопротивление вдавливанию исключительно за счет трения со стенками шпура. Наблюдается рост смещений при усилении 250-300 кг, которые растут после уплотнения пенополиэтилена.

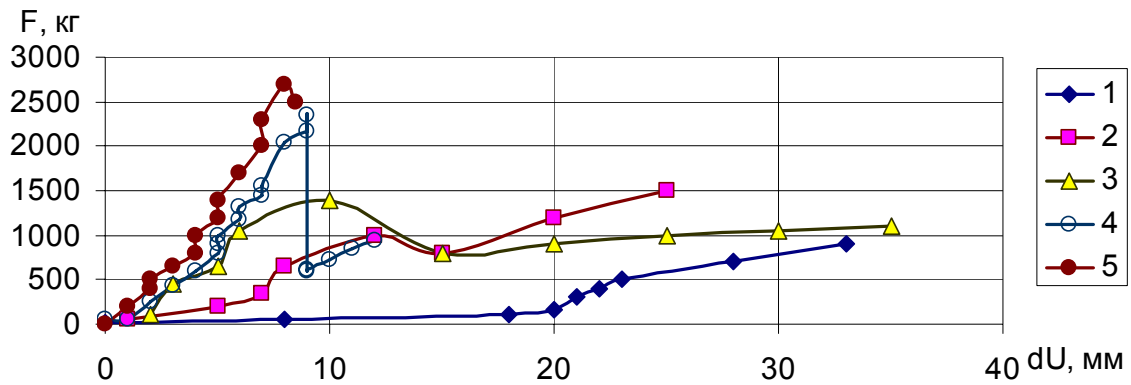


1 – деревянный клин (диаметр шпура 45 мм); 2 – «Би-крепись» (диаметр шпура 45 мм, время твердения 24 часа); 3 – полимерная смола (диаметр шпура 45 мм, время твердения 24 часа); 4 – «Би-крепись» (диаметр шпура 34 мм, время твердения 90 мин); 5 – «Би-крепись» (диаметр шпура 45 мм, время твердения 90 мин); 6 – полимерная смола (диаметр шпура 45 мм, время твердения 90 мин)

Рисунок 4.15 – Зависимость «сопротивление вдавливанию – деформация» для разных герметизирующих элементов

Наилучшим вариантом герметизации является полимерная смола со временем твердения 24 часа. Усилие сопротивления вдавливанию при толщине инкапсуляции 4 см составляет 4440 кг. Однако это время твердения слишком велико для поставленной задачи, поэтому полученный результат не имеет практической ценности. Остальные варианты герметизации являются практически равноценными, их деформационные кривые находятся рядом. Таким образом, при времени твердения 90 мин герметизация «Би-креписью» при диаметрах шпура 34 и 45 мм и полимерной смолой дает одинаковый результат.

Зная, что усилие на забойку, развиваемое за счет расширения НРС при диаметре шпура 40 мм, составляет 2200-2400 кг, можно сделать вывод, что с помощью деревянных клиньев невозможно обеспечить надежную герметизацию. Учитывая разницу в цене ампулы с полимером (3,5 у.е./шт) и «Би-креписью» (0,15 у.е./кг), и то, что они имеют одинаковую характеристику, для нашей задачи более предпочтительно использование «Би-креписи». Влияние времени твердения «Би-креписи» при глубине инкапсуляции 4 см на ее нагрузочно-деформационную характеристику можно оценить по графикам, приведенным на рис. 4.16.



1, 2, 3, 4, 5 – время твердения 10 мин, 30 мин, 50 мин, 90 мин, 24 часа соответственно

Рисунок 4.16 – Графики зависимости «сопротивление вдавливанию – деформация» герметизирующего элемента из «Би-крепи»

Из рис. 4.16 видно, что повышение времени твердения «Би-крепи» приводит к росту сопротивления вдавливанию. При этом величины сопротивления через 90 мин после приготовления «Би-крепи» и через 24 часа соразмеримы и составляют 2350 и 2700 кг соответственно. По графикам видно, что угол наклона кривых деформирования со временем твердения 50 и более минут примерно одинаков, то есть можно говорить о значительном вкладе сил адгезии со стенками шпура в сопротивление перемещению.

То есть, время, достаточное для твердения, не менее 50-60 минут. При этом достигается необходимая жесткость герметизации и около 55% максимального сопротивления вдавливанию. При времени твердения 90 минут достигается 87% максимального усилия вдавливания. Таким образом, временной диапазон, необходимый для обеспечения надежной инкапсуляции, составляет 60-90 мин. Уменьшение времени твердения менее 60 минут не позволяет обеспечить требуемого сопротивления, силы адгезии недостаточные для надежного закрепления. Повышение времени более 90 минут не целесообразно, поскольку прирост максимального сопротивления вдавливанию незначительный, а его абсолютной величины достаточно для герметизации. Результаты исследований влияния глубины инкапсуляции на нагрузочно-деформационные характеристики герметизирующих элементов приведены на рис. 4.17.

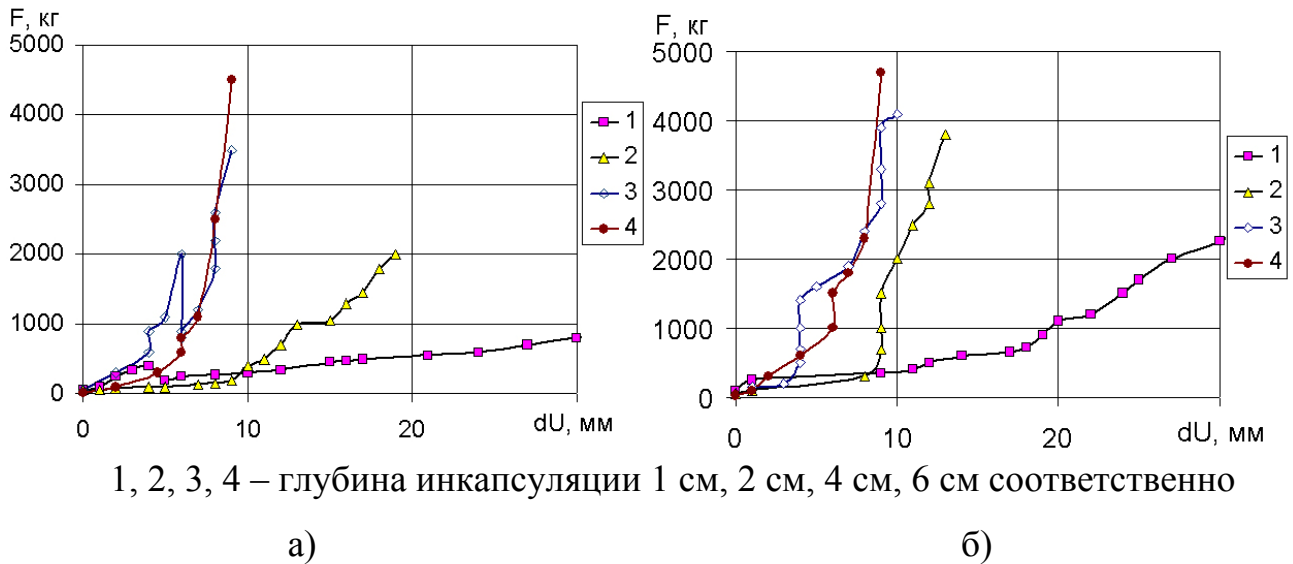


Рисунок 4.17 – Графики зависимости «сопротивление вдавливанию – деформации» герметизирующего элемента из «Би-крепи» при времени твердения 60 (а) и 90 (б) мин

Из графиков следует, что повышение глубины инкапсуляции от 10 до 40 мм приводит к росту жесткости герметизирующего элемента, в то время как дальнейшее увеличение глубины не приводит к значительному повышению жесткости, характеризующейся тангенсом угла наклона кривой деформирования, но приводит к росту максимального сопротивления вдавливанию. При этом отмечается снижение влияния глубины инкапсуляции при повышении времени твердения.

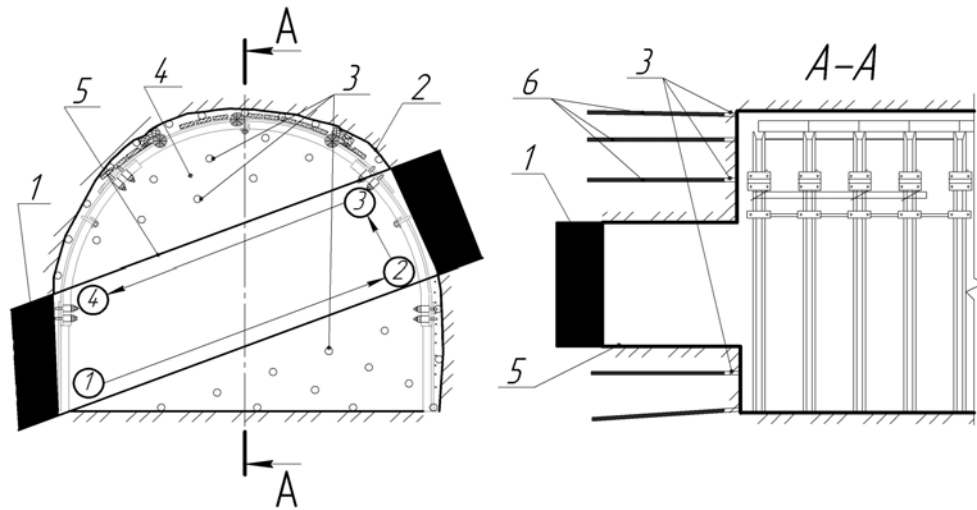
Полученные результаты позволяют сделать вывод, что необходимая глубина инкапсуляции при времени твердения 60 мин должна составлять 40 мм, то есть быть соразмеримой с диаметром шпура. Уменьшение этой величины приводит к существенному снижению сопротивления вдавливанию, а повышение не обеспечивает существенного роста и не является необходимым. При времени твердения 90 мин минимальная глубина инкапсуляции равна радиусу шпура. С учетом запаса можно сделать вывод, что глубина инкапсуляции при герметизации «Би-крепью» должна быть не менее диаметра шпура.

4.5 Разработка способов проведения горных выработок и восстановления их эксплуатационного сечения

Разрушение горных пород при проведении горных выработок производят механическим или буровзрывным способами. Взрывное разрушение является менее предпочтительным, поскольку более дорогое, трудоемкое и вызывает развитие природной трещиноватости и разупрочнение приконтурных пород, что приводит к снижению их прочности и несущей способности, вызывает усиление конвергенции и преждевременное деформирование крепи. При механическом способе, в зависимости от прочности пород и их трещиноватости, разрушение массива производят исполнительным органом проходческого комбайна или с помощью отбойных молотков. Однако применение механического способа ограничивается крепостью пород до 6 единиц по шкале проф. Протоdjяконова. Степень нарушения вмещающих пород является одним из основных факторов, определяющих устойчивость выработки, это определяет важность сохранения монолитности и естественной прочности приконтурных пород при проведении выработок.

Поэтому в основу изобретения [313] поставлена задача усовершенствования способа проведения горных выработок, в котором за счет квазистатического воздействия на горные породы достигается их разрушение с сохранением естественной прочности и несущей способности пород приконтурной зоны, что позволяет минимизировать расслоения пород и обеспечить устойчивость сооружаемой горной выработки с сохранением темпов ее проведения.

Предлагаемый способ проведения выработок включает выемку полезного ископаемого, последующую отбойку вмещающих пород и погрузку разрушенных пород на средство транспорта. Отбойка пород производится путем бурения шпуров рядами, расположенными параллельно плоскости обнажения, образованной в результате выемки полезного ископаемого, и размещения в них НРС. Длину шпуров целесообразно принимать в диапазоне 0,5-3 м. Сущность способа поясняется рисунком 4.18.



1 – полезное ископаемое; 2 – проводимая выработка; 3 – шпуров; 4 – вмещающие породы; 5 – плоскость обнажения, образованная в результате выемки полезного ископаемого; 6 – НРС

а)

б)

Рисунок 4.18 – Способ проведения горных выработок [313]:

а) схема обработки забоя в поперечном сечении, б) продольный разрез призабойной части выработки

Отбойка вмещающих пород с помощью НРС позволяет за счет квазистатического давления, развиваемого при расширении НРС, обеспечить разрушение пород в забое выработки, минимизируя расслоения приконтурной зоны и обеспечивая устойчивость сооружаемой горной выработки за счет сохранения естественной прочности и несущей способности вмещающих пород. Бурение шпуров рядами, расположенными параллельно плоскости обнажения, образованной в результате выемки полезного ископаемого, обеспечивает равномерное разрушение пород в сечении выработки.

При определении расстояний между рядами шпуров, расстояний между шпурами в ряду и шпурами контура выработки в формулу 4.11 в качестве множителя вводится коэффициент разупрочнения, вызванного разгрузкой массива в результате предварительной выемки полезного ископаемого пород.

Этот коэффициент учитывает время, прошедшее между выемкой полезного ископаемого и заряданием шпура, давление НРС на стенки шпура, радиус

шпура, предел прочности породы на одноосное растяжение, коэффициент структурного ослабления. Определение коэффициента производится эмпирическим путем. Это позволяет учесть образование зоны разгрузки вокруг полости, образованной в результате выемки угля, закономерность передачи давления от стенок шпура с НРС вглубь массива, обеспечивает поэтапное разрушение пород междурядья растягивающими напряжениями и смещение их в сторону разгруженной полости. При реализации предложенного способа в изложенной последовательности обеспечивается селективная выемка угля и породы при условии разделения транспортных потоков.

Рост глубины ведения горных работ в условиях сложной экономической ситуации, приводит к увеличению доли сплошных и комбинированных систем разработки с проведением выработок вслед за лавой. Использование проходческих комбайнов для разрушения породного массива в выработках, оформляемых за лавой, нерационально, что обусловлено высокой стоимостью оборудования и, как правило, низкими темпами проведения. В то время как разрушение породы с помощью отбойных молотков связано с большой долей ручного труда и низкой безопасностью работ [314]. Способ [313] может быть также реализован при проведении выработок вслед за лавой [314, 315]. В этом случае выемка угля будет производиться в забое лавы, а проведение и оформление подготовительной выработки – в забое проведения. На практике при реализации описанного способа проведения выработок НРС в шпуры помещают в ампулах или патронах, что позволяет обеспечить размещение смеси в восходящих и горизонтальных шпурах.

В настоящее время на шахтах Украины ежегодно ремонтируется около 300 км выработок. Замена деформированных элементов крепления обычно сопровождается присечкой пород кровли, почвы и боков. При этом процесс перекрепления остается до сих пор практически не механизированным [316]. Несмотря на достигнутые результаты в технологии и технике проведения и крепления выработок, ремонт и перекрепление остаются неизменными технологическими процессами производственной деятельности угольных шахт. Как правило, работы по

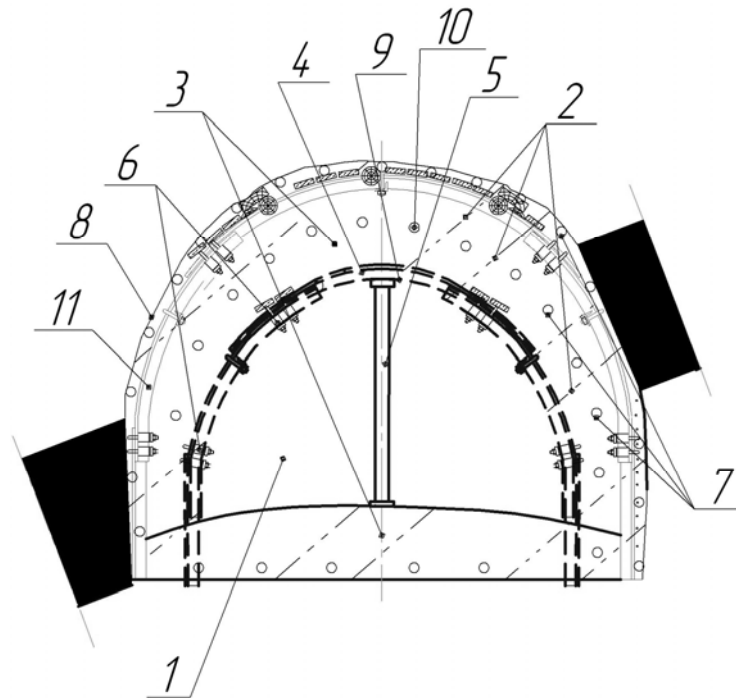
разрушению боковых пород при ремонте выработок проводят либо с помощью БВР, либо механическим способом, в основном отбойными молотками [317].

Ведение БВР в выработках с исходящей струей воздуха на шахтах опасных по газу, с действующими машинами, механизмами, трубопроводами, и при отработке пластов склонных к ГДЯ ограничивается или требует особого режима безопасности. Поэтому в основу изобретения [318] поставлена задача усовершенствования способа ремонта горных выработок, в котором за счет направленного квазистатического воздействия на породы, смещенные в полость выработки, достигается их разрушение и плавное опускание, при отсутствии разупрочнения приконтурных пород. В разработанном способе предлагается осуществлять присечку пород деформированных в полость выработки с помощью НРС. Такой подход может быть реализован как в условиях прочных, так и в условиях слабых пород. Присечка может осуществляться как по всему сечению, так и в определенной части выработки.

Предлагаемый способ ремонта горных выработок [318] ведется в такой последовательности: определяют ориентацию системы кливажных трещин в смещенных в полость выработки породах; производят усиление крепи на участке ведения ремонтных работ; ослабляют замки на рамах деформированной металлической арочной крепи; ведут отбойку пород, смещенных в полость выработки путем бурения шпуров и размещения в них НРС. Шпуры бурят по линиям эквидистантным проектному контуру выработки. После обрушения пород до проектного контура производят извлечение деформированной металлической арочной рамы крепи и возведение рамы новой крепи по проектному контуру. Предлагаемый способ ремонта представлен на рис. 4.19.

Отбойка вмещающих пород путем бурения шпуров и размещения в них НРС позволяет за счет роста квазистатического давления расширения НРС обеспечить разрушение пород по требуемому проектному контуру, исключив вывалообразование в кровле и боках выработки, минимизируя расслоения приконтурных пород и сохраняя устойчивость горной выработки после ремонта. Это позволяет

сократить трудовые и материальные затраты на обеспечение эксплуатационного состояния выработки.



1 – горная выработка; 2 – кливажные трещины; 3 – деформированные породы; 4 – деформированные рамы крепи; 5 – крепь усиления; 6 – замок деформированной рамы крепи; 7 – шпур; 8 – проектный контур выработки; 9 – контур смещенных в полость выработки пород; 10 – НРС; 11 – рама новой крепи

Рисунок 4.19 – Способ ремонта горных выработок [318]

Разрушенные породы плавно опускаются на рамы деформированной крепи с ослабленными хомутами, что предотвращает образование вывала. Бурение шпуров по линиям эквидистантным проектному контуру выработки, обеспечивает поочередное обрушение пород от деформированного контура выработки до проектного, при этом учитываются естественные линии скольжения в приконтурных породах, закономерность передачи давления от расширения НРС в шпуре вглубь массива, расстояние до открытой поверхности, что позволяет обеспечить разрушение породы от растягивающих напряжений.

Расстояние между шпурами в рядах и расстояние от контура шпура до ближайшей кливажной трещины при реализации способа следует определять по формулам 4.11, 4.15 соответственно.

Одним из наиболее распространенных проявлений горного давления в горных выработках угольных шахт является пучение. Около 70% выработок, требующих ремонта, подвержено этому явлению. Пучение пород почвы наблюдается на всех этапах существования выработки и происходит с различной интенсивностью. В зависимости от прочности пород подрывка может осуществляться с помощью почвоподдирочных машин или комбайнов, буровзрывных работ или вручную с помощью отбойных молотков. Основные недостатки буровзрывного разрушения пород при ремонте выработок изложены выше. Применение почвоподдирочных машин связано со значительными материальными затратами, требует наличия свободного не загроможденного сечения, отсутствия рельсового пути. Эти требования в большинстве ремонтируемых горных выработок отечественных шахт не выполняются. В силу этих и других причин почвоподдирочные машины применяются крайне редко. Проведение подрывки с помощью отбойных молотков не позволяет обеспечить высоких темпов ремонта, связано с высокой долей ручного труда и низкой производительностью.

Поэтому в основу изобретения [319] поставлена задача усовершенствования способа борьбы с пучением почвы горных выработок, в котором за счет направленного локального квазистатического воздействия на породы почвы достигается их разрушение с минимальными энергозатратами и с сохранением сплошности законтурной части выработки. Это позволяет восстановить эксплуатационное состояние выработок, в том числе служащих для выдачи исходящей струи воздуха, а также проведенных по пластам склонным к ГДЯ.

Предлагаемый способ борьбы с пучением включает бурение шпуров в почву горной выработки, зарядание их НРС, уборку породы на средства транспорта. При этом предварительно определяют ориентацию трещин в смещенных в полость выработки породах почвы, шпуры бурят под углом 100-85 градусов к плоскости почвы с формированием уступа разрушения и с учетом формы и размеров, образованных трещинами блоков. Расстояние между шпурами в границах одного блока определяют по зависимости 4.11, а расстояние между центром шпура и ближайшей границей блока составляет половину расстояния между шпурами.

После бурения шпуров в них заряжают НРС с добавлением компонентов, которые изменяют скорость реакции гидратации в таком количестве, чтобы обеспечить поочередное разрушение пород почвы в направлении от откоса уступа разрушения почвы вглубь массива по линиям шпуров эквидистантным верхней бровке уступа с паузой 10-20 минут. Устьевую часть шпуров герметизируют. После разрушения осуществляют поочередную уборку породы на средства транспорта. НРС целесообразно помещать в шпур в ампулах, а компоненты, которые изменяют скорость течения реакции гидратации добавлять у ампулы с НРС путем инъекции. Герметизацию устьевой части шпуров следует проводить с помощью быстротвердеющих смесей, например «Би-крепь».

Предварительное определение ориентации трещин в смещенных в полость выработки породах почвы способствует получению информации о степени нарушения пород, форме и размерах блоков пород, образованных трещинами. Это позволяет спроектировать параметры буровых работ таким образом, чтобы оптимально использовать энергию, направленную на разрушение пород и минимизировать энергозатраты на разрушение при восстановлении эксплуатационного состояния выработки.

Во время разрушения НРС не создается динамическое влияние на породы и не происходит значительное повышение температуры, что позволяет безопасно восстанавливать эксплуатационное состояние выработок с исходящей струей воздуха, а также проведенных по пластам склонным к ГДЯ.

Помещение НРС в шпур в ампулах позволяет исключить проникновение раствора по трещинам вглубь массива, а также попадание влаги в разрушающее вещество в условиях водонасыщенных пород. Добавление при этом компонентов, изменяющих скорость реакции гидратации путем инъекции, позволяет сократить время приготовления и заряжания НРС в шпур с необходимыми параметрами времени разрушения, что повышает эффективность способа.

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать способы проведения горных выработок и восстановления их эксплуатационного сечения и обосновать их параметры.

Выводы по разделу 4

1. Комплексные исследования, включающие аналитические методы, лабораторное моделирование и натурные наблюдения позволили установить, что процесс разрушения пород вокруг шпура с НРС проходит в два этапа. Первый этап характеризуется первоначальным стремительным прорастанием радиальных трещин в результате высвобождения упругой потенциальной энергии, накопленной в процессе роста структурных новообразований в НРС и ее перехода в поверхностную. Второй этап – остановкой их роста и дальнейшим раскрытием берегов трещин, которое имеет затухающий ступенчатый характер, по мере расширения НРС в шпуре.

2. Разработана модель разрушения горных пород НРС с учетом существующего поля напряжений в массиве на основании локального силового критерия Гриффитса – Ирвина. Предложен метод расчета параметров разрушения с помощью НРС при работе заряда на отрыв (откол) на одну свободную поверхность. Полученные зависимости используются при расчете расстояния между шпурами с НРС в разработанных способах разрушения горных пород.

3. Разработан способ направленного разрушения горных пород с помощью НРС, основанный на создании на стенках шпура в требуемом направлении концентраторов растягивающих напряжений. Предложены конструкции патронов НРС для реализации способа [311, 312] и метод расчета его параметров. На основании численного математического моделирования МКЭ установлено, что при диапазоне зазора между оболочками патрона НРС 4-27% от диаметра шпура, коэффициент концентрации растягивающих напряжений на стенках шпура составляет 1,9 – 4, при этом он удовлетворительно описывается степенной зависимо-

$$\text{стью } k_{\sigma_1} = 1,078 \left(\frac{a}{d} \right)^{-0,424} .$$

4. Разработаны способы невзрывного разрушения горных пород, основанные на: управлении кинетикой расширения НРС с помощью предварительного сжатия в зарядной камере [295]; регулировании теплообменных процессов между

зарядом НРС и разрушаемым объектом [298]; воздействию на НРС электрическим полем [300, 301].

5. Определена область рационального применения предложенных способов герметизации шпуровых зарядов НРС. Так герметизация быстротвердеющим раствором «Би-крепи» целесообразна в условиях, когда ожидаемое время разрушения более 60 мин, при этом глубина инкапсуляции герметизирующей смеси должна быть не менее диаметра шпура. При меньшем времени разрушения целесообразно в качестве средства герметизации использовать смолу полимерных ампул для химического анкерования.

6. Разработан способ проведения горных выработок [313], в котором за счет квазистатического воздействия на горные породы достигается их разрушение с сохранением естественной прочности и несущей способности пород приконтурной зоны. Обоснована методика определения параметров способа.

7. Разработан способ ремонта горных выработок [318], в котором за счет направленного квазистатического воздействия на породы, смещенные в полость выработки, достигается их разрушение и плавное опускание с учетом плоскостей ослабления по кливажным трещинам, при отсутствии разупрочнения приконтурных пород. Обоснована методика определения параметров способа.

8. Разработан способ борьбы с пучением почвы горных выработок [319], в котором за счет направленного локального квазистатического воздействия на породы почвы, достигается их разрушение с минимальными энергозатратами и с сохранением сплошности законтурной части выработки. Обоснована методика определения параметров способа.

РАЗДЕЛ 5

УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НЕВЗРЫВЧАТЫМИ РАСШИРЯЮЩИМИСЯ СРЕДСТВАМИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

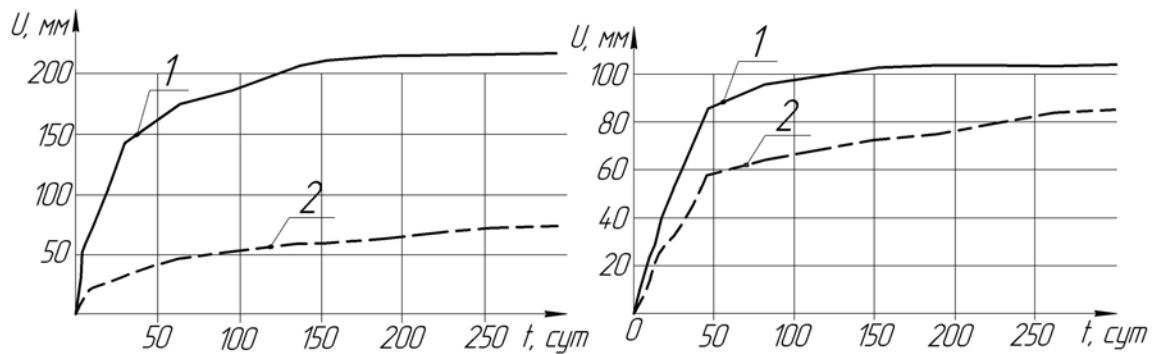
5.1 Обеспечение устойчивости горных выработок на стадии их проведения

На основании анализа и обобщения существующих исследований в разделе 1 выделено пять основных этапов поддержания горной выработки и определены доминирующие факторы, определяющие ее устойчивость на каждом этапе. Рассмотрим поэтапно поддержание выработки и определим возможность управления выявленными факторами с помощью НРС.

Известно, что проведение выработок приводит к перераспределению напряжений в массиве горных пород и повышению их трещиноватости, что сопровождается снижением их несущей способности и увеличением объема. Это вызывает рост давления на крепь подготовительных выработок.

Основные результаты многочисленных наблюдений за деформированием контура выработок следующие. Максимальные смещения пород по контуру выработки на пологом падении происходят в направлении перпендикулярном напластованию пород. Преобладающая доля смещений в полость выработки вызвана увеличением объема пород при их разрушении. При отсутствии повторного нарушения равновесного состояния 50-60% конвергенции контура выработки происходит в первый месяц после проведения выработки, в дальнейшем скорость деформирования снижается.

Типичный характер деформирования выработки можно отследить по динамике смещений контурных реперов в 5 южном конвейерном штреке уклона пл. m_5^{16} гор. 450 м ОП «Шахта Добропольская» ГП «Добропольеуголь» (рис. 5.1 а). Глубина заложения выработки 730 м. Система разработки – столбовая. Штрек проводился комбайном КПД с подрывкой пород почвы пласта. Мощность пласта 0,85-0,95 м, угол падения пласта – 10 градусов. Средневзвешенная прочность пород кровли в пределах этого участка – 19,2 МПа, боков – 12,6 МПа, по контуру – 24,1 МПа.



1, 2 – смещения пород кровли и боков выработки соответственно

а)

б)

Рисунок 5.1 – Графики смещений пород во времени вне зоны влияния очистных работ: а) ПК 9,5; б) ПК 47

Замерный участок на ПК 9,5 состоял из трех станций с расстоянием между ними 4 м. Выработка на этом участке была закреплена металлической арочной податливой крепью КМП 13,3 с шагом 0,8 м. С 13 по 50 пикет выработка крепи-лась анкерно-рамной крепью. Анкеры устанавливались при проведении штрека под металлический подхват из профиля СВП-22 длиной 3,4 м с шагом 1 м. На ПК 47 была оборудована одна замерная станция. Из графиков видно, что около 58-60% смещений контура выработки происходит в течение первого месяца, а 80-82% в течение двух месяцев после проведения выработки (рис. 5.1 а), что согла-суется с известными исследованиями.

Как было отмечено выше, основной резерв повышения устойчивости вы-работок на этапе проведения заключается в сохранении естественной сплошности пород. В настоящее время известно несколько подходов, направленных на пре-дотвращение начальных расслоений массива. Например, анкерное крепление по-зволяет создать укрепленную оболочку вокруг горной выработки за счет сшива-ния слоев в единую конструкцию. При этом динамика и абсолютные величины смещений контура выработки меняются (рис. 5.1 б). Анализ графиков показывает, что величина смещений пород кровли выработки на участке с анкерной крепью почти в 2 раза меньше, чем на участке с рамной податливой крепью. Это объясня-

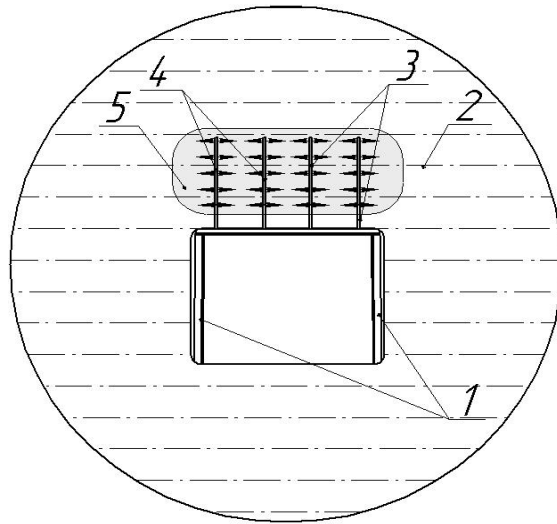
ется образованием в кровле на участке выработки с анкерной крепью, в ближайшее время после проведения, несущей породно-анкерной конструкции, которая оказывает сопротивление развитию зоны разрушения с контура выработки. Однако, анкерная крепь, устанавливаемая без начального распора, вступает в работу после некоторых расслоений пород внутри укрепляемой области, при этом даже после формирования несущей конструкции развитие зоны разрушения может начинаться за контуром заанкерованных пород [320]. Другие способы предотвращения начального расслоения пород имеют меньшую эффективность. Так установка рам крепи с предварительным распором позволяет значительно минимизировать начальные расслоения, но не обеспечивает контакта рамы с породой по всему контуру. В результате этого рама крепи точно передает сжимающие усилия на массив и точно воспринимает нагрузку, что снижает эффективность применения способа. Кроме того, не обеспечивается сопротивление процессу расслоения пород между рамами крепи. Указанную проблему решают способы крепления с заполнением закрепного пространства путем нагнетания упрочняющих составов [321] или технологии Буллфлекс [322]. Применение этих способов сдерживается из-за их многооперационности, необходимости применения специального оборудования, сложности реализации технологии и ее высокой стоимости. Применение способов, основанных на упрочнении горных пород нагнетанием вяжущих составов [323], не позволяет управлять НДС породного массива и может применяться в уже дезинтегрированном приконтурном массиве горных пород, при развитой системе трещин. Не обеспечивается сдерживание образования и развития вокруг выработки ЗНД и ЗРП.

Известно, что породы, вмещающие выработки, находятся в условиях неравнокомпонентного объемного поля сжимающих напряжений. Причем соотношение компонент напряжений различно для разных точек массива и изменяется во времени. Это значительно усложняет возможность их учета при анализе напряженно деформированного состояния пород и ведет к изменению структуры [324]. В настоящее время экспериментальными работами однозначно доказано, что при увеличении промежуточного напряжения пород происходит рост их

прочности [112, 325]. Согласно исследованиям [112], при промежуточном напряжении равном $5 \cdot 10^6 - 10^7$ Па прочность их повышается в 1,5-2 раза. Исследования, представленные в работе [118] показали, что увеличение бокового давления оказывает также существенное влияние на несущую способность разрушенных горных пород. При испытаниях пород типа аргиллит было установлено, что увеличение бокового давления на 4% прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}^0$ приводит к сохранению несущей способности материала на уровне 33% $\sigma_{сж}^0$, а боковое давление 11% $\sigma_{сж}^0$ обеспечивает несущую способность равную 81% $\sigma_{сж}^0$ [118]. Указанные выше соображения позволили разработать концепцию управления НДС массива горных пород, основанную на искусственном изменении компонент напряжений в окрестности проводимой горной выработки, и приближении поля напряжений приконтурных пород к исходному природному полю напряжений, что позволит повысить устойчивость выработки [326].

Техническая реализация предложенной идеи осуществляется в разработанном способе крепления горных выработок [327] следующим образом (рис. 5.2). На этапе проведения выработки, после установки рам основного крепления, в приконтурные породы бурят шпур, в которые помещают НРС. Расширение НРС приводит к повышению давления на стенки шпура, что вызывает искусственное изменение поля напряжений, в частности добавление горизонтальной промежуточной компоненты σ_3 в пределах зоны влияния НРС. Это приближает напряженное состояние пород к исходному природному полю напряжений, повышает их несущую способность и приводит к сдерживанию образования и развития вокруг выработки ЗРП. При этом НРС целесообразно помещать в шпур не по всей длине шпура, а только в его донную часть, с оставлением приконтурной части шпура незаполненной на величину не менее зоны условно-мгновенного разрушения пород. Таким образом, рамы основной крепи воспринимают нагрузку от разуплотнения пород в несжатой зоне и создают отпор смещениям пород в полость выработки.

Оценка эффективности изложенного способа управления НДС массива пород проводилась путем математического моделирования МКЭ [326].



1 – рама основного крепления; 2 – приконтурные породы; 3 – шпурсы; 4 – НРС; 5 – зона сжатия НРС

Рисунок 5.2 – Способ обеспечения устойчивости горной выработки, основанный на искусственном изменении компонент напряжений в ее окрестности

Задача решалась в объемной постановке в масштабе 1:1. Решение проводилось пошагово, с учетом сложившегося напряженного состояния на предыдущем шаге нагружения. Моделировалась выработка прямоугольного (модель №1) и арочного (модель №2) сечения, проводимая в изотропном упруго пластическом массиве, расположенная на глубине 500 м. Массив представлен алевролитом с пределом прочности на одноосное сжатие 40 МПа. Для размещения НРС в кровлю выработки бурились шпурсы диаметром 0,043 м и глубиной 2,5 м. На рис. 5.3-5.4 приведены результаты моделирования в виде картин распределения напряжений.

Анализ приведенных картин распределения напряжений показывает, что при традиционном способе крепления выработки прямоугольного сечения (рис. 5.3) в ее углах образуются участки концентрации напряжений, в боках выработки – зона сжатия, а в кровле – зона пониженных напряжений, максимум которых находится посередине пролета выработки. Таким образом, в кровле выработки происходит прогиб слоев, возможно, их расслоение и разрушение от растягивающих напряжений. При развитии этого процесса вглубь массива, произойдет развитие вокруг выработки ЗРП.

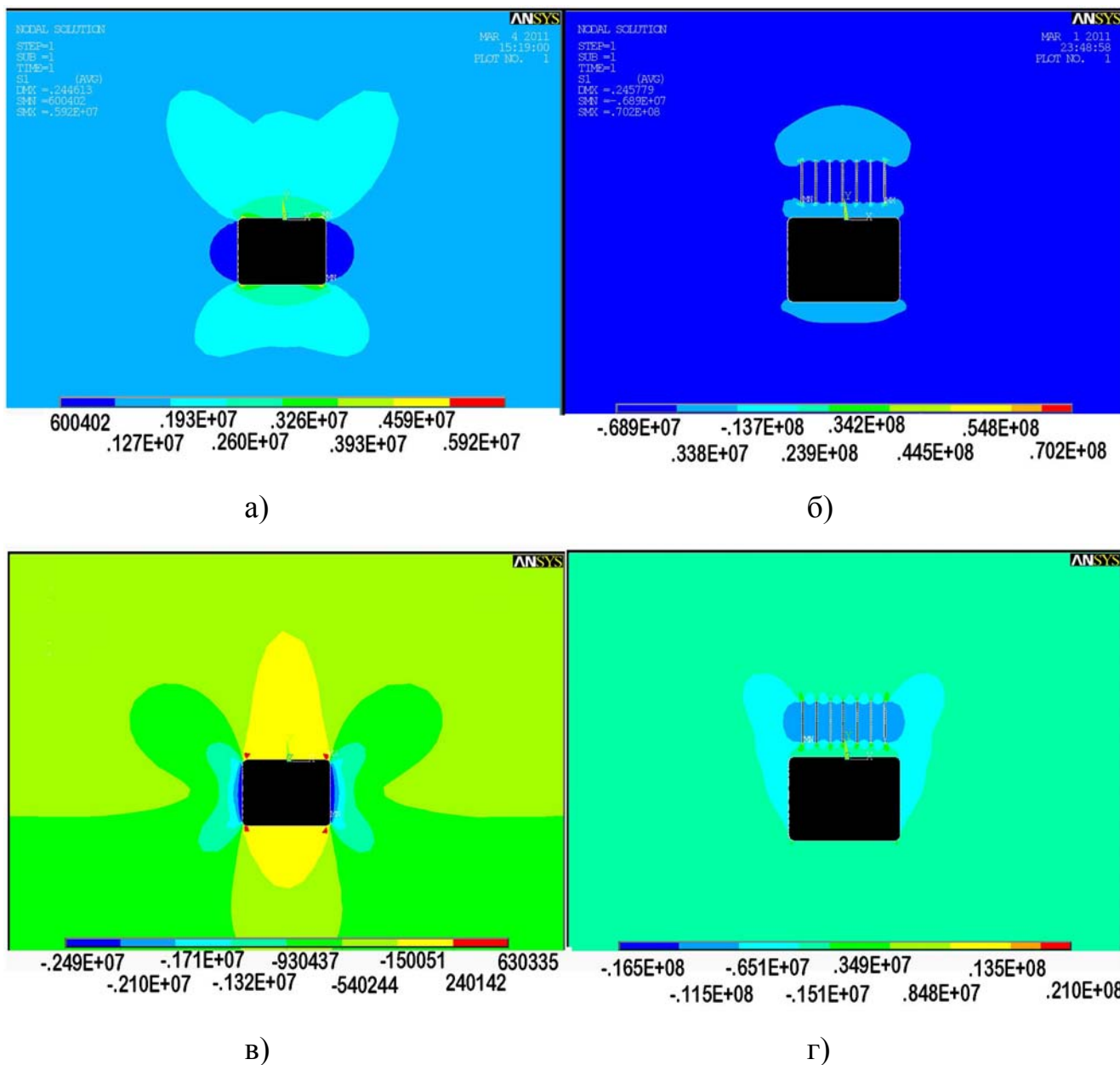


Рисунок 5.3 – Распределение главных напряжений вокруг выработки прямоугольного сечения:

а – S_1 (σ_1) для традиционного крепления; б – S_1 (σ_1) с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРС с давлением расширения 15 МПа; в – S_3 (σ_3) для традиционного крепления; г – S_3 (σ_3) с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРС с давлением расширения в шпуре 15 МПа

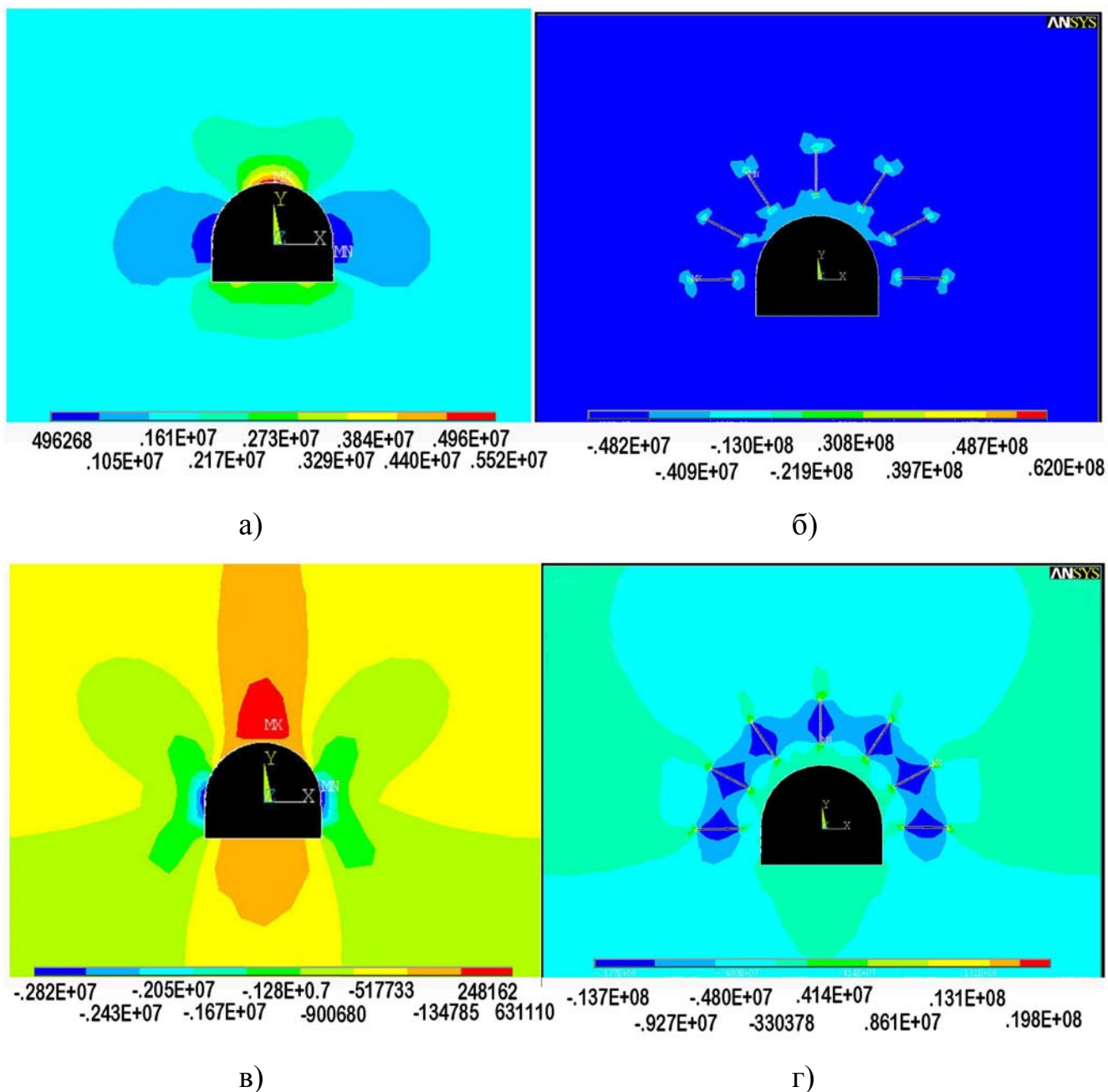


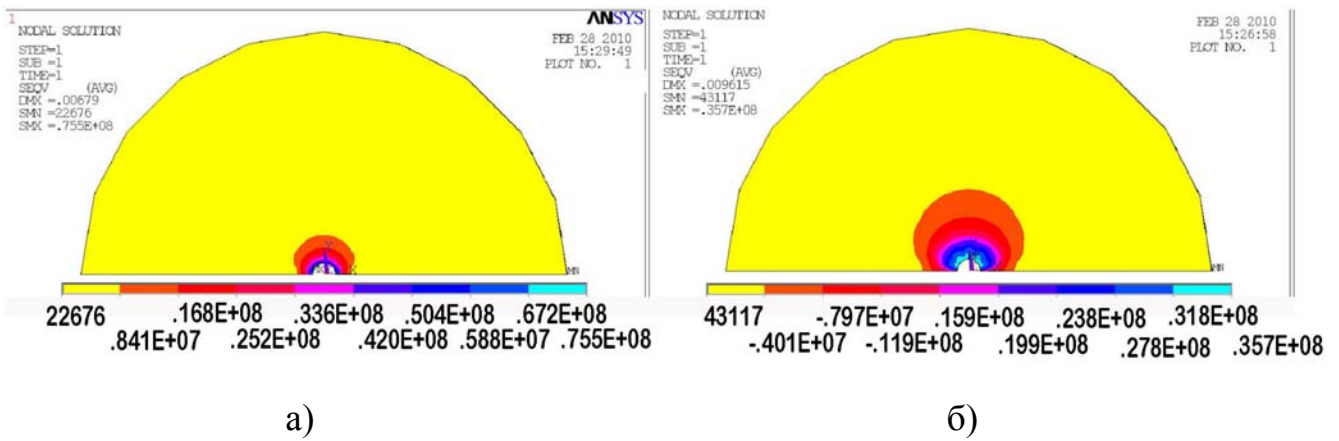
Рисунок 5.4 – Распределение главных напряжений вокруг выработки арочного сечения:

а – $S1 (\sigma_1)$ для традиционного крепления; б – $S1 (\sigma_1)$ с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРС с давлением расширения 15 МПа; в – $S3 (\sigma_3)$ для традиционного крепления; г – $S3 (\sigma_3)$ с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРС с давлением расширения в шпуре 15 МПа

Размер зоны разгрузки в кровле выработки достигает 1,2 ширины выработки. При сжатии приконтурных пород за счет расширения НРС в шпуре с давлением 15 МПа и расстоянием между шпурами 0,5 м, в области эффективной работы НРС, отсутствует зона пониженных напряжений, следовательно, разрушение в этой области маловероятно. Зона пониженных напряжений развивается за контуром сжатой области, при этом размер разгруженной области сокращается на 16%. Аналогичные выводы следуют, из анализа картин распределения главных напряжений S_3 (σ_3). В этом случае четко видны границы зоны сжатия. Предельные напряжения за границей сжатой области не наблюдаются. На контуре выработки имеет место понижение напряжений, но их область заканчивается на границе сжатой зоны. Таким образом, нагружение рамы крепи происходит за счет разупрочнения пород в пределах зоны разгрузки между контуром выработки и сжатой зоной, такие нагрузки вполне могут быть выдержаны современной металлической податливой крепью.

Принудительное сжатие пород вокруг выработки арочной формы (рис. 5.4) также исключает образование зоны разгрузки в кровле выработки и способствует созданию вокруг нее сжатой арочноподобной зоны, препятствующей расслоению пород.

Для определения рационального расстояния между шпурами было проведено математическое моделирование, целью которого было определение зоны влияния шпура с НРС в сплошной среде [307]. В масштабе 1:1 моделировался шпур с НРС единичной длины, расположенный в алевролите с прочностью на одноосное сжатие – 35 МПа. В силу осесимметричности задачи моделировалась половина сечения вдоль вертикальной оси шпура. На рис. 5.5 приведены картины распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, анализ которых позволяет сделать вывод, что область влияния шпура при решении задачи в упругой постановке значительно меньше, чем при решении в нелинейной постановке. Смещения контура шпура, на 43% больше при нелинейном решении задачи. Очевидно, что нелинейное решение позволяет получить более точные результаты.

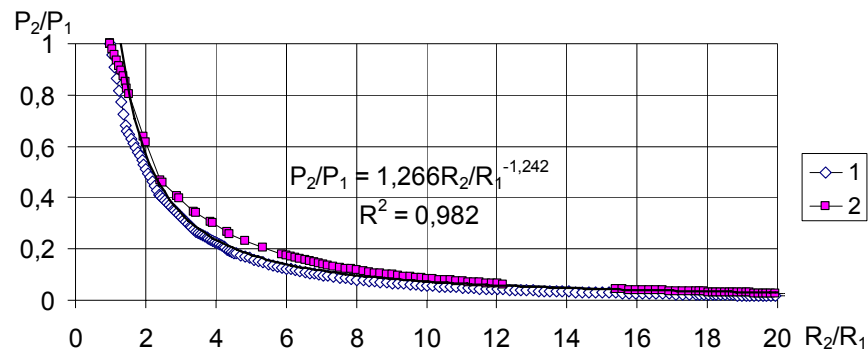


а)

б)

Рисунок 5.5 – Картины распределения в модели эквивалентных напряжений по Мизесу при упругой (а) и нелинейной с использованием критерия Друкера-Прагера (б) постановке задачи

Обработка результатов моделирования позволила получить графики, характеризующие изменение коэффициента передачи давления через породный массив рис. 5.6.



1 – линейная упругая постановка задачи; 2 – нелинейная постановка с использованием критерия Друкера-Прагера

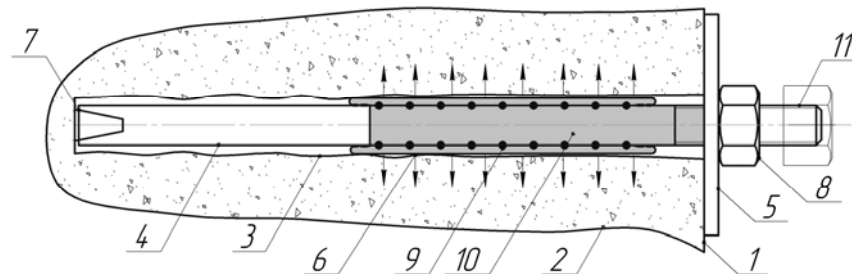
Рисунок 5.6 – Графики зависимости коэффициента передачи давления (P_2/P_1) вглубь массива пород на расстояние R_2/R_1

На рисунке 5.6 по оси абсцисс отложено отношение расстояния от центральной оси шпура R_2 к радиусу шпура R_1 . По оси ординат – отношение давления P_2 , возникающего на расстоянии R_2 , к давлению НПС на стенки шпура P_1 . Принимая необходимое давление на границе зон влияния соседних шпуров, например 5% от давления на стенки шпура, с помощью графиков (см. рис. 5.6), мож-

но установить необходимое расстояние между шпурами для моделируемых пород. Допуская касание зон влияния соседних шпуров с НРС, при давлении на границе зоны влияния $P_{звн}$ 5-10% от развиваемого в шпуре $P(t_i, P_{0i})$, получим максимальное расстояние между шпурами a радиусом r_0

$$a = \frac{2r_0}{\left(\frac{P_{звн}}{1,266 \cdot P(t_i, P_{0i})} \right)^{\frac{1}{1,242}}}, \text{ м.} \quad (5.1)$$

Способ может применяться в комбинации с анкерным креплением [328]. В этом случае шпуры с НРС бурятся между шпурами под полимерную анкерную крепь. На комбинировании эффектов анкерования и сжатия пород также основан разработанный способ крепления горных выработок [329] (рис. 5.7), включающий бурение шпуров, установку и закрепление в них механическим способом трубчатых инъекционных анкеров, нагнетание в зоне интенсивной трещиноватости через перфорированную часть инъекционных анкеров НРС.



1 – контур горной выработки; 2 – породный массив; 3 – шпур; 4 – инъекционный анкер; 5 – опорная плита; 6 – эластичная оболочка; 7 – клиновое устройство; 8 – гайка; 9 – отверстия в перфорированной части инъекционного анкера; 10 – НРС; 11 – запорная пробка

Рисунок 5.7 – Способ крепления горных выработок [329]

Перед установкой трубчатого анкера на него одевают эластичную оболочку и закрепляют ее. Закрепление анкера производят при проведении горной выработки, а нагнетание НРС в эластичную оболочку осуществляют через перфориро-

ванную часть инъекционного анкера на стадии образования зоны разрушенных пород. После нагнетания твердеющего состава устьевую часть инъекционного анкера герметизируют.

Трубчатые инъекционные анкеры выполняют роль несущих силовых элементов и препятствуют расслоению приконтурных пород, работая аналогично традиционной анкерной крепи.

Нагнетание НРС позволяет обеспечить сопротивление процессу дезинтеграции приконтурных пород за счет их сжатия в результате объемного расширения НРС. При этом перемещению сжатой области приконтурных пород в полость выработки препятствует инъекционный трубчатый анкер, закрепленный в донной части шпура, что сдерживает развитие процесса трещинообразования во вмещающих выработку породах и приводит к повышению ее устойчивости.

5.2 Обеспечение устойчивости выработок, поддерживаемых в зоне разрушенных пород

5.2.1 Обоснование управления напряженно-деформированным состоянием пород в зоне разрушенных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей

Традиционные подходы к обеспечению эксплуатационного состояния горных выработок, находящихся в этих условиях, базирующиеся на силовом противодействии процессам перемещения массивов деструктурированных пород в полость выработки, не имеют перспективы.

В горной практике имеется опыт реализации различных методов повышения несущей способности горных пород. Способы упрочнения, основанные на нагнетании вязких скрепляющих составов в законтурную область [323, 330], требуют значительных вложений, но не обеспечивают направленного контролируемого укрепления пород. Известны также способы, основанные на взрывном упрочнении [331]. При их использовании повышение несущей способности пород достигается, как правило, за счет увеличения плотности. Взрывное упрочнение может быть реализовано только в условиях пород, склонных к пластическим де-

формациям. Упрочнение разрушенных горных пород с хрупкими свойствами за счет их взрывного нагружения достаточно сложно и практически нереализуемо, так как динамическое воздействие на разрушенный массив приводит к его дополнительному дроблению, а после взрыва нет сопротивления обратному движению разрушенных пород в направлении шпура, что снижает эффект повышения несущей способности деструктурированного массива. Кроме этого, известны способы взрывного закрепления трубчатых анкеров [332], в которых эффект укрепления достигается за счет работы анкерной крепи, прижатой к стенкам шпура в результате взрыва, а также за счет сопротивления сдвигению пород в направлении шпура, оказываемого трубчатым анкером. Однако при реализации этих способов много энергии расходуется на деформирование трубчатой анкерной штанги. Применение же анкерной крепи, согласно существующим в настоящее время представлениям, имеет смысл в условиях ненарушенного массива [333].

Предлагается новое направление повышения несущей способности разрушенных пород вокруг горной выработки, основанное на использовании собственной прочности горных пород и сложившегося в окружающем массиве равновесного состояния. Предлагаемый подход сводится к тому, что роль дополнительной крепи выполняет искусственно создаваемая из породных отдельностей в пределах ЗРП несущая конструкция. Формирование этой конструкции обеспечивается путем увеличения сил трения между породными фрагментами в пределах ЗРП, что достигается при помощи их силового распора НРС. Разработка способов обеспечения устойчивости выработок, основанных на предложенном подходе, должна учитывать закономерности разрушения и деформирования породного массива в пределах ЗРП.

5.2.2 Шахтные натурные наблюдения за деформированием пород в зоне ведения ремонта горных выработок

Для исследования особенностей деформирования выработок в зоне влияния работ по перекреплению с присечкой боковых пород были проведены шахт-

ные натурные наблюдения в условиях шахт Министерства энергетики и угольной промышленности Украины [68].

Первый этап наблюдений был выполнен во вспомогательном уклоне пласта m_2 на пикете 41+5. В выработке проводилась замена комплекта крепи с присечкой смещенных в полость выработки пород кровли и боков. Габариты выработки увеличивали на 2,2 м в кровлю и на 1,0 м в бока. Согласно шахтному паспорту ремонта выработки присечку проводили при помощи отбойных молотков. Скорость ремонта – одна рама в сутки. Разрушаемые породы были представлены в основном аргиллитами трещиноватыми, с включениями сидерита. Прочность аргиллита 40 МПа. В сечении присекаемых пород четко прослеживается складка с условной осью близкой к поперечной оси выработки. В выработке проводили измерения смещений на участке перед забоем перекрепления длиной 10 м и после забоя перекрепления 10 м в течение 10 суток с помощью разработанного способа контроля состояния горной выработки [285].

Визуальные наблюдения за характером деформирования рам показали, что вектор максимальных смещений ориентирован нормально напластованию пород, что соответствует классическим представлениям о закономерностях смещений в горных выработках. Сводный график общей конвергенции в зоне влияния забоя перекрепления представлен на рис. 5.8.

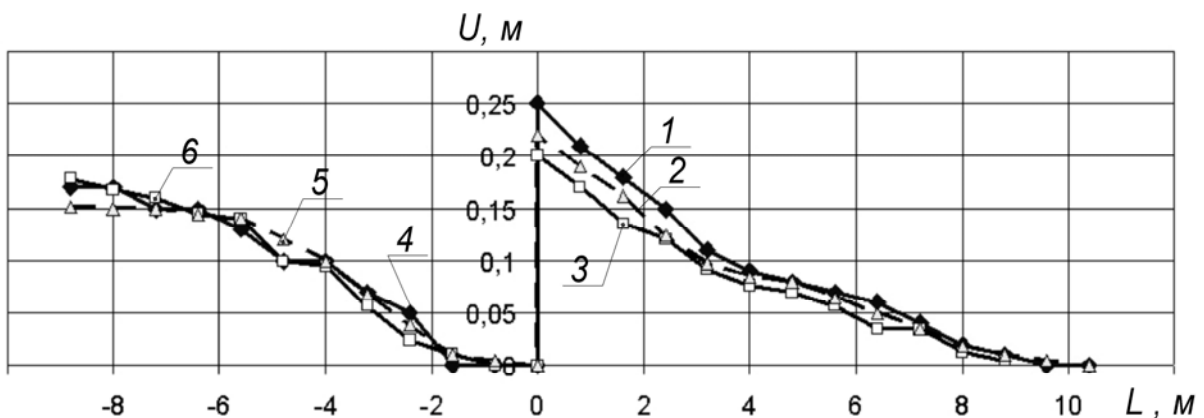


Рисунок 5.8 – Графики вертикальной конвергенции пород во вспомогательном уклоне пласта m_2 на участках перед забоем перекрепления (1, 2, 3) и после забоя перекрепления (4, 5, 6)

Из графика видно, что зона влияния забоя перекрепления, в которой наблюдаются интенсивные смещения, ограничивается участком 10 м перед забоем и 6-8 м после забоя. При этом максимальная доля смещений реализуется на участке 4 м перед забоем перекрепления, общая конвергенция в среднем составила 0,15 м. На участке 2-6 м за местом установки новой рамы крепи также наблюдались интенсивные смещения, которые носили затухающий характер и стабилизировались уже через 10 м после забоя перекрепления. Это можно объяснить вступлением в работу рамы крепи после исчерпания закрепных пустот.

Визуально и инструментально по срезам пород, обнаженных ведением ремонта, определили, что они в месте перекрепления разрушены на мелкоблочные отдельности. Учитывая размер выработки, боковые породы могут быть представлены дискретной средой.

Второй этап натурных наблюдений проводился в конвейерном штреке 5 восточной лавы пл. m_3 гор. 915 м. Ложная кровля была представлена глинистым сланцем с нарушенной текстурой или переслоенным прожилками угля мощностью от 0,1 до 0,5 м. Непосредственная кровля – глинистый сланец мощностью от 3,5 до 4,0 м.

Основная кровля представлена верхней частью слоя глинистого сланца, песчаным сланцем и песчаником общей мощностью от 28,0 м до 42,0 м. Глинистый сланец с прочностью на одноосное сжатие 40 МПа, в верхней части слоя переходил в мелкозернистый песчаник с прочностью на одноосное сжатие от 75 до 95 МПа. В выработке проводилась замена комплекта крепи с присечкой смещенных в полость выработки пород кровли и боков. Габариты выработки увеличивали на 2,0 м в кровлю и на 0,8 м в бока. Присечку проводили при помощи отбойных молотков. Скорость подвигания забоя перекрепления – одна рама в сутки.

Визуальные наблюдения за характером деформирования рам показали, что в условиях обследуемой выработки смещения пород в зоне ремонта выработки имели некоторые особенности. В частности наблюдался наклон рам крепи в сторону противоположную забою штрека до 40 градусов (рис. 5.9) и пространственная асимметрия смещений.

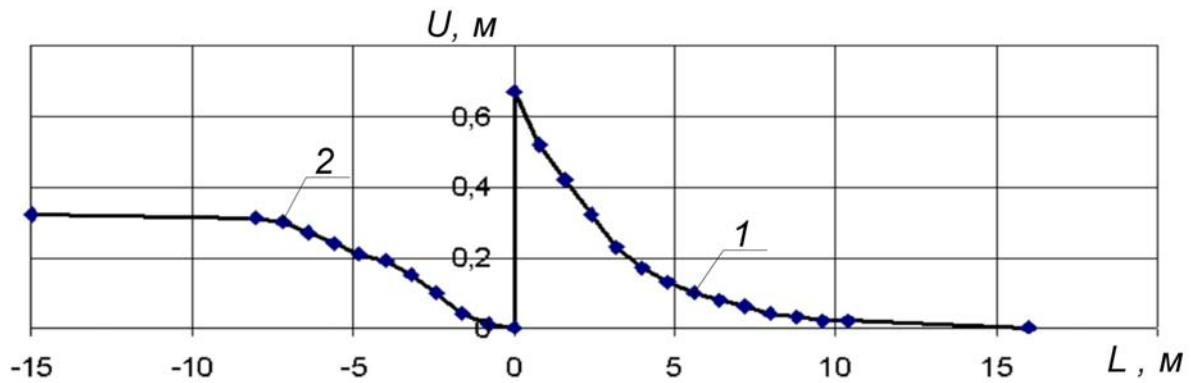


Рисунок 5.9 – Наклон рам крепи на участке перекрепления

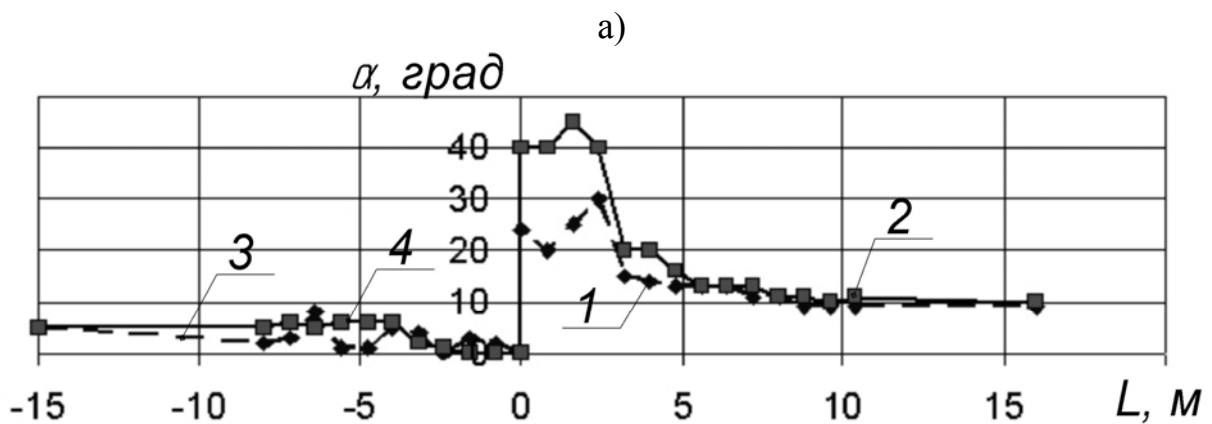
Средний угол наклона на участках установившегося горного давления позади лавы составлял 9-12 градусов, что сопровождалось деформированием хомутов межрамных стяжек и разрушением деревянных распорок. В выработке на момент исследования было 5 точек перекрепления. На каждой из них, на участке перед забоем перекрепления, наблюдалось увеличение угла наклона рам вдоль продольной оси выработки. Вследствие наклона рам даже внешне удовлетворительно выглядевшие комплекты крепи с запасом податливости в замках не работали.

В выработке проводились измерения смещений и угла наклона рам крепи на участке перед забоем перекрепления длиной 16 м и после забоя перекрепления 16 м в течение 10 суток. Результаты измерений приведены на рис. 5.10.

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что зона влияния забоя перекрепления, в которой наблюдаются интенсивные смещения, и увеличение угла наклона рам крепи, ограничивается участком 10 м перед забоем и 6-8 м за забоем. При этом максимальная доля смещений и наклона рам реализуется на участке 0-4 м перед забоем перекрепления. Так на этом участке реализуется 70% вертикальной конвергенции в зоне влияния забоя перекрепления и 75% наклона рам в направлении продольной оси выработки. При этом максимальный угол наклона рам составляет 45 градусов, а максимальная конвергенция 0,68 м.



1, 2 – участки выработки перед и после забоя перекрепления соответственно



1, 2 – участки выработки перед забоем перекрепления; 3, 4 – участки выработки после забоя перекрепления

б)

Рисунок 5.10 – Графики вертикальной конвергенции (а) в конвейерном штреке 5 восточной лавы пл. m_3 гор. 915 м и изменения угла наклона рам крепи (б) со стороны выработанного пространства лавы (1, 3) и со стороны массива (2, 4)

После установки новой рамы крепи на участке 2-8 м также наблюдались интенсивные смещения, которые носили затухающий характер и стабилизировались уже через 12 м после забоя перекрепления.

Наибольший интерес вызывает факт резкого наклона рам крепи перед забоем перекрепления. Такое явление наблюдалось на многих шахтах на участках перекреплений, но в условиях исследуемой выработки оно особенно выражено. Известно, что разрузка массива при выемке горной массы, при проведении выра-

ботки, восстановлении ее сечения или при ведении очистных работ приводит к разуплотнению пород в направлении образованной полости, что вызывает, в том числе, и горизонтальные перемещения пород. Например, при ведении очистных работ это явление наблюдают в виде отжима угольного пласта.

Анализ горно-геологических условий показывает, что на рассматриваемом участке породы кровли имеют выраженный кливаж, при этом трещины наклонены преимущественно в сторону выработанного пространства под углом 35-75 градусов от горизонтали. На экспериментальном участке угол наклона кливажных трещин составлял 40 градусов. Кливажные трещины являются естественными плоскостями скольжения для смещающихся пород, что может служить объяснением наблюдаемому явлению.

На момент ведения работ по перекреплению выработки вмещающие породы представляют собой блочно структурированный массив, размер блоков которого зависит от горно-геологических и горнотехнических условий и предыстории нагружения. Вокруг выработки образована ЗРП, на фронте которой соблюдается условие равновесия. При проведении ремонта осуществляют разрушение и отбойку смещенных в полость выработки пород кровли, что вызывает нарушение сложившегося в массиве равновесного состояния. Впереди забоя перекрепления формируется зона повышенных напряжений, что приводит к инициированию роста размеров ЗРП и движению ее фронта вглубь массива. При этом разрушение пород на фронте ЗРП вызывает увеличение их в объеме и создает давление на породы внутри зоны разрушения. Это приводит к активизации смещений в пределах ЗРП в полость выработки. Поскольку движение структурных блоков в направлении полости выработки осуществляется по линиям наименьшего сопротивления, траектории перемещения блоков совпадают с плоскостями скольжения в массиве, которыми могут выступать, например, кливажные трещины. Это приводит к возникновению горизонтальной составляющей сдвижений и, в частности, к наклону рам крепи в направлении продольной оси выработки. Чем больше размер структурных блоков в пределах ЗРП, тем более будет выражен эффект влияния плоско-

стей ослабления. Этим можно объяснить тот факт, что описываемые явления наблюдаются не во всех перекрепляемых выработках.

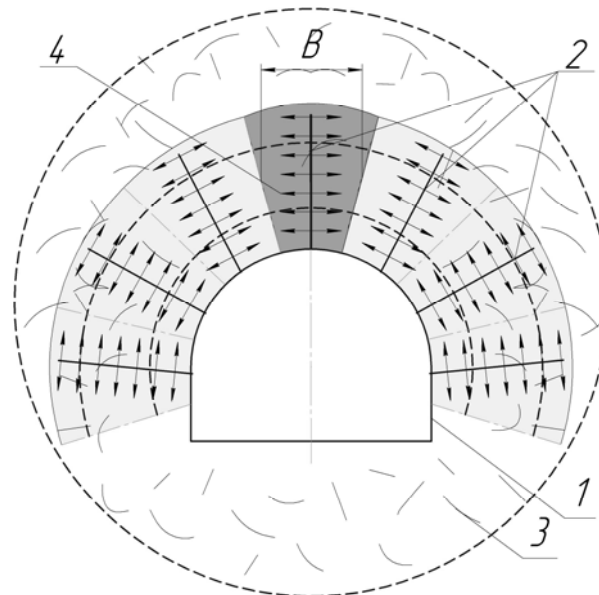
Например, применительно к проведенным замерам в первом случае породы в пределах ЗРП были представлены в основном аргиллитами трещиноватыми с прочностью на одноосное сжатие 40 МПа. Формирование ЗРП происходило вокруг выработки вне зоны влияния очистных работ. Породы были разбиты на блоки небольших размеров и при разрушении в процессе ремонта отслаивались в полость выработки небольшими плитчатыми отдельностями. В таких условиях вектор смещений пород был направлен нормально напластованию, а кливажные трещины не оказывали влияния на сдвигение пород. В условиях второго случая породы на фронте ЗРП были представлены мелкозернистым песчаником с прочностью на одноосное сжатие от 75 до 95 МПа. Выработка проводилась вслед за лавой. Разрушение прочного песчаника происходило крупными блоками, которые смещались в направлении полости выработки по кливажным трещинам. Обрушаемые при восстановлении сечения выработки породы были представлены крупноблочной средой. Это вызывало отклонение вектора сдвижений пород от нормального напластованию направления.

Таким образом, проведенные шахтные наблюдения за сдвижением пород в пределах зоны влияния забоя перекрепления позволяют сделать вывод, что характер проявления горного давления при ведении ремонтных работ зависит не только от прочности пород и глубины, но и от размеров структурных блоков в пределах зоны разрушения и ориентации трещин кливажа.

В условиях высокой степени дробления пород в пределах ЗРП вектор максимальных смещений ориентирован нормально напластованию пород, а в условиях блочно структурированного массива с выраженной кливажной системой движение структурных блоков в направлении полости выработки происходит по плоскостям скольжения в массиве, что приводит к возникновению горизонтальной составляющей сдвижений. Разный характер деформирования структурно-неоднородных пород требует рассмотрения вопросов формирования из них несущих конструкций отдельно для дискретных и блочно-дискретных сред.

5.2.3. Исследование способа повышения несущей способности разрушенных горных пород, представленных квазидискретной средой

Установление возможности повышения несущей способности разрушенных пород, представленных квазидискретной средой, путем их распора, проводилось с помощью лабораторного моделирования на структурных моделях [283]. Проведенные исследования послужили основой для разработки способа обеспечения эксплуатационного состояния выработки, поддерживаемой в условиях сильно разрушенных пород. Способ реализуется следующим образом. По фактическому контуру выработки в массив горных пород бурятся шпуры, в шпуры помещают НРС, после чего их герметизируют. В результате увеличения в объеме НРС растет давление на стенки шпура, и сжимаются породы вокруг выработки. Таким образом, при арочной форме сечения выработки и веерной схеме бурения шпуров вокруг нее создается сжатая сводообразная зона. Предлагаемая схема реализации способа обеспечения устойчивости выработки, основанного на распоре вмещающих пород, представлена на рисунке 5.11.



1 – контур выработки; 2 – шпуры с НРС; 3 – разрушенные породы; 4 – область влияния одного шпура

Рисунок 5.11 – Схема создания несущей конструкции из разрушенных пород

Основным параметром предлагаемого способа является необходимый, с точки зрения обеспечения устойчивости разрушенных пород, размер области влияния шпура с распорным элементом (B), который определяет необходимое расстояние между шпурами. Изучение механизма передачи давления от заряда НРС через дискретный материал проводилось методом физического моделирования на структурных моделях [280, 281] по методике, приведенной в п.п. 2.3.3.

На основании полученных результатов исследований были построены графики зависимости давления, возникающего на наружном контуре разрушенных пород, от расширения во внутреннем контуре. Для примера приведены графики передачи давления от рабочей камеры №1 к камере №2, расположенной у боковой полукруглой стенки диаметром 50 см через стеклянные шары (рис. 5.12).

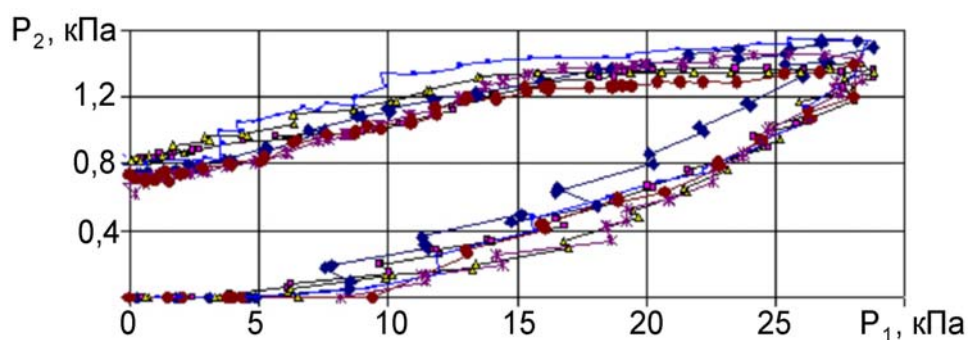


Рисунок 5.12 – Графики зависимости давления P_2 на наружном контуре зоны разрушенных пород, от давления P_1 во внутреннем контуре при нагружении и разгрузке модели

Нижняя ветвь графиков описывает поведение материала в модели при ее нагружении, верхняя – при разгрузке. Следует отметить, что передача давления на внешний контур зоны влияния заряда при нагрузке происходит не линейно, а по зависимости близкой к квадратичной. Это можно объяснить последовательным уплотнением и переупаковкой дискретного материала в направлении от зоны ближней к заряду НРС вглубь массива. При этом коэффициент передачи давления повышается при увеличении абсолютного значения нагрузки на внутреннем контуре. Ветвь нагружения не однородно линейная, а представляет собой ломаную с участками, как резкого повышения, так и спада коэффициента передачи давления,

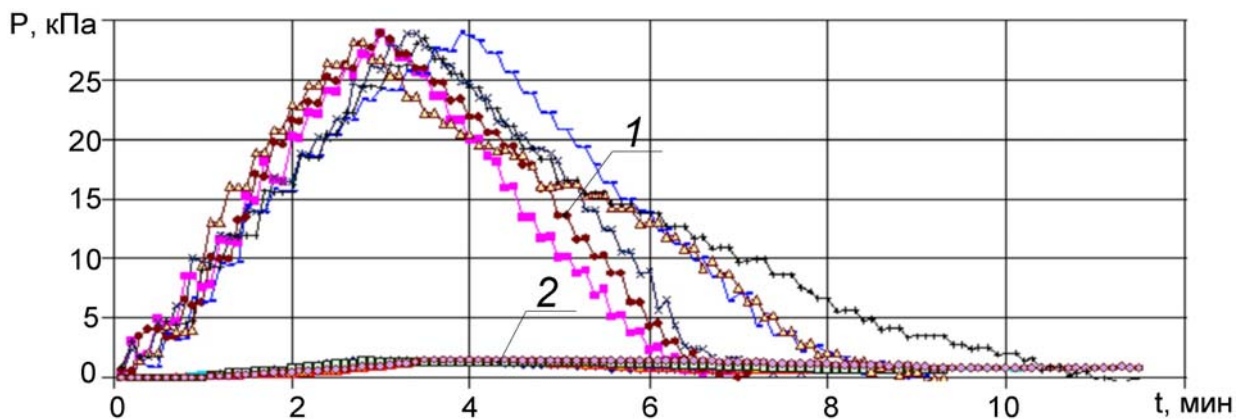
что объясняется заклиниванием и локальной консолидацией дискретных элементов при приложении и снятии нагрузки, образованием и разрушением макро - и микросводов. Характерно, что при разгрузке передача давления от контура зоны влияния к заряду НРС происходит не по пути нагружения, а более полого. Кроме того, после снятия давления на внутреннем контуре, давление на внешнем контуре остается, а величина остаточного давления зависит от вида дискретных элементов. Так, для пластиковых шаров давление на внешней стороне практически равно нулю, а например, для керамзита, практически не снижается.

Объяснить это можно тем, что при нагружении происходит переупаковка дискретных элементов и система переходит из безраспорной сыпучей среды в состояние распорной. Изменяется пространственная ориентация дискретных элементов и количество контактов между ними. При этом система аккумулирует кинетическую энергию дезинтегрированного массива и обеспечивает самоподдержание элементов. Эта особенность может быть использована при обосновании параметров и методики расчета способа упрочнения породного массива при высокой степени дробления пород в пределах ЗРП, основанного на создании их активного распора.

Обработка цифрового видеоматериала позволила получить координаты маркированных дискретных элементов на всех этапах нагружения и разгрузки модели, а также абсолютное время для каждого этапа, что дало возможность отследить перемещения дискретных элементов. Графики смещений маркированных элементов и картина поэтапного смещения каждого из них для случая нагружения и разгрузки модели приведены в работе [280]. Анализ позволил сделать вывод, что векторы абсолютных смещений дискретных элементов достаточно близко совпадают с лучами, проведенными из центра модели. Однако поэтапное перемещение дискретных элементов, особенно на первом этапе, когда происходит переупаковка и сжатие элементов, носит случайный, иногда возвратно-поступательный, характер. Пути перемещения элементов при нагружении и разгрузке модели разные. Перемещения маркированных дискретных элементов для разных серий моделей не совпадают. Наблюдается случайный характер взаимопо-

ремещений, заклинивание и локальная консолидация дискретных элементов при приложении и снятии нагрузки.

Передача давления через дискретный массив происходит не мгновенно и зависит от скорости нагружения. Чем быстрее прикладывается давление на внутреннем контуре, тем больше происходит переупаковка и сжатие материала в ближней к заряду НРС области, так как дискретные элементы не успевают последовательно переместиться в новое положение. Поскольку при распоре пород с помощью НРС рост давления происходит достаточно медленно, режим нагружения моделей был выбран соответствующий. Каждый последующий этап нагружения начинался после прекращения сдвижений дискретных элементов на предыдущем этапе. Графики, характеризующие передачу давления через дискретный материал в реальном времени, для случая нагружения и разгрузки модели со стеклянными шарами при радиусе внешнего контура 50 см, представлены на рис. 5.13.



1 – внешний контур модели; 2 – внутренний контур модели

Рисунок 5.13 – Графики зависимости давления на внешнем контуре модели от давления во внутренней рабочей камере №1 во времени для случая нагружения и разгрузки модели со стеклянными шарами при радиусе внешнего контура 50 см

Анализ графиков показывает, что, несмотря на небольшую скорость изменения давления и перерыв между этапами нагружения и разгрузки до полного прекращения смещений дискретных элементов, наблюдается запаздывание передачи давления на внешний контур модели. Так, рост давления на внешнем контуре

ре начинается после достижения давлением на внутреннем контуре величины 7-10 кПа, а при уменьшении давления на внутреннем контуре, в начале разгрузки модели, на внешнем контуре давление еще продолжает расти. Это также подтверждает, что при нагружении происходит переупаковка элементов и последовательное уплотнение дискретного материала в направлении от зоны ближней к заряду НРС вглубь массива.

Обработка результатов моделирования позволила установить, что с уменьшением размера дискретных элементов снижается размер зоны влияния заряда НРС, поскольку увеличивается количество элементов, а, следовательно, и контактных пар трения, что вызывает образование сводов, заклинивание элементов и рассеяние энергии. Отклонение формы дискретного элемента от идеальной (шара) также приводит к уменьшению размеров зоны влияния, поскольку при переупаковке элементов образуются не только точечные контакты, но и плоскости трения, сцепления, что повышает эффект заклинивания. Это явление отрицательно сказывается на этапе нагружения, но играет положительную роль при разгрузке модели.

Результаты исследования позволяют получить качественную характеристику передачи давления через дискретную среду. В моделях не учитывается реальный вес пород и форма породных фрагментов, коэффициент внешнего трения пород, количество и направление плоскостей контактов, которые в каждом конкретном случае будут отличаться и зависеть от литотипа пород и степени их дробления. Это снижает абсолютную величину сил трения между породными фрагментами. Но можно с уверенностью сказать, что механизм работы материала и характер кривой, описывающей снижение коэффициента передачи нагрузки через дискретный материал, не изменится.

Проведенные исследования передачи давления P_1 мелкофракционным дискретным материалом от стенок шпура радиусом R_1 , содержащего НРС, на расстоянии R_2 позволили получить эмпирическую зависимость, которая позволяет с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,95$ определить давление на расстоянии R_2 от оси шпура

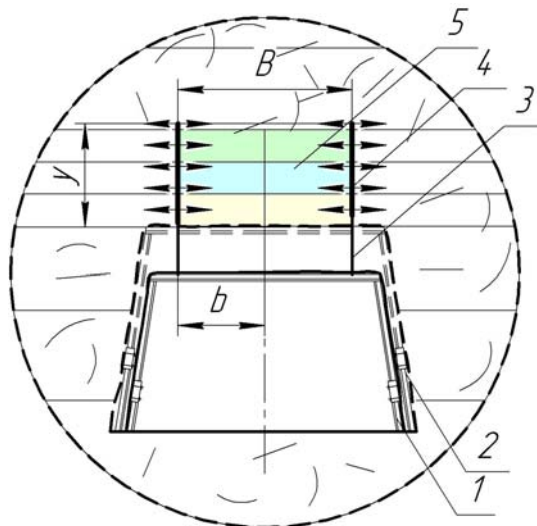
$$P_2 = \frac{(1,1116e^{-0,2787 \frac{R_2}{R_1}}) \cdot P_1}{n}, \text{ МПа,} \quad (5.2)$$

где n – коэффициент снижения давления саморасширения в дискретном материале, определяемый экспериментальным методом.

Задаваясь необходимым давлением на границе зон влияния соседних шпуров, например 5% от давления на стенки шпура, можно установить необходимое расстояние между шпурами. Указанное расстояние составляет 0,4-0,6 м. На основании проведенных исследований разработаны и запатентованы способ крепления горных выработок, пройденных в породах, склонных к пучению [334] и способ повышения устойчивости почвы горной выработки [335].

5.2.4 Исследование способов повышения несущей способности разрушенных горных пород, представленных блочно-дискретной средой

На эффекте повышения несущей способности пород при их сжатии основан способ упрочнения горных пород [336], принципиальная схема которого представлена на рис. 5.14.

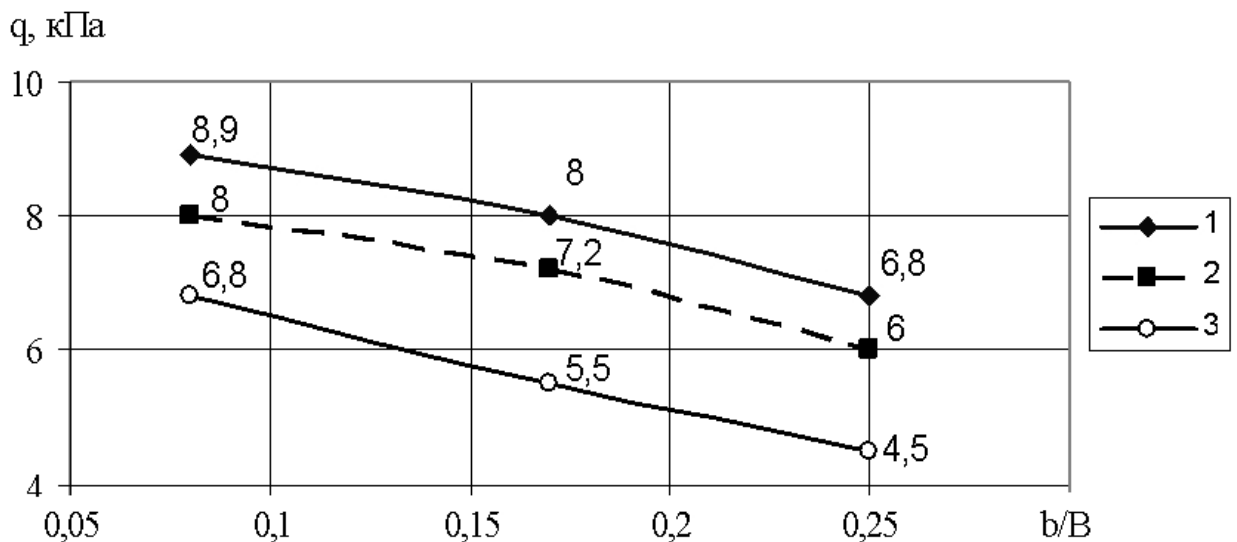


1 – деформированная рама крепи; 2 – новая рама крепи; 3 – шпур; 4 – НРС; 5 – сжимаемая область пород

Рисунок 5.14 – Способ упрочнения горных пород [336]

Обеспечение устойчивости пород, в пределах зоны возможного вывала, достигается путем повышения трения между породными фрагментами за счет их сжатия, в результате увеличения в объеме НРС, помещенной в шпур. Реализация данного способа позволит предотвратить нежелательный выпуск породы из за-проектного контура при демонтаже деформированной рамы крепи, что обеспечит минимальное нарушение сложившегося в окружающем массиве равновесного состояния и способствует повышению устойчивости выработки в послеремонтный период.

Для случая, когда породы представлены блочно-дискретной средой, были выполнены 33 эксперимента по методике, описанной в п. 2.3.3, при $b/B = 0,25$, где B – длина слоя укрепляемых пород, соответствующая расстоянию между распорными элементами. Каждый опыт повторялся 5 раз. В расчетах использовалось среднее арифметическое значение результатов. Из графиков зависимости минимального давления от размеров блоков и количества слоёв (рис. 5.15) видно, что при увеличении размеров структурных блоков, при прочих равных условиях, величина давления в распорных элементах, необходимого для обеспечения устойчивости укрепляемых слоёв пород, уменьшается.



1 – 1 слой; 2 – 2 слоя; 3 – 3 слоя

Рисунок 5.15 – Графики зависимости минимально необходимого давления НРС от размеров блоков и количества слоёв

Так, при увеличении длины блоков в 3 раза (от $0,08b/B$ до $0,24b/B$), происходит снижение минимально-необходимого давления распора в $1,3\div 1,5$ раз. Увеличение количества слоев приводит к снижению необходимого давления. Так, при увеличении рядов от 1 до 3 необходимое давление распора уменьшается на $30\div 50\%$. При этом указанная зависимость сохраняется при изменении длины блоков от $0,087$ до $0,24 b/B$. Полученный результат объясняется влиянием сил трения, возникающих между соседними слоями блоков при их прогибе. Эти силы противодействуют горизонтальным перемещениям нижнего слоя при изгибе.

Для определения параметров способа при дополнительной пригрузке формируемой конструкции, весом пород в пределах ЗРП, было проведено математическое моделирование МКЭ, реализованное в программном комплексе ANSYS [337]. Задача решалась в объемной постановке в масштабе 1:1. Решение задачи осуществляется при следующих допущениях: граница зоны возможного обрушения пород кровли выработки H распространяется до границы ЗРП вокруг выработки; сжимаемые породные фрагменты по форме представляет собой параллелепипеды, с высотой, равной мощности породных слоев. Равновесное состояние области породного массива по ширине B обеспечивается за счет приложения распределенной нагрузки q по его краям на участке y . При этом суммарные силы трения по вертикальным границам породных блоков уравниваются их весом с учетом дополнительной нагрузки, создаваемой весом пород. Варьировались следующие параметры: размер и количество сжимаемых породных фрагментов n от 1 до 8 (показатель, характеризующий степень трещиноватости пород); коэффициент трения между фрагментами k_{mp} от 0,1 до 0,8; величина распределенной нагрузки на сжимаемые породные фрагменты, определяемая высотой возможного обрушения от 0,2 до 2,0 м.

Решалась задача обеспечения устойчивости конструкции с учетом возможности прогиба породных блоков. Решение задачи производилось методом последующих итераций с учетом полученных результатов на предыдущем этапе решения. Таким образом, определяли минимально необходимую величину распределенной нагрузки q для обеспечения самоподдержания пород до момента их об-

рушения. Исходные данные, принятые для моделирования, взяты из кадастра физических свойств горных пород для алевролита с прочностью на одноосное сжатие – 35 МПа. На рис. 5.16 приведены результаты расчета при количестве породных фрагментов равном 4.

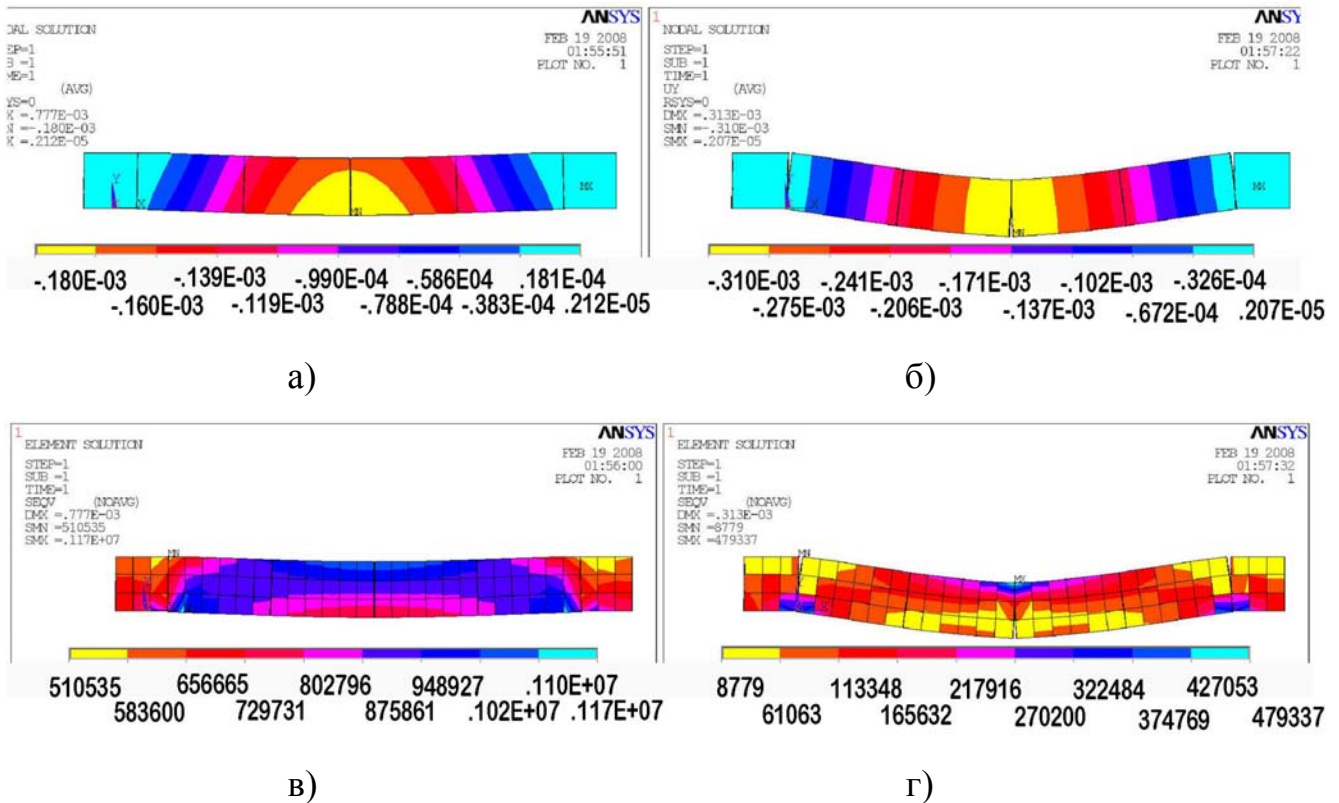


Рисунок 5.16 – Картины распределения: вертикальных смещений при решении задачи на 5 (а) и 10 (б) шагах решения; эквивалентных напряжений по энергетической теории прочности на 5 (в) и 10 (г) шагах решения

На рис. 5.16 а, б видно, что происходят перемещения и поворот одних породных фрагментов относительно других. Максимальные смещения наблюдаются в центре пролета, что соответствует реальному механизму потери устойчивости в горных породах. Из рис. 5.16 в, г следует, что максимальные напряжения наблюдаются в углах изгиба моделируемой шарнирной балки, а минимальные напряжения в середине пролета, то есть в месте максимальных деформаций. Аналогичные решения были получены для всего диапазона изменения условий моделирования. Результаты проведенного численного эксперимента обрабатывались методами

математической статистики с помощью пакета программ SPSS. Это позволило, с достоверностью 95%, получить регрессионную зависимость вида

$$q = \frac{G}{k} (0,0155k_{mp}^{-0,7} + 0,0008 \ln(n_{bl})), \quad (5.3)$$

где G – вес пород в пределах зоны возможного обрушения, кгс;

k_{mp} – коэффициент внешнего трения породы;

n_{bl} – количество породных блоков на участке между шпурами B , шт;

k – отношение высоты участка приложения нагрузки y к высоте возможного вывала H

$$k = \frac{y}{H}. \quad (5.4)$$

Анализ приведенной зависимости показывает, что с увеличением размера сжимаемого участка от 0,5 до 4 м необходимая величина распора уменьшается с 3,40 до 0,4 МПа. Такие значения давлений могут быть обеспечены НРС.

Более того, давление расширения современных НРС значительно выше требуемого для создания грузонесущих конструкций. Поэтому были проведены лабораторные исследования, задачей которых был поиск добавок, обеспечивающих управляемое снижение давления расширения смесей [338]. Для замещения доли оксида кальция в смеси был применен мелкозернистый кварцевый песок SiO_2 фракцией 0,4-0,8 мм. Проведена серия опытов при изменении массовой доли песка от 10 до 80% взамен CaO . Полученные результаты позволили сделать вывод, что при добавлении кварцевого песка происходит плавное снижение давления расширения.

Применение полученного эффекта повышения несущей способности пород также реализовано в способе [339], в котором за счет регламентирования места и направления бурения шпуров с учетом ориентации кливажных трещин, обеспечивается увеличение силы трения между соседними блоками пород по кливажным трещинам, которое приводит к снижению смещений пород контура выработки. Способ упрочнения горных пород в процессе поддержания выработки включает: предварительное определение ориентации плоскостей преобладающего направления распро-

странения трещин и высоту возможного вывала пород; бурение шпуров в породы контура выработки; размещение в шпурах НРС и их герметизацию. При этом устья шпуров располагаются в местах выхода кливажных трещин на поверхность обнажения пород. Расстояние между шпурами определяется по зависимости:

$$a_{un} = (0,8 \div 1,0) \frac{P_{нрс} \cdot l_{un}}{(0,0155k_{mp}^{-0,7}) \cdot H \cdot \gamma}, \text{ м}, \quad (5.5)$$

где $P_{нрс}$ – давление НРС на стенки шпура, МПа;

l_{un} – длина шпура, м;

H – высота возможного вывала, м;

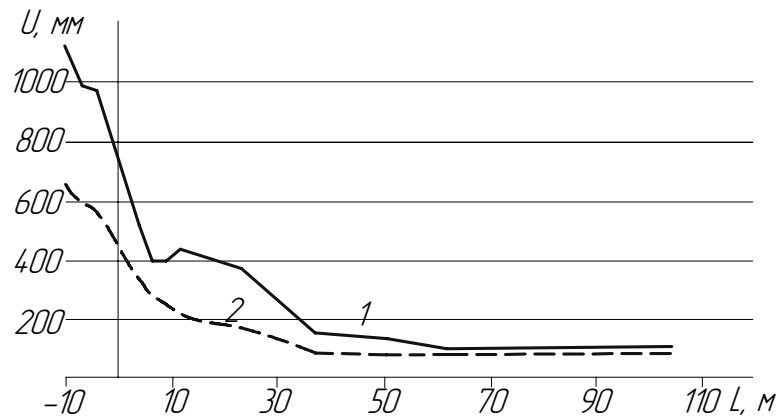
γ – максимальный удельный вес пород контура выработки, кг/м³.

При расширении НРС сжимает блоки пород, между которыми располагается. Направление усилий, которые развиваются при расширении НРС, перпендикулярно плоскости трещины. Нагружение приконтурных пород в зоне интенсивного проявления горного давления приводит к сдвигу блоков по плоскостям кливажных трещин в направлении полости выработки. При этом возникает сила трения между породными блоками, которая противостоит сдвигам. При сжатии породных блоков НРС сила трения между ними увеличивается, чем обеспечивается повышение устойчивости приконтурных пород. Описанный способ прошел проверку в условиях ОП «Шахта Добропольская» ГП «Добропольеуголь».

5.3 Обеспечение устойчивости выработок, поддерживаемых за лавой

5.3.1 Шахтные наблюдения за деформированием горных пород в зоне влияния очистных работ

Типичный характер деформирования выработки в зоне влияния очистных работ можно отследить по динамике смещений контурных реперов в 5 южном конвейерном штреке уклона пл. m_5^{16} гор. 450 м ОП «Шахта Добропольская» (рис. 5.17). Описание условий эксперимента приведено в п. 5.1.



1, 2 – смещения пород кровли и боков выработки соответственно

Рисунок 5.17 – Графики смещений пород U в зависимости от расстояния до очистного забоя L

Приближение очистного забоя вызывает увеличение смещений, фиксируемое на расстоянии 50-40 м перед лавой. Визуально влияние очистного забоя было замечено в 20 м впереди лавы. На этом участке наблюдались незначительные деформации кровли и боков выработки. Для усиления крепи здесь устанавливались металлические стойки из СВП-22 под каждый профиль. Интенсивные деформации боков выработки проявлялись в 12 м впереди лавы. В 6 метрах до подхода лавы в выработке устанавливались еще 2 ряда деревянных стоек усиления под профиль. На сопряжении штрека с очистным забоем выкладывалось два ряда тумб БЖБТ и ряд деревянных костров из шпального бруса.

Общие смещения под лавой составляли около 1,2-1,8 м. Коржение и расслоение пород кровли наблюдалось после прохода лавы на расстоянии 2-4 м. Происходило отслоение блоков пород различных размеров, которые удерживались сетчатой затяжкой, в результате чего между деревянными стойками профиль изгибался. Уже на расстоянии 8-10 м после прохода лавы выработка находилась в нерабочем состоянии. Стойки крепи усиления деформировались, происходили вывалы пород из кровли с разрушением сетчатой затяжки. Смещения кровли имели скачкообразный характер, что объясняется обрушением зависающей в выработанном пространстве консоли.

Экспериментальные участки также были оборудованы в конвейерных штреках 5 восточной и 3 западной лав пл. т₃ гор. 915 м [340]. Штреки проводились вслед за лавой с подрывкой пород кровли и почвы пласта, крепились металлоарочной крепью АП–5/18,3 из СВП–33 с подставками 1,4 м с шагом 4×0,5 м +1×0,8 м. Сечения выработки $S_{св.} = 20,9 \text{ м}^2$, $S_{пр.} = 28,6 \text{ м}^2$. Затяжка кровли железобетонная, боков – металлическая сетка. Охрана штреков со стороны лавы осуществлялась жесткой полосой из полублоков на глине размером 0,4х0,1х0,2 м каждый, шириной 2,0 м и высотой равной мощности пласта.

Вынимаемая мощность пласта 1,37 – 1,52 м, угол падения от 7 до 12°, прочность угля на одноосное сжатие – 15 МПа, объёмный вес – 1,32 т/м³. Ложная кровля представлена глинистым сланцем с нарушенной текстурой или переслоенным прожилками угля мощностью от 0,1 до 0,5 м. Непосредственная кровля – глинистый сланец мощностью от 3,5 до 4,0 м. По устойчивости породы относятся к категории Б₃, в зонах опорного давления – Б₂. Основная кровля представлена верхней частью слоя глинистого сланца, песчаным сланцем и песчаником общей мощностью от 28,0 м до 42,0 м. Глинистый сланец с прочностью на одноосное сжатие 40 МПа в верхней части слоя переходил в мелкозернистый песчаник мощностью 3,7 м с прочностью на одноосное сжатие от 75 до 95 МПа. Породы основной кровли по обрушаемости относятся к категории А₂. Непосредственная почва представлена песчаным сланцем мощностью 0,80 м, с прочностью на одноосное сжатие от 20 до 30 МПа. Основная почва – песчаный сланец, с прочностью на одноосное сжатие от 61 до 75 МПа. Результаты замеров представлены на рис. 5.18.

На расстоянии 0 – 50 м за проходом лавы наблюдалось пучение почвы на 0,68 м, смещения кровли 0,38 м. Скорости смещения составили: кровли – 7,6 мм/м (13,57 мм/сутки при среднем подвигании лавы на 1,8 м/сутки), почвы – 13,6 мм/м (24,28 мм/сутки). На расстоянии от 50 до 100 м за проходом лавы наблюдалось пучение почвы на 0,98 м, кровли – 0,51 м.

Скорости смещения составили: кровли – 2,6 мм/м (4,6 мм/сутки при среднем подвигании лавы на 1,8 м/сутки), почвы – 6 мм/м (10,71 мм/сутки).

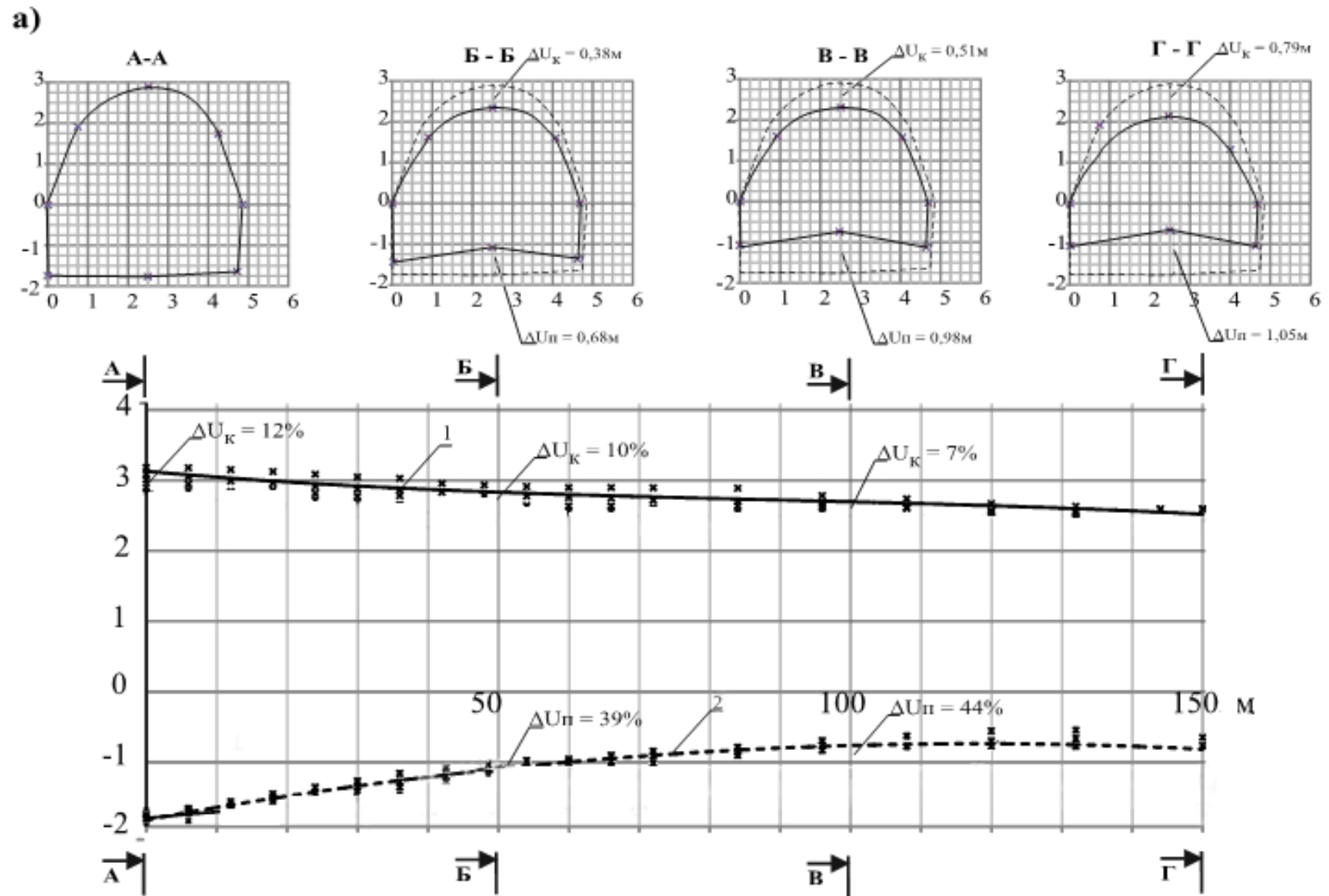


Рисунок 5.18 – Графики смещения пород кровли (1) и почвы (2)

На расстоянии 100 – 150 м за проходом лавы наблюдалось пучение почвы величиной 1,05 м, кровли – 0,79 м. Скорости смещения составили: кровли – 5,6 мм/м (1 мм/сутки при среднем подвигании лавы на 1,8 м/сутки), почвы – 1,4 мм/м (2,5 мм/сутки).

Можно выделить две зоны смещений, которые отличаются по скоростям смещений контура выработки. Первая зона – зона активного проявления горного давления, заканчивается за лавой на расстоянии 30-60 м. Скорости смещения кровли в этой зоне составляют 13-14 мм/сутки. Вторая зона – зона затухающих деформационных процессов, характеризуется постепенным снижением скоростей смещений кровли в 9 – 10 раз, по сравнению с первой зоной, после чего они стабилизируются и происходят со скоростью 1-2 мм/сутки. Исследования [341] показывают, что одной из форм деформирования арочной крепи является наклон рам вдоль продольной оси выработки, при этом наблюдается пространственная асимметрия смещений.

Угол наклона, в отдельных случаях, может достигать 25-30 градусов (рис. 5.19), что сопровождается разрывом и деформированием хомутов межрамных стяжек, изломом деревянных распорок.



а)

б)

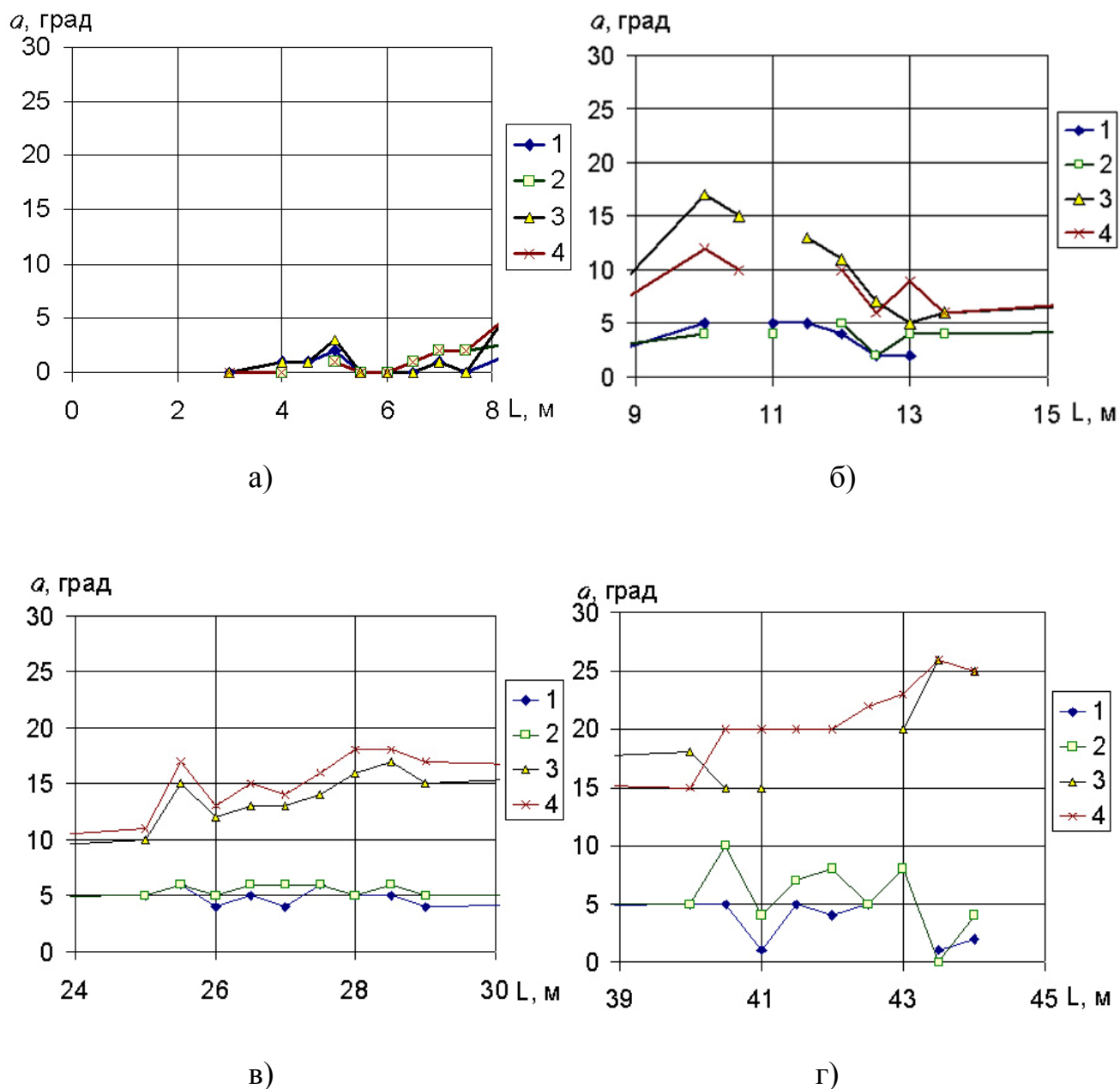
Рисунок 5.19 – Наклон рам крепи в штреке (а) и квершлагае (б)

Связывание между собой рам крепи профилем из СВП (рис. 5.19) не дает ощутимого положительного результата, так как деформируются хомуты, с помощью которых крепится продольный профиль к рамам, обрываются гайки, происходит пространственное выкручивание рамы крепи выше продольного профиля СВП. Наклон рам крепи в направлении оси выработки приводит к тому, что внешне вполне удовлетворительно выглядящая рама с запасом податливости в замках не работает.

Анализ показывает, что, несмотря на значительный объем исследований, связанных с креплением выработок, вопросу горизонтальных перемещений в направлении продольной оси выработки в настоящее время уделяется недостаточное внимание. Поэтому были проведены шахтные натурные наблюдения за динамикой пространственного сдвижения горных пород и перемещения рам крепи. Кроме того, определялся угол наклона ножек и верхняка арочной крепи. Измерения выполнялись на 5 замерных участках длиной 8 м каждый с замерами на каждой раме крепи.

В результате обработки результатов измерений были построены графики зависимости угла наклона рам крепи по длине выработки от расстояния от забоя (рис. 5.20). Угол наклона рам изменяется неравномерно по трассе выработки, это можно объяснить общими закономерностями развития смещений, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Следует отметить, что со стороны массива величина горизонтальных сдвижений в направлении продольной оси выработки больше, чем со стороны выработанного пространства. Кроме того, угол наклона верхняка, как правило, всегда больше, чем наклон ножек рам крепи.

Из графиков видно, что заметный наклон рам крепи начинается на расстоянии 7-10 м от забоя штрека, что соответствует расстоянию 12-15 м от забоя лавы, поскольку штрек проводился вслед за лавой, а стабилизация горизонтальных смещений наблюдается на расстоянии 40-50 м от лавы.



1 – ножка крепи со стороны выработанного пространства; 2 – верхняк со стороны выработанного пространства; 3 – ножка крепи со стороны массива; 4 – верхняк со стороны массива

Рисунок 5.20 – Графики изменения угла наклона элементов рам крепи, по трассе выработки при удалении от забоя на расстояние: а) 1-8 м; б) 9-14 м; в) 24-30 м; г) 39-44 м

Это, а также скачкообразный характер изменения угла наклона, позволяет связать горизонтальные сдвигения в направлении продольной оси выработки с обрушением зависающих пород основной кровли вслед за лавой. Общий график вертикальной конвергенции и горизонтальных сдвижений кровли в районе замка крепи со стороны выработанного пространства на участке 0-45 м от забоя выработки приведен на рис. 5.21.

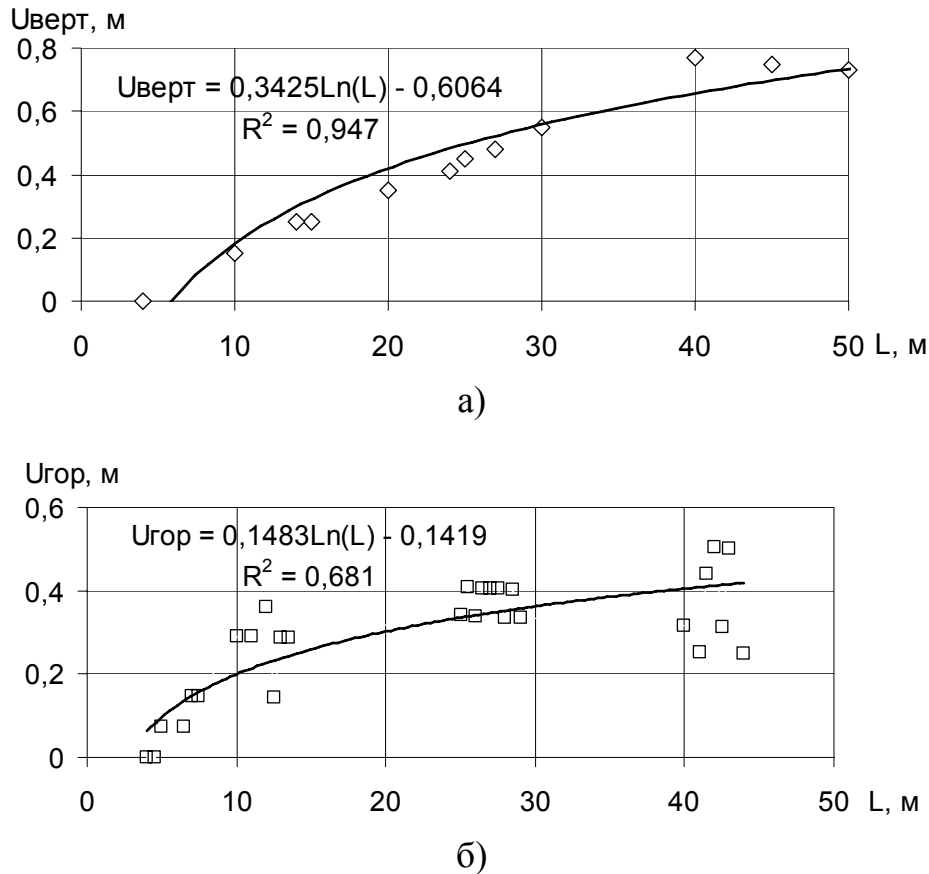


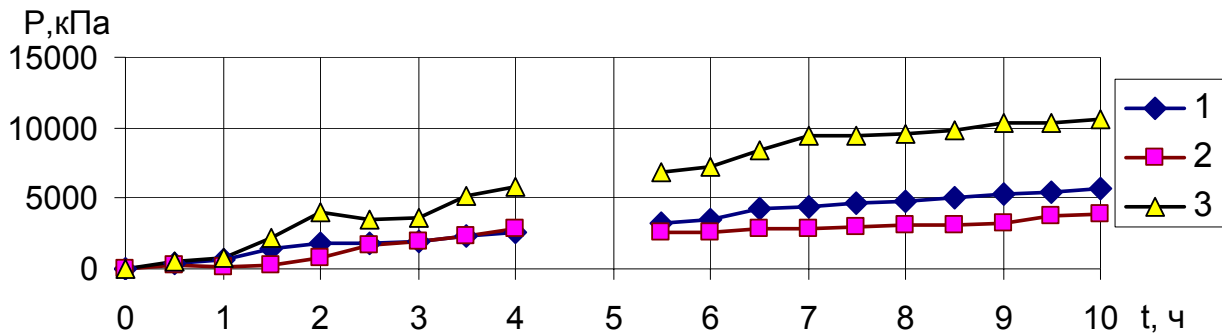
Рисунок 5.21 – Графики вертикальной $U_{\text{верт}}$ (а) и горизонтальной $U_{\text{гор}}$ (б) конвергенции в районе замка крепи со стороны выработанного пространства по трассе выработки при удалении от забоя на расстояние L

Анализ графиков показывает, что абсолютные горизонтальные смещения кровли вдоль трассы выработки увеличиваются по закону близкому к логарифмическому, при этом наклон рам в направлении продольной оси выработки достигает 25 градусов.

Анализ горно-геологических условий показывает, что породы кровли имеют выраженный кливаж, трещины которого наклонены в сторону выработан-

ного пространства под углом 35-75 градусов от горизонтали. Для обрушающихся блоков пород основной кровли кливажные трещины служат естественными плоскостями скольжения. Обрушающиеся породы перемещаются по ним, повышая, таким образом, горизонтальную компоненту напряжений в приконтурной зоне. Со стороны выработанного пространства в штреке величина этих напряжений снижается за счет деформирования рамы крепи и приконтурных пород в направлении вертикальной оси выработки. В боку выработки со стороны массива в заделке зависающей консоли растут напряжения, вызванные ее пространственным изгибом. В том числе происходит разгрузка пород в горизонтальной плоскости, их разуплотнение и, как следствие, горизонтальные сдвиги контура выработки в направлении ее продольной оси. Этим объясняется причина большего наклона рам со стороны массива, чем со стороны выработанного пространства. В пользу выдвинутого предположения говорит тот факт, что в условиях этого же пласта в 3 восточном конвейерном штреке пл. т₃ гор. 915 м при сходных горно-геологических условиях, проведенные замеры конвергенции показали, что явление наклона рам крепи в направлении продольной оси выработки не наблюдается. Анализ горно-геологических условий показал, что кливажные трещины пород основной и непосредственной кровли имели наклон в сторону пласта, преобладающий угол наклона 115-135 градусов, таким образом, обрушающиеся в выработанном пространстве и на границе с ним породы не имели возможности свободно смещаться по плоскостям скольжения в направлении забоя лавы. Также подтверждением выдвинутого предположения является то, что в местах повышенного водопритока наклон рам значительно выше, что объясняется снижением трения по плоскостям кливажных трещин.

Исследования динамики роста давления на стойки и охранное сооружение с помощью динамометров показали, что средний прирост давления на стойку за сутки составляет 7,2 т. Графики роста давления на замерные станции 1 и, 2 и, 3 и приведен на рис. 5.22. Интенсивный прирост давления на стойки наблюдается в течение 1 часа после выемки угля и передвижки секций механизированной крепи.



1, 2, 3 – номера динамометров в экспериментах 1 и, 2 – 2 и, 3 – 3 и соответственно

Рисунок 5.22 – График изменения давления на динамометры, установленные на замерных станциях

Влияние производственных процессов на рост величины давления на стойки наблюдается на участке от забоя лавы до места возведения охранной полосы и имеет затухающий характер. Среднее давление по ряду стоек, оконтуривающих охранную полосу на расстоянии 6 м от забоя, составляет 4,6-4,8 МПа, на расстоянии 10 м от забоя – 8-8,4 МПа. Давление на охранную полосу через 12 часов после ее возведения 0,5-0,53 МПа, через 3 суток – 4,8-5,2 МПа.

Исследования показали, что потеря высоты лавы на участке от забоя до места погашения запасного выхода составляет 33-37%, при этом 15-17% конвергенции реализуется на участке от забоя лавы до охранного сооружения.

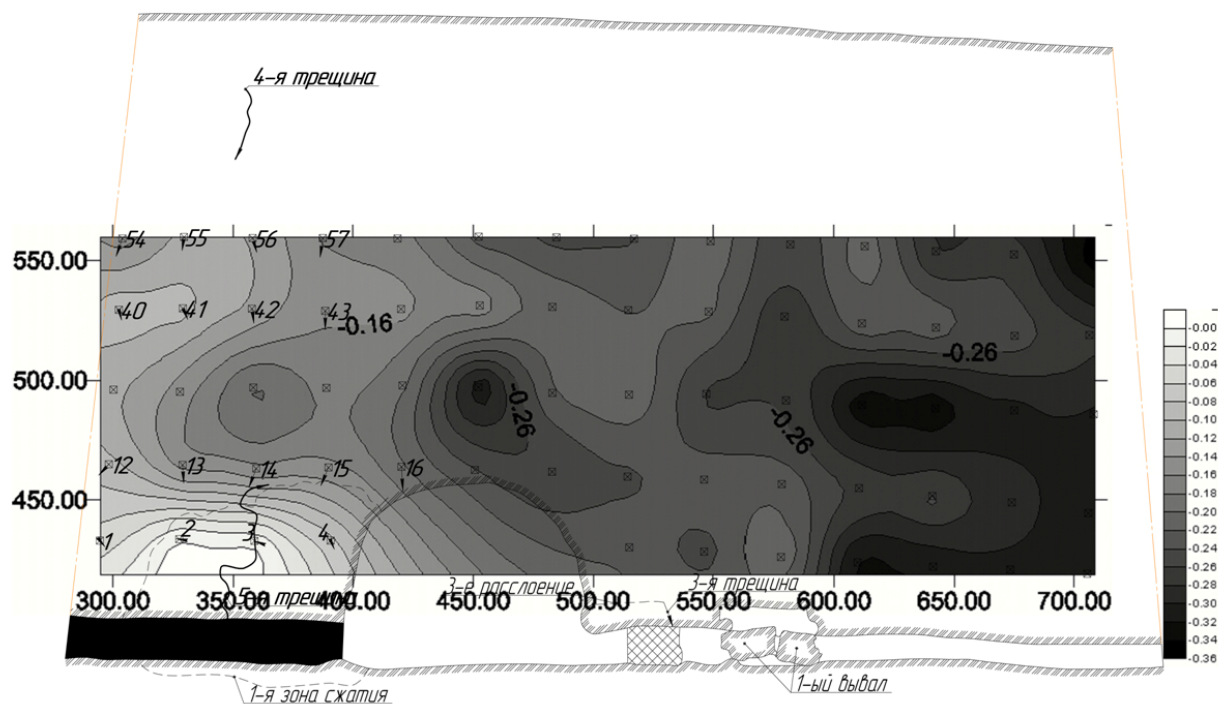
Аналогичные измерения были проведены в условиях 10 восточного конвейерного штрека пласта l_6 . Крепление выработки осуществлялось металлической податливой арочной крепью КМП-А3-11,2. Выемка угля в лаве производилась установкой УСТ-2М. Крепление лавы металлическими стойками трения ТУ-20. Охрана 10 восточного конвейерного штрека осуществлялась деревянными кострами 1,2x1,2 м и 2 рядами тумб БЖБТ. Общая ширина полосы 4,2 м. Общая вертикальная конвергенция на участке сопряжения в районе окна лавы достигала 18-26% от мощности пласта на участке 0-16 м, при этом прирост уменьшается после исчерпания зазоров между верхней плоскостью БЖБТ и кровлей, что характеризует этап вступления полосы в работу.

5.3.2 Лабораторные исследования динамики деформационных процессов и трещинообразования в массиве вокруг выработки, поддерживаемой за лавой

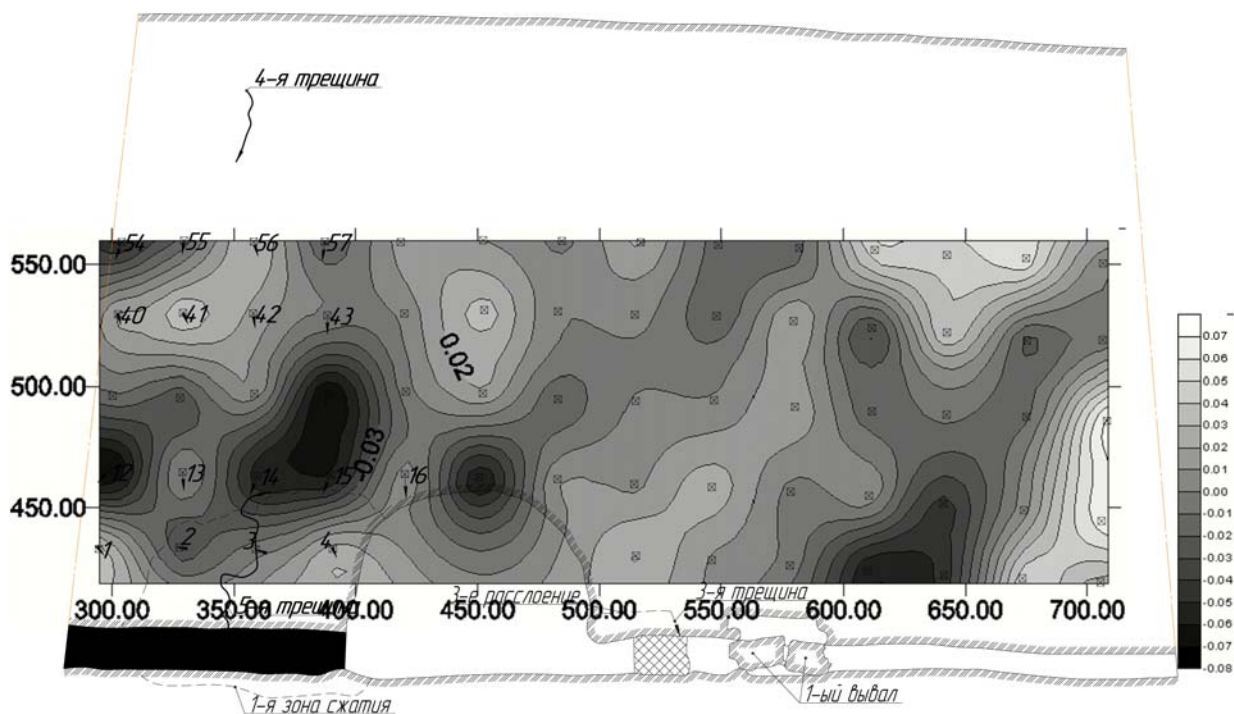
Моделирование проводилось по методике, описанной в п. п. 2.3.2. Горно-геологические условия следующие. Мощность пласта 0,8 м, непосредственная кровля – песчаник с прослоями сланца песчаного мощностью 2 м, крепостью по шкале проф. Протодяконова $f=6-8$. Основная кровля – песчаник мелкозернистый мощностью 10 м, $f=6-9$. Почва – сланец песчаный комковатый, мощностью 0,55 м, $f=4-6$, ниже которого – сланец песчаный плотный мощностью 1,2 м, $f=5-6$. Охранное сооружение состояло из БЖБТ и костров, устанавливалось на расстоянии от контура выработки 1 см и 5,4 см (0,5 м и 2,7 м в натуре). БЖБТ в модели имитировалось при помощи трех элементов размерами 2,0x2,0x1,17 см, полученных закаткой песчано-парафиновой смеси в форму (рис. 2.14). Состав песчано-парафиновой смеси подбирали таким образом, чтобы несущая способность получаемого элемента соответствовала несущей способности БЖБТ в соответствии с масштабом моделирования. Костры в модели имитировались при помощи деревянных брусков размерами 0,2x0,2x2,4 см (0,1x0,1x1,2 м в натуре), которые фиксировались между собой клеем ПВА.

Необходимыми условиями для возникновения трещин является наличие свободной поверхности или ослабленного контакта между слоями и совпадение в одном и том же месте массива средин диапазонов горизонтальных и вертикальных смещений. После анализа результатов моделирования был сформулирован механизм разрушения массива вокруг подготовительной выработки [278]. Основные этапы этого механизма следующие. По мере нагружения происходят незначительные расслоения кровли над охранным сооружением и образование складок со стороны пласта в кровле и почве. Так, на пятом шаге нагружения со стороны пласта две складки сливаются в одну зону сжатия. Хорошо эта зона прослеживается на изолиниях вертикальных смещений над пластом там, где расположена светлая зона, которая указывает на положительные (снизу вверх) вертикальные смещения массива (рис. 5.23 а). Возникают две трещины – 4-я и 5-я (которая за-

тем разрастется и станет магистральной). Причина возникновения 4-й трещины – растягивающие деформации, 5-й – сжимающие.



а)



б)

Рисунок 5.23 – Линии равных вертикальных (а) и горизонтальных (б) смещений на момент возникновения устья магистральной трещины

Появление 5-ой трещины внутри зоны сжатия ведет к ее разделению на две области, горизонтальные смещения в которых происходят обособленно. Это видно на изолиниях горизонтальных смещений (рис. 5.23 б).

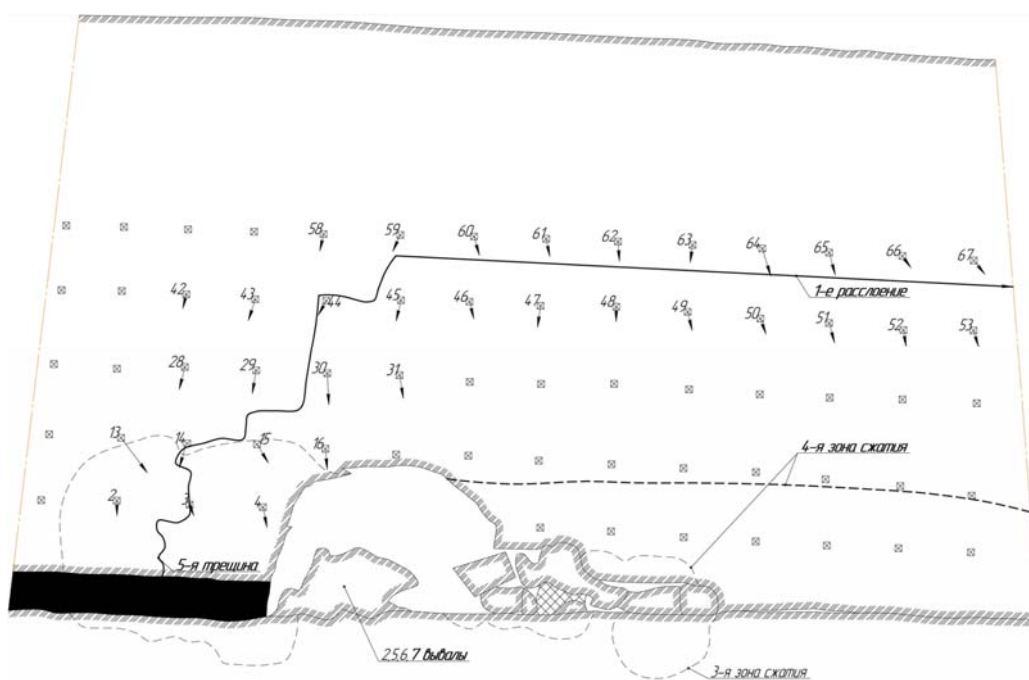
Последующее нагружение приводит к росту магистральной трещины, вывалам и расслоениям кровли со стороны охранного сооружения. На тринадцатом шаге нагружения произошло обрушение консоли основной кровли (рис. 5.24). Анализ результатов позволяет сделать вывод, что рост магистральной трещины происходит над пластом, что приводит к обрушению консоли основной кровли, которая своим весом ложится на охранное сооружение и крепь охраняемой выработки, что вызывает ее деформирование.

5.3.3. Результаты исследования изменения напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг выработок

Исследования влияния жесткости охранного сооружения на напряженно-деформированное состояние массива при зависании основной кровли проводились с помощью МКЭ по методике, описанной в п. 2.2. Моделировалась выработка арочной формы, поддерживаемая за лавой, отрабатывающей пласт угля мощностью 1,5 м на глубине 800 м. Залегание пород условно принято горизонтальным. Непосредственная кровля представлена алевролитом мощностью 2,5 м, прочностью 40 МПа. Основная кровля – песчаник мощностью 6,0 м, прочностью 70 МПа. Породы почвы – аргиллит с прочностью 40 МПа. Согласно описанной структурной колонке пласта для каждого слоя задавались модуль деформации, коэффициент поперечной деформации, угол внутреннего трения, коэффициент сцепления, угол дилатансии. Рассматривалась геомеханическая ситуация, формирующаяся в массиве за лавой после выемки угля и обрушения непосредственной кровли. При этом исходили из предположения, что непосредственная кровля, имеющая относительно невысокую прочность, обрушается без существенных зависаний в выработанном пространстве.



а)



б)

Рисунок 5.24 – Модель (а) и ситуационная картина (б) на момент обрушения консоли основной кровли

Моделировалось НДС пород, вмещающих подготовительную выработку за лавой, в зависимости от типа охранного сооружения. В качестве способа охраны выработки была принята сплошная полоса.

Так как охранные полосы могут иметь различную ширину, усадку и податливость, их интегральным показателем принята удельная жесткость в направлении нормальном напластованию. Эта характеристика позволяет оценивать способность элемента сопротивляться деформации при внешнем воздействии, являясь, по сути, величиной обратной податливости. Удельную жесткость определяли как произведение модуля деформации на единицу площади сечения полосы. В модели предполагалось моментальное вступление в работу охранной полосы с заданным режимом деформирования. Моделируемые способы охраны приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Моделируемые охранные сооружения

№ п/п	Способ охраны	Удельная жесткость полосы, $c_{п}$ ГН
1.	Литая полоса из быстротвердеющих материалов	12
2.	Полоса из БЖБТ с деревянными прокладками	6
3.	Угольный целик (до момента разрушения)	2
4.	Полоса из породных полублоков	1,2
5.	Бутокостры	0,6
6.	Бутовая полоса (пневмозакладка)	0,2
7.	Бутовая полоса (механическая закладка)	0,02

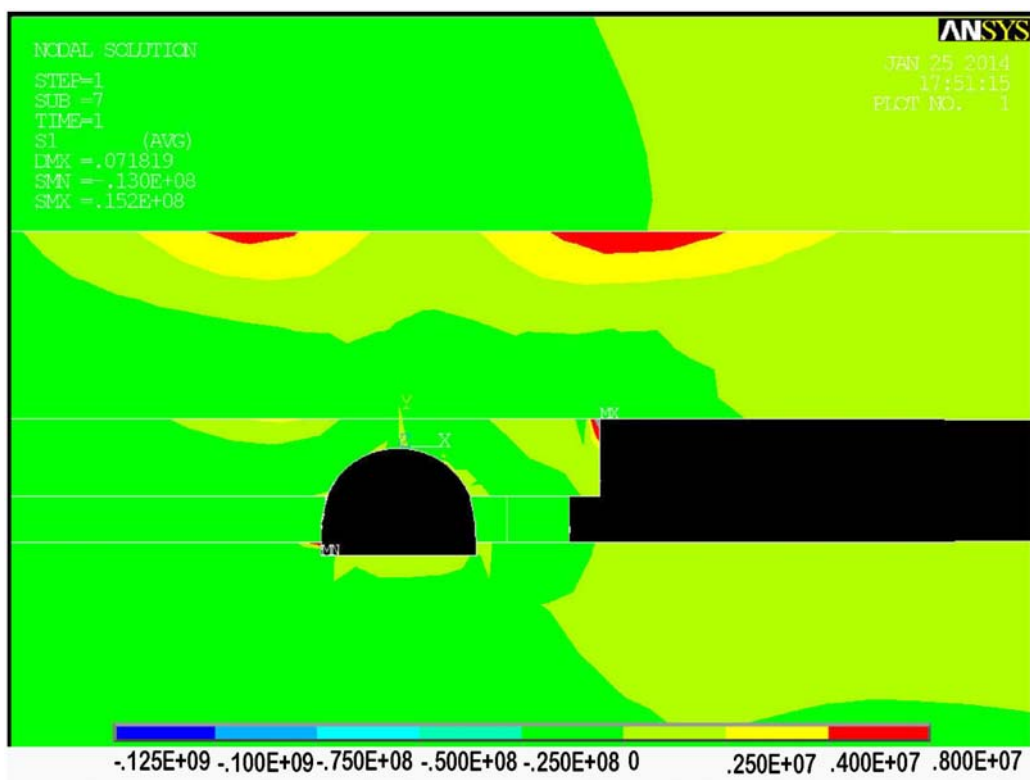
В настоящее время нет единого мнения о наиболее приемлемой теории прочности для горных пород в объемном поле напряжений. Существующие классические теории прочности дают заниженные значения предельных напряжений в 3-8 раз, в зависимости от вида напряженного состояния. При этом предел прочности зависит от соотношений компонент тензора напряжений. Поэтому анализ напряжений вокруг выработки проводился по картинам распределения алгебраически наибольших (растягивающих) главных напряжений – S_1 (I теория прочности),

по эквивалентным напряжениям – SEQV (IV теория прочности или критерий максимальной энергии формоизменения), и по интенсивности напряжений – SINT (теория максимальных касательных напряжений, III теория прочности). Во всех этих гипотезах рассчитанные напряжения необходимо сравнивать с пределом прочности (текучести) при простом растяжении. На рис. 5.25, 5.26 представлены результаты моделирования. Из рисунка 5.25 а видно, что в верхней части основной кровли формируются две области максимальных главных напряжений $S1$ (σ_1) (выделены красным цветом), напряжения в которых достигают предельных. При этом над охраной полосой эта область имеет больший размер и возникающие в ней напряжения больше. Это может свидетельствовать о вероятном месте обрушения консоли над охранной полосой.

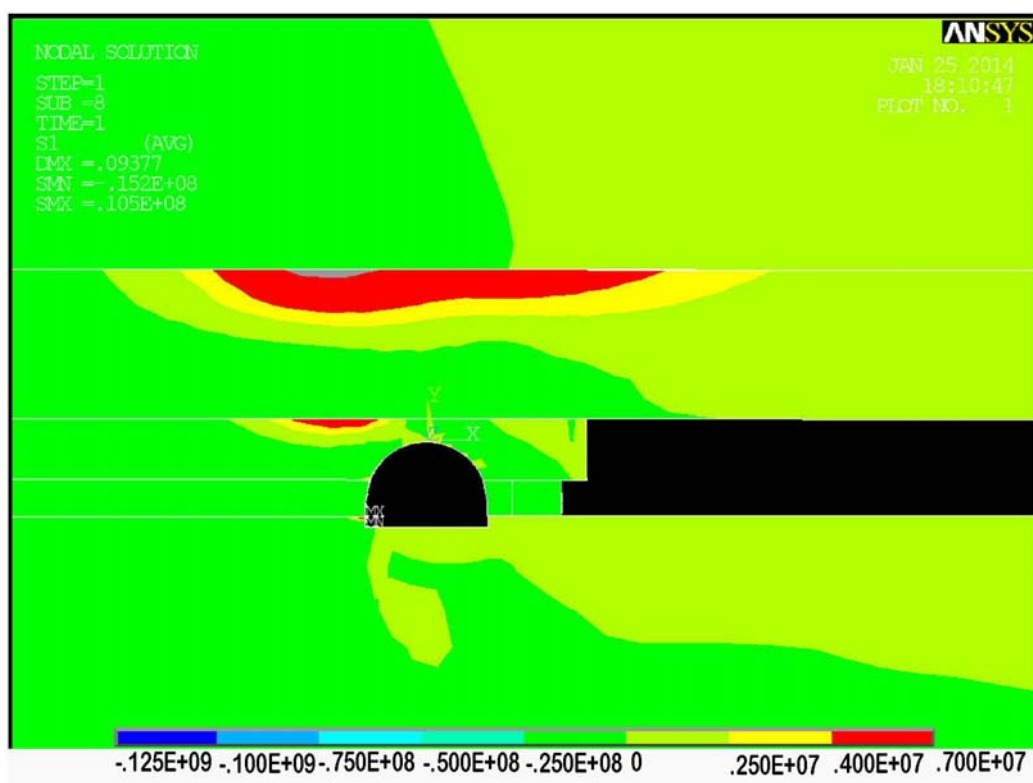
Анализ рисунков 5.25 а, б показывает, что в кровле в тех же местах формируются максимальные напряжения SINT и SEQV, однако абсолютная величина этих напряжений больше над угольным пластом. В области выделенной серым цветом превышение напряжений над предельными, более чем в 2 раза. Это свидетельствует о создании условий для обрушения консоли со стороны пласта.

Изменение жесткости охранного сооружения приводит к смещению области максимальных напряжений в основной кровле, относительно охраняемой подготовительной выработки, что видно из анализа рисунков 5.25 а, б. Так, при охране выработки бутовой полосой, возводимой с помощью пневмозакладки, область максимальных напряжений $S1$ (σ_1) смещается в сторону нетронутого пласта. Запредельные напряжения выделены на рисунке 5.25 б серым цветом.

Для оценки влияния жесткости охранного сооружения на локализацию области максимальных напряжений в основной кровле и, соответственно, вероятное место разрушений кровли, были проанализированы напряжения, формирующиеся в верхней части зависающей консоли основной кровли. Для оценки влияния жесткости охранного сооружения на оказываемое на него и на угольный пласт давление проанализируем напряжения по плоскости контакта с непосредственной кровлей.

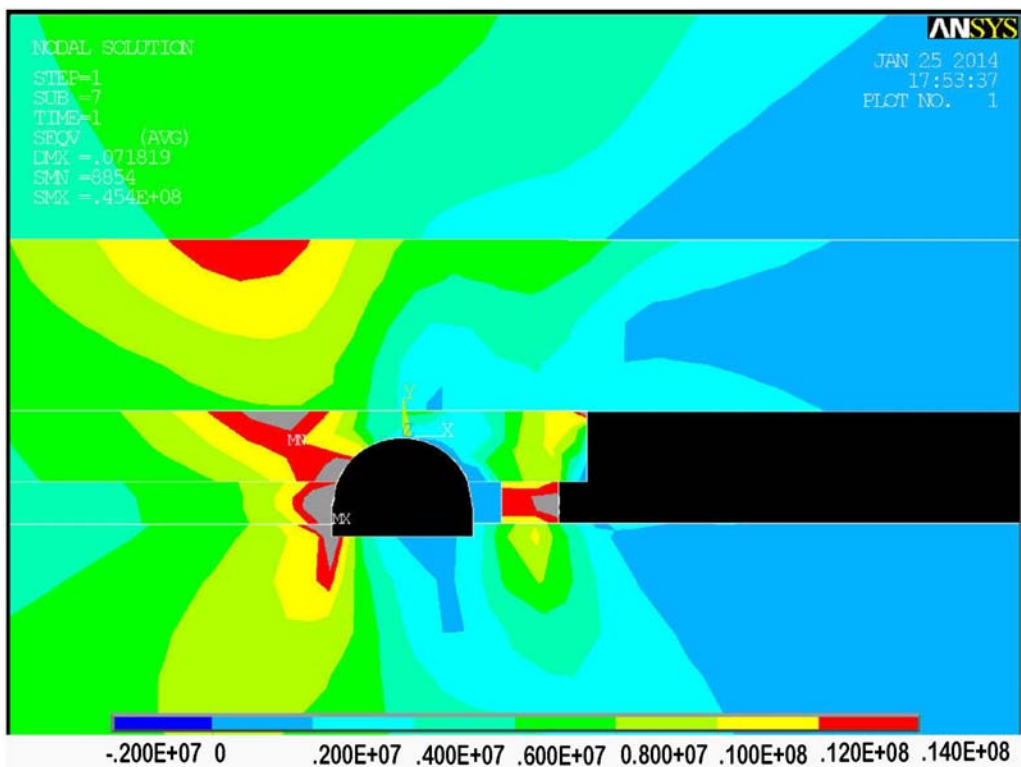


a)

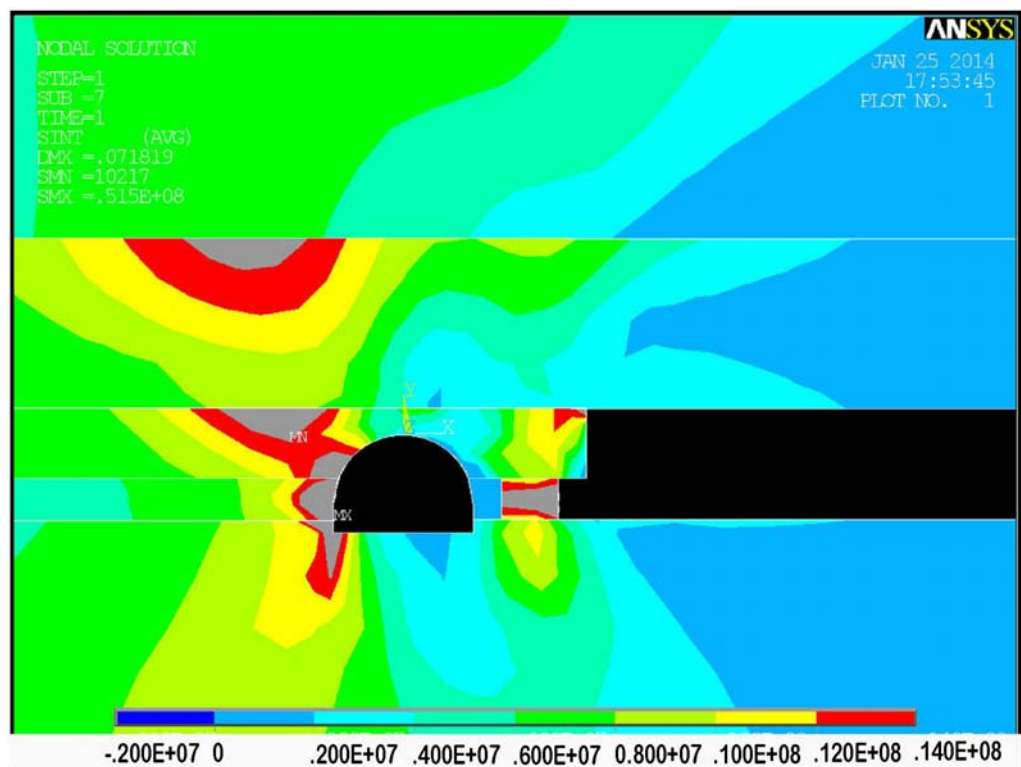


б)

Рисунок 5.25 – Распределение главных напряжений $S1$ (σ_1) вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой при удельной жесткости полосы 2 ГН (а) и 0,2 ГН (б)



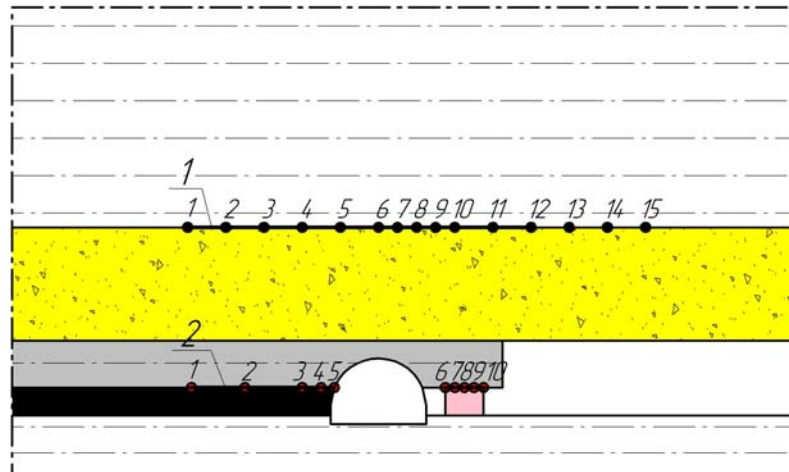
a)



б)

Рисунок 5.26 – Распределение эквивалентных напряжений SEQV (а) и напряжений SINT (б) вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой при удельной жесткости полосы 2 ГН

Точки фиксации напряжений приведены на рисунке 5.27.



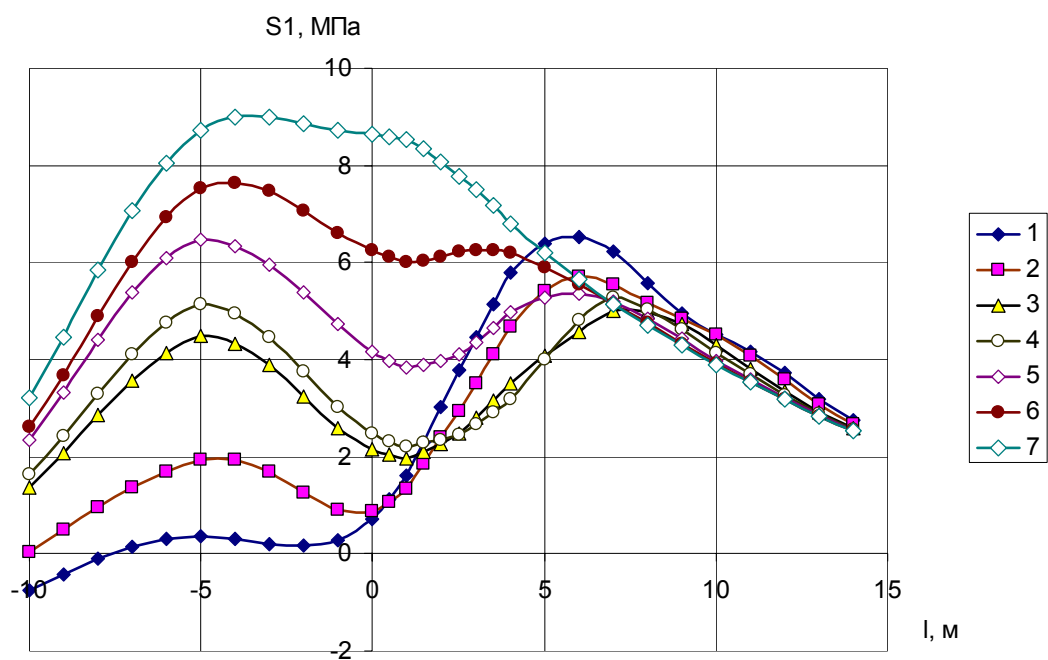
1 – линия в верхней части зависающей консоли основной кровли; 2 – линия по плоскости контакта угольного пласта и охранной полосы с непосредственной кровлей

Рисунок 5.27 – Схема модели с точками фиксации напряжений

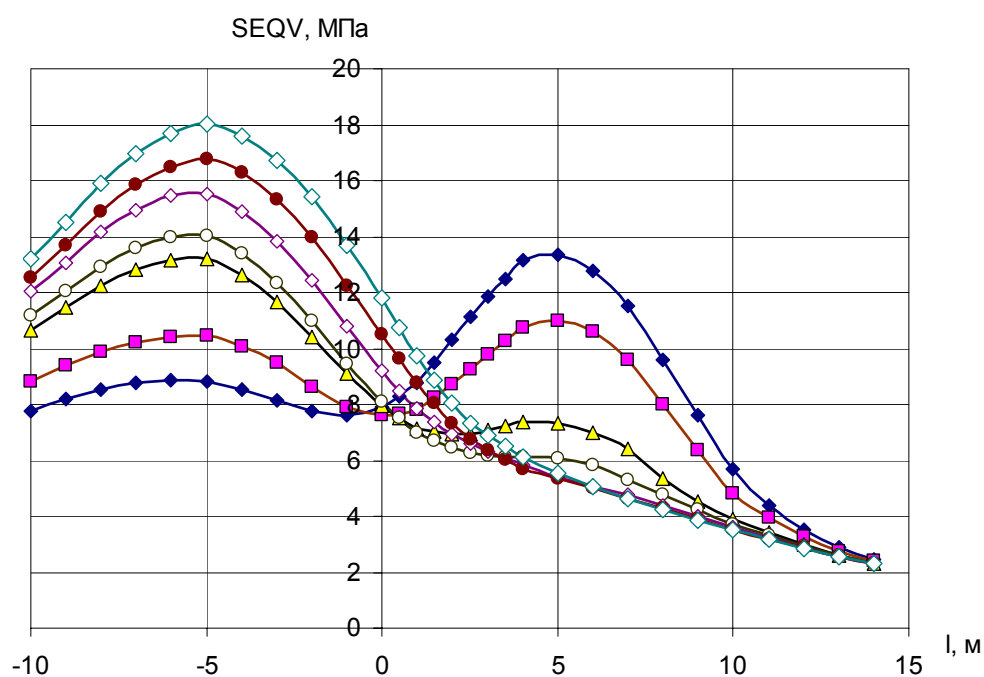
Начало координат на рисунке 5.27 соответствует центру свода арочной крепи. Координаты точек по линии 1 – 1(-10,0;7,0;0,5), 2(-8,0;7,0;0,5), 3(-6,0;7,0;0,5), 4(-4,0;7,0;0,5), 5(-2,0;7,0;0,5), 6(0,0;7,0;0,5), 7(1,0;7,0;0,5), 8(2,0;7,0;0,5), 9(3,0;7,0;0,5), 10(4,0;7,0;0,5), 11(6,0;7,0;0,5), 12(8,0;7,0;0,5), 13(10,0;7,0;0,5), 14(12,0;7,0;0,5), 15(14,0;7,0;0,5). Координаты точек по линии 2 – 1(-10,0;-1,55;0,5), 2(-7,0;-1,55;0,5), 3(-4,0;-1,55;0,5), 4(-4,0;-1,55;0,5), 5(-3,0;-1,55;0,5), 6(-2,32;-1,55;0,5), 7(3,51;-1,55;0,5), 8(4,25;-1,55;0,5), 9(4,75;-1,55;0,5), 10(5,5;-1,55;0,5),

На рисунках 5.28 а, б приведены графики изменения расчетных напряжений $S1 (\sigma_1)$, и $SEQV$ в модели по линии 1, проведенной посередине верхней грани слоя основной кровли. Ось ординат на графике соответствует поперечной оси сечения охраняемой выработки. Положительное направление оси абсцисс совпадает с направлением от выработки на выработанное пространство лавы.

Из рисунков видно, что в кровле формируются две области максимальных напряжений ($S1 (\sigma_1)$ и $SEQV$). Место экстремума над охранной полосой (точка 11 см. рис. 5.27, горизонтальная координата 6 рис. 5.28 а, б) и над пластом (между точками 3 и 4 см. рис. 5.27, горизонтальная координата – 5 рис. 5.28 а, б).



а)

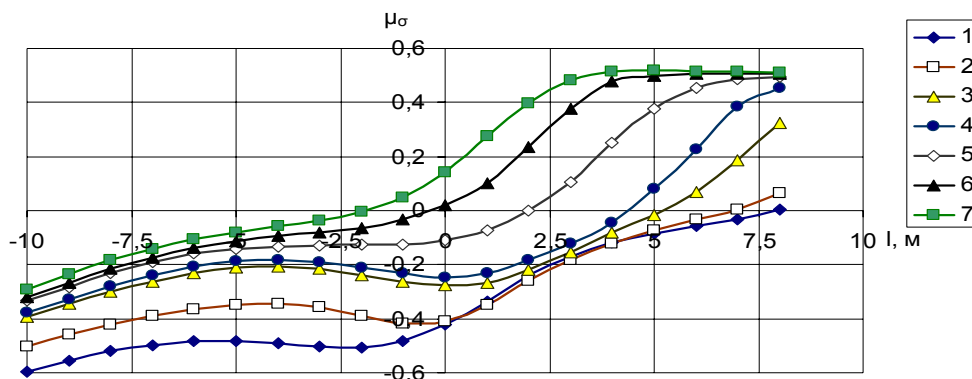


б)

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – жесткость охранной полосы 12 ГН, 6 ГН, 2 ГН, 1,2 ГН, 0,6 ГН, 0,2 ГН, 0,02 ГН соответственно

Рисунок 5.28 – Расчетные напряжения $S1$ (σ_1) (а) и $SEQV$ (б) по линии 1 (см. рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли

Сравнение показывает, что с точки зрения первой теории прочности (рис. 5.28 а) равновероятно разрушение и над охранной полосой, и над пластом при жесткости полосы 1,2 ГН, так как максимальные растягивающие напряжения одинаковы и составляют 5,15 МПа. С позиций энергетической теории прочности (рис. 5.28 б) равновероятно разрушение над охранном сооружением и пластом при жесткости полосы около 4 ГН, максимальные эквивалентные напряжения около 10,5 МПа. Поскольку породы находятся в объемном поле напряжений, для выбора более подходящей теории прочности для дальнейшего анализа, проанализируем графики зависимости параметра напряженного состояния Лоде-Надаи μ_σ для основной кровли по линии 1 (рис. 5.29) и в точках максимумов напряжений (рис. 5.30) от жесткости охранной полосы.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – жесткость охранной полосы 12 ГН, 6 ГН, 2 ГН, 1,2 ГН, 0,6 ГН, 0,2 ГН, 0,02 ГН соответственно

Рисунок 5.29 – Зависимость вида напряженного состояния μ_σ в основной кровле по линии 1 (см. рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли, при длине консоли 30 м от жесткости охранной полосы

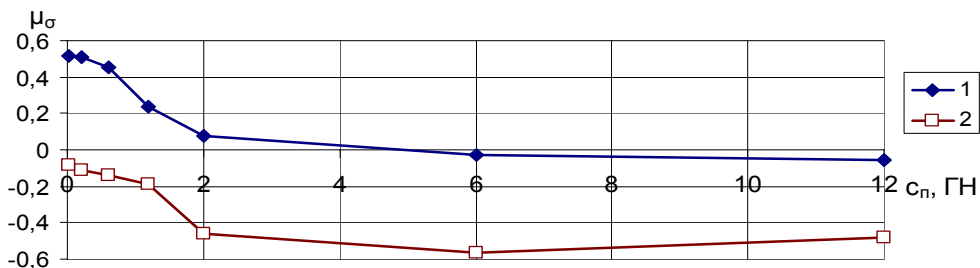


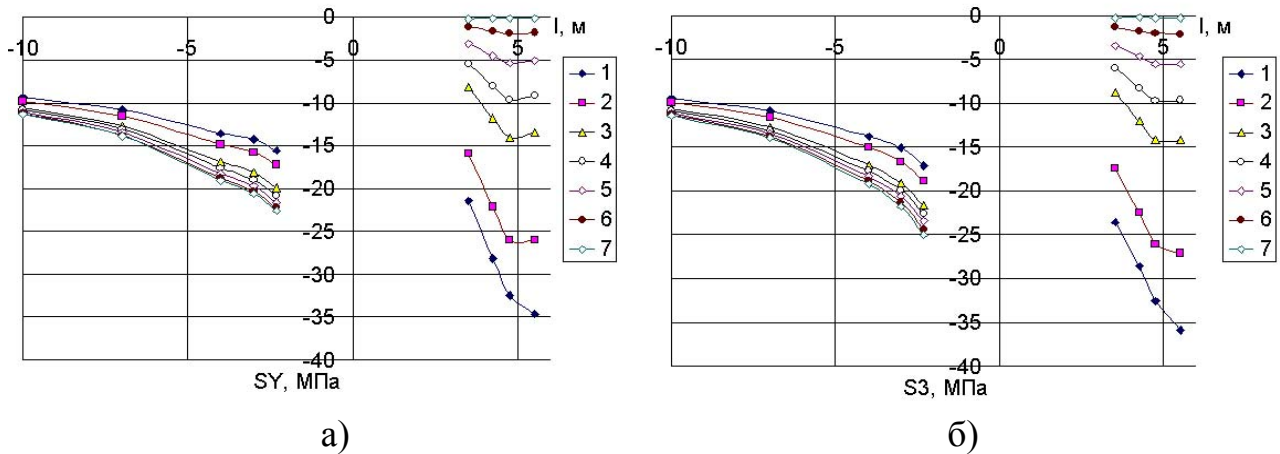
Рисунок 5.30 – Зависимость вида напряженного состояния μ_σ в точках 11 (1) и между точками 3 и 4 (2) по линии 1 (см. рис.27) от жесткости охранной полосы c_n

Известно, что наименее энергоемкий вид объемного напряженного состояния «обобщенный сдвиг» [342]. Из графиков видно, что породы основной кровли в области максимальных напряжений над охранной полосой (точка 11 см. рис. 5.27), при жесткости полосы от 12 до 2 ГН, находятся в состоянии, близком к обобщенному сдвигу; уменьшение жесткости полосы менее 2 ГН приводит к переходу напряженного состояния ближе к обобщенному растяжению, которое является наиболее энергоемким для разрушения. В тоже время область пород основной кровли над пластом (между точками 3 и 4 см. рис. 5.27) при жесткости полосы от 12 до 2 ГН находятся в состоянии между обобщенным сжатием и обобщенным сдвигом, а снижение жесткости менее 2 ГН приводит к приближению напряженного состояния к обобщенному сдвигу. Из рисунка 5.30 можно сделать вывод, что при возникновении одинаковых напряжений в областях максимумов, при диапазоне жесткости полосы 12-2 ГН, более вероятно обрушение над охранной полосой. Учитывая соотношение компонент тензора в области максимальных напряжений в основной кровле и механизм обрушения консоли, а также то, что предел прочности горных пород на растяжение меньше предела прочности на сжатие примерно на порядок, примем в качестве критерия для дальнейшего анализа первую теорию прочности.

Таким образом, для рассмотренного случая можно сделать вывод, что при жесткости охранной полосы от 12 до 2 ГН область максимальных напряжений формируется в породах основной кровли над охранным сооружением в верхней части зависающей породной консоли (точка 11 см. рис. 5.27), при этом породы в области максимума находятся в состоянии обобщенного сдвига. Образование области максимальных напряжений обусловлено изгибом основной кровли в выработанном пространстве после выемки угля. Вероятно первичное разрушение пород основной кровли именно в этом месте. Это обеспечит обрушение зависающей основной кровли в выработанное пространство, что приведет к снижению нагрузки на охранную полосу и контур охраняемой подготовительной выработки и позволит обеспечить дальнейшую устойчивость выработки. При жесткости полосы от 2 ГН до 1,2 ГН возникновение первичного разрушения равновероятно и над

охранным сооружением и над пластом и будет определяться структурным строением пород. При жесткости полосы менее 1,2 ГН область максимальных напряжений формируется в породах основной кровли над пластом в верхней части зависающей породной консоли (между точками 3 и 4 см. рис. 5.27). Породы также находятся в состоянии близком к обобщенному сдвигу. Вероятно первичное разрушение пород основной кровли над пластом. После обрушения основной кровли в этом случае вес породной консоли частично ляжет на приконтурные породы и охранное сооружение, что вызовет асимметричное нагружение крепи подготовительной выработки и ее деформирование. Дальнейшее развитие геомеханических процессов вокруг выработки приведет к потере устойчивости охраняемой выработки. Очевидно, что полученные результаты определяются не только жесткостью полосы c_n , но и жесткостью угольного пласта c_y , которая может колебаться, поэтому более верно делать выводы не по абсолютным величинам жесткости охранной полосы, а по ее отношению к жесткости угля. В решаемой задаче жесткость угольного пласта составляла 2,0 ГН. Таким образом, полученные результаты можно свести к выводу, что при жесткости полосы больше чем угольного пласта $c_n / c_y > 1$ (при модуле деформации материала полосы выше модуля деформации угля) разрушение основной кровли будет происходить над охранной полосой, что позволит сохранить устойчивость выработки. В случае, когда жесткость полосы ниже жесткости угля $c_n / c_y < 1$ (при модуле деформации материала полосы ниже модуля деформации угля) разрушение происходит над угольным пластом, что приводит к значительной потере сечения выработки. А при одинаковой жесткости угля и охранной полосы возникновение разрушения равновероятно над охранным сооружением и над пластом и будет определяться структурным строением пород. Это предположение было подтверждено соответствующими расчетами МКЭ.

Для оценки зависимости давления на охранное сооружение и угольный пласт от жесткости полосы проанализируем вертикальную составляющую тензора напряжений SY в модели по линии контакта с непосредственной кровлей (линия 2 см. рис. 5.27). На рис. 5.31 ось ординат соответствует поперечной оси сечения охраняемой выработки.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – жесткость охранной полосы 12 ГН, 6 ГН, 2 ГН, 1,2 ГН, 0,6 ГН, 0,2 ГН, 0,02 ГН соответственно

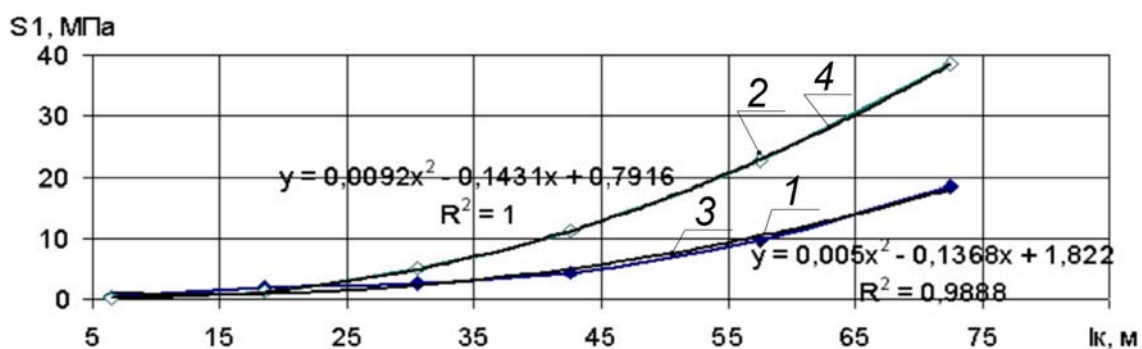
Рисунок 5.31 – Зависимость расчетных напряжений S_Y (а) и S_3 (σ_3) (б) по линии 2 (см. рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя угля и охранной полосы от жесткости полосы

Из рисунка 5.31 а можно сделать вывод, что охранная полоса нагружается неравномерно. Давление со стороны выработанного пространства больше, чем давление со стороны выработки до 1,5-1,6 раз. При этом с понижением жесткости полосы давление на нее по площади выравнивается. Видно, что при жесткости полосы 12-6 ГН давление на полосу в 2,2- 1,5 раза больше, чем на угольный пласт, то есть охранная полоса удерживает большую часть нагрузки от изгиба консоли основной кровли.

При жесткости около 2 ГН контактное вертикальное давление на пласт и на охранное сооружение примерно одинаково, и работа их происходит в одинаковом режиме. А при жесткости полосы менее 1,2 ГН давление на пласт в 2 и более раза больше чем на полосу. Таким образом, можно сделать вывод, что с точки зрения совместной работы полосы и угольного пласта как элементов одной системы наиболее оптимальная жесткость охранной полосы в диапазоне 6-2 ГН. Поскольку охранное сооружение в рассматриваемом случае работает на одноосное сжатие, проанализируем минимальные (в алгебраическом смысле) главные напряжения S_3 (σ_3) в полосе (рис. 5.31 б) при различной ее жесткости, чтобы опре-

делить необходимый предел прочности ее материала. Из рисунка 5.31 б можно сделать вывод, что необходимый предел прочности на одноосное сжатие при жесткости полосы 12 ГН должен составлять не менее 37 МПа, при жесткости 6 ГН – не менее 27 МПа, при жесткости 2 ГН не менее 15 МПа. При дальнейшем снижении жесткости полосы достаточна весьма незначительная прочность материала (менее 10 МПа). Также можно сделать вывод, что угольный пласт в приконтурной зоне при жесткости полосы менее 6 ГН на расстоянии до 2-4 м будет разрушен, по причине превышения напряжениями предела мгновенной прочности угля на одноосное сжатие.

Одним из важнейших факторов, определяющих напряжения в кровле и область их максимума является длина зависающей консоли. Исследования, аналогичные описанным выше, были проведены для длин зависающей консоли 6, 18, 42, 57, 72 м. Результаты анализа в виде графиков зависимости напряжений S_1 (σ_1), SEQV, SY от жесткости охранной полосы приведены в приложении Д. Результаты расчетов напряжений по линии 1 при жесткости полосы 0,02; 0,2; 0,6; 1,2; 6; 12 ГН и разной длине консоли приведены в виде графиков в приложении Ж. На рис. 5.32 приведены графики зависимости напряжений, рассчитанных в характерных точках, от длины зависающей консоли основной кровли.



1, 2 – результаты расчета в точках 5, и 12 (см. рис. 5.27) соответственно; 3, 4 – линии аппроксимации результатов расчета в указанных точках

Рисунок 5.32 – Графики зависимости напряжений S_1 (σ_1) по линии 1 (см. рис. 5.27) от длины консоли основной кровли l_k при жесткости охранной полосы 2 ГН

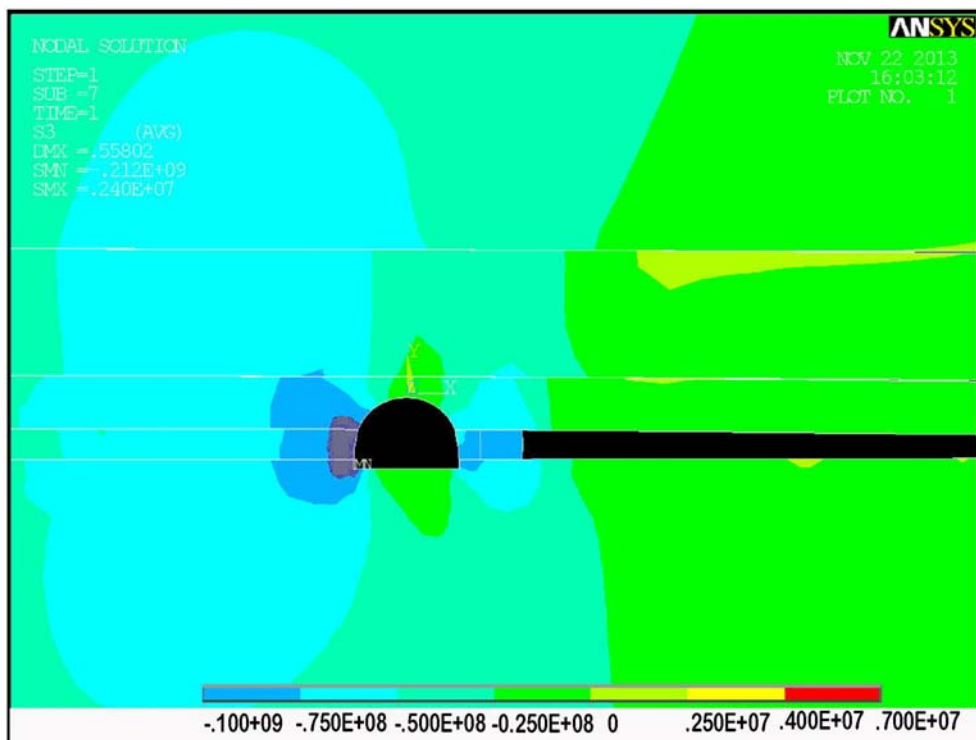
Анализ показывает, что увеличение длины консоли приводит к росту напряжений в основной кровле. Максимальное влияние длины консоли наблюдается на участке между точками 6-12 по линии 1 (см. рис. 5.27), то есть над охраняемой выработкой и охранной полосой, где формируются максимальные напряжения S_1 (σ_1). Это влияние закономерно растет в направлении от выработки к выработанному пространству. Зависимость напряжений S_1 (σ_1) от длины консоли удовлетворительно с коэффициентом корреляции не ниже 0,97 описываются полиномиальным законом. Резерв повышения устойчивости выработки заключается в сокращении длины зависающей породной консоли.

Описанный выше механизм изменения НДС породного массива является, в определенной мере, частным случаем геомеханической ситуации вокруг поддерживаемой за лавой выработки. Другими частными случаями могут быть варианты, в которых непосредственная кровля весьма устойчивая, но менее прочная, чем основная, и обрушается не сразу после выемки, а зависит определенное время. В таком случае перед обрушением основной кровли наблюдается еще один этап – зависание непосредственной. Также возможен частный случай, в котором основная и непосредственная кровли имеют соразмерные прочности, и их разрушения происходят с минимальной разницей во времени.

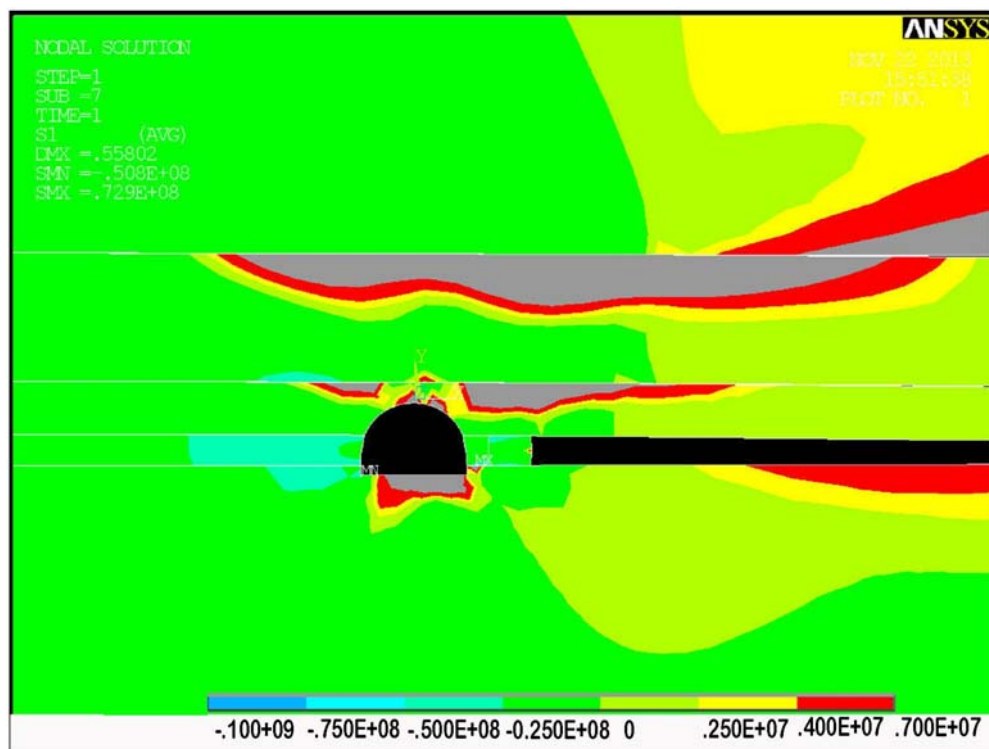
Рассмотрим особенности изменения напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг выработки, поддерживаемой за лавой, при зависании непосредственной кровли. Методика проведения численного моделирования и исходные данные аналогичны описанным выше. В качестве рабочей была принята первая теории прочности. Целесообразность ее применения показана выше. Кроме того, она удовлетворительно описывает поведение хрупких материалов, которыми и являются горные породы, а также позволяет проводить анализ напряжений с учетом их знака, то есть отдельно анализировать зоны растягивающих и сжимающих напряжений, что актуально для решаемой задачи. Так как для горных пород предельные напряжения на растяжение $[\sigma_p]$ и на сжатие $[\sigma_c]$ различны, то условие прочности выражается в виде

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \leq [\sigma_p]; \\ |\sigma_3| \leq [\sigma_c]. \end{array} \right\} \quad (5.6)$$

Предельное состояние определялось по условию (5.6). На приведенных картинах распределения напряжений (рис. 5.33, 5.34) серым цветом изображены зоны, в которых возникающие напряжения больше предельных. При анализе исходили из представлений, что разрушение пород происходит в определенной последовательности по мере возникновения запредельных напряжений, при этом каждое разрушение приводит к изменению поля напряжений. Поэтому моделировалось поэтапное изменение геомеханической ситуации в породах, вмещающих подготовительную выработку за лавой. Первый этап – сразу после выемки угля и возведения охранного сооружения в выработанном пространстве зависят породы непосредственной и основной кровли. На рис. 5.33 изображена геомеханическая ситуация, возникающая при жесткости охранной полосы 2 ГН. Из рисунков видно, что зоны запредельных напряжений σ_3 формируются в боку выработки со стороны нетронутого пласта. Максимальная величина σ_3 в непосредственной кровле со стороны пласта 100 МПа, что в 2,5 раза превышает предел прочности на одноосное сжатие. Зоны запредельных напряжений σ_1 формируются над охранным сооружением выше нейтральной оси слоя непосредственной кровли, а также в породах основной кровли. Величина σ_1 в непосредственной кровле над охранным сооружением достигает 20 МПа, что в 5 раз превышает предел прочности на одноосное растяжение пород непосредственной кровли. Поэтому, учитывая близость свободной поверхности, наибольшая вероятность первичного разрушения кровли именно в этом месте [343]. Таким образом, при своевременном возведении охранного сооружения и работе его сразу в заданном режиме, непосредственная кровля обрушается над ним, что приводит к перераспределению напряжений в массиве. Вокруг подготовительной выработки на этом этапе уже развита ЗРП размерами 1,3-2 радиуса выработки (R) в кровле и почве и 2,3R в боку выработки.

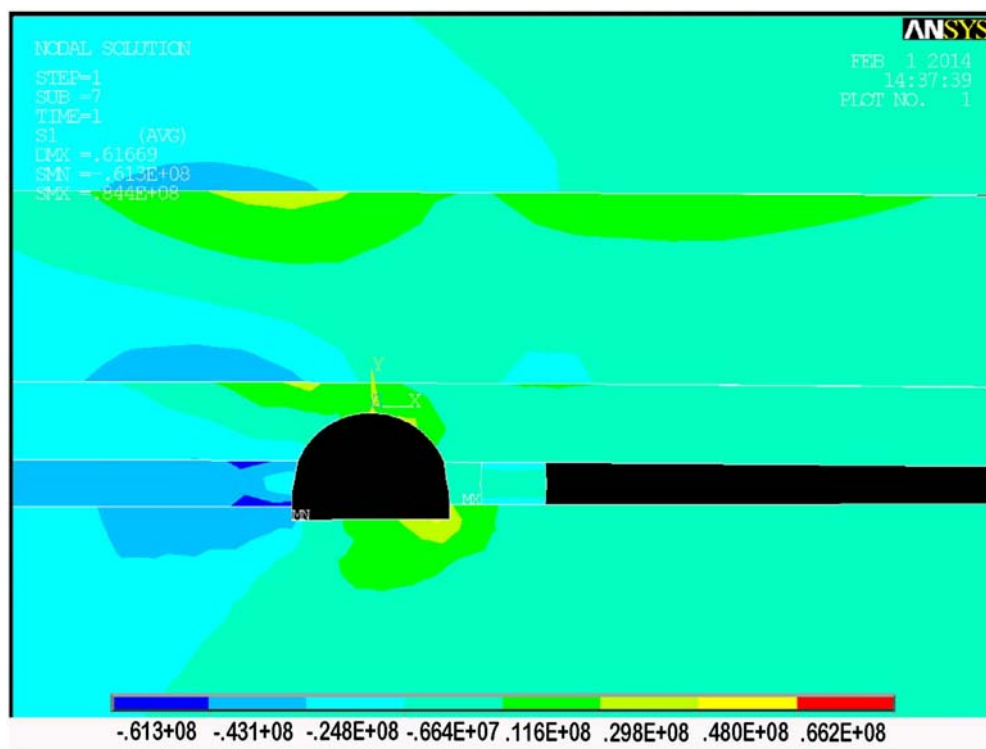


а)

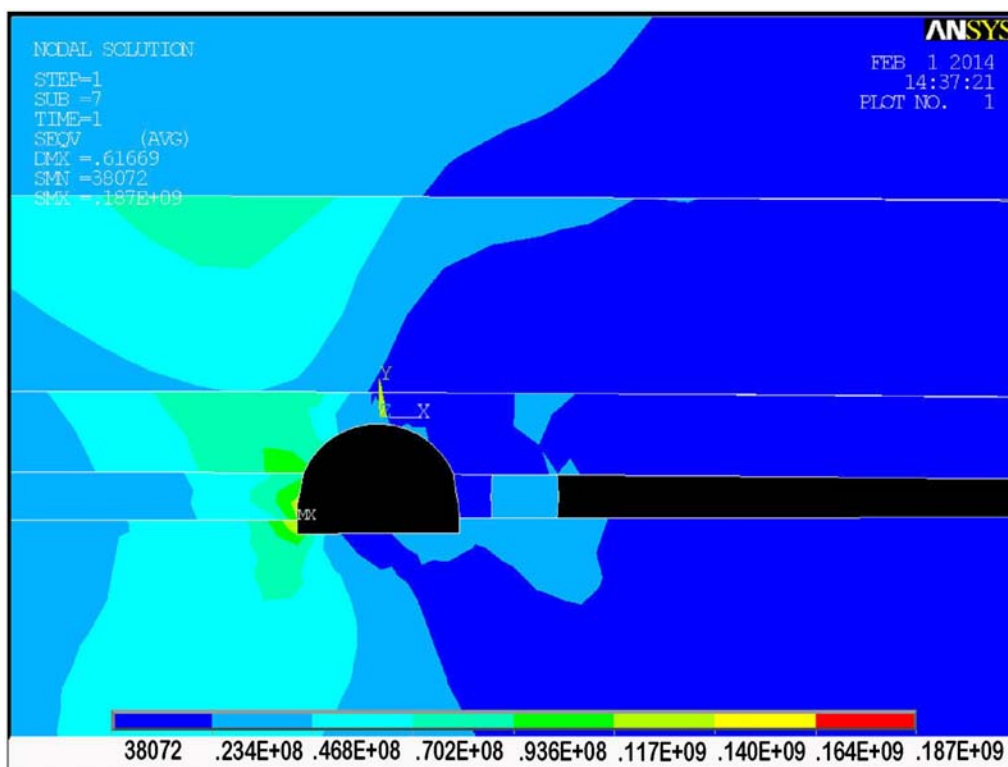


б)

Рисунок 5.33 – Распределение главных напряжений σ_3 (а) и σ_1 (б) вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой (этап 1) при жесткости охранной полосы 2 ГН



a)

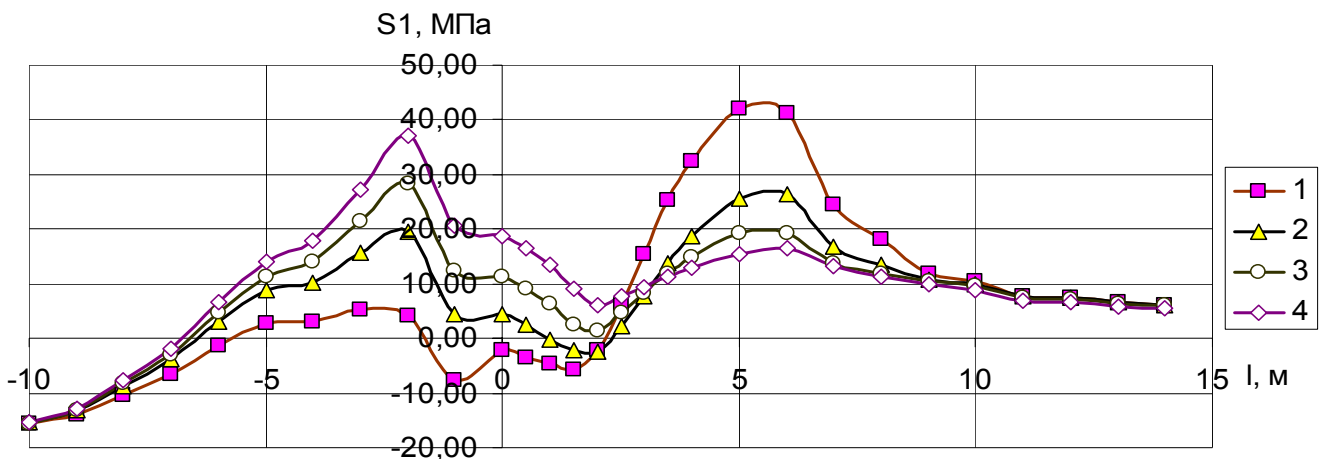


б)

Рисунок 5.34 – Распределение главных напряжений σ_1 (а) и эквивалентных напряжений SEQV (б) вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой при жесткости охранной полосы 0,6 ГН

На рис. 5.34 приведены изополя напряжений в массиве при жесткости охранной полосы 0,6 ГН. Из рисунков видно, что зоны максимальных напряжений σ_1 и SEQV в непосредственной кровле ориентированы со стороны нетронутого пласта. При этом зона запредельных напряжений σ_1 формируется над пластом выше нейтральной оси слоя непосредственной кровли, а также в породах основной кровли. Величина σ_1 в непосредственной кровле над охраняемым сооружением достигает 40 МПа, что в 10 раз превышает предел прочности на одноосное растяжение пород непосредственной кровли, поэтому, учитывая близость свободной поверхности, наибольшая вероятность первичного разрушения кровли именно в этом месте. Эквивалентные напряжения со стороны пласта 70 МПа, то есть в 17,5 раз больше предельных, что также может свидетельствовать о вероятном первичном разрушении именно в этом месте.

Для оценки влияния жесткости охранного сооружения на градиент и положение экстремума напряжений в непосредственной кровле и, соответственно, вероятное место ее разрушения, анализировались напряжения, формирующиеся в верхней части зависающей консоли непосредственной кровли (рис. 5.35). Горизонтальные координаты точек фиксации напряжений совпадают с координатами точек линии 1, приведенной на рис. 5.27.



1, 2, 3, 4 – жесткость охранной полосы 6 ГН, 2 ГН, 1,2 ГН, 0,6 ГН соответственно

Рисунок 5.35 – Расчетные напряжения $S1$ (σ_1) по верхней грани слоя непосредственной кровли

Из графиков, представленных на рис. 5.35, следует, что при жесткости охранной полосы от 6 до 2 ГН область максимальных напряжений формируется в породах кровли над охранным сооружением в верхней части зависающей консоли непосредственной кровли. Образование области максимальных напряжений обусловлено изгибом кровли в выработанном пространстве после выемки угля. Вероятно первичное разрушение пород кровли именно в этом месте. При жесткости полосы менее 2 ГН область максимальных напряжений формируется в породах непосредственной кровли над пластом (в верхней части зависающей породной консоли), где вероятно первичное разрушение пород основной кровли.

Приводя анализ через соотношения жесткостей охранной полосы и угольного пласта, полученные результаты можно свести к выводу, что результаты, по большому счету, совпадают с проведенными выше исследованиями для основной кровли. Таким образом, после обрушения непосредственной кровли основная кровля лишается опоры, что приводит к увеличению ее прогиба в выработанное пространство. При этом, если разрушение непосредственной кровли произошло над охранным сооружением, как на рис. 5.33, то дальнейшее деформирование и разрушение основной кровли будет происходить по механизму, описанному выше. В случае обрушения непосредственной кровли со стороны пласта, как на рис. 5.34, основная кровля, не имея достаточной опоры со стороны выработанного пространства, также разрушается над пластом. Учитывая, что в непосредственной кровле ниже места вероятного разрушения основной кровли, возникающие напряжения значительно превышают предельные, трещины достигнут контура выработки, и обрушенные породы своим весом полностью лягут на крепь, что приведет к ее деформированию.

5.3.4 Разработка и исследование способов управления напряженно-деформированным состоянием породного массива вокруг выработок, поддерживаемых за лавой

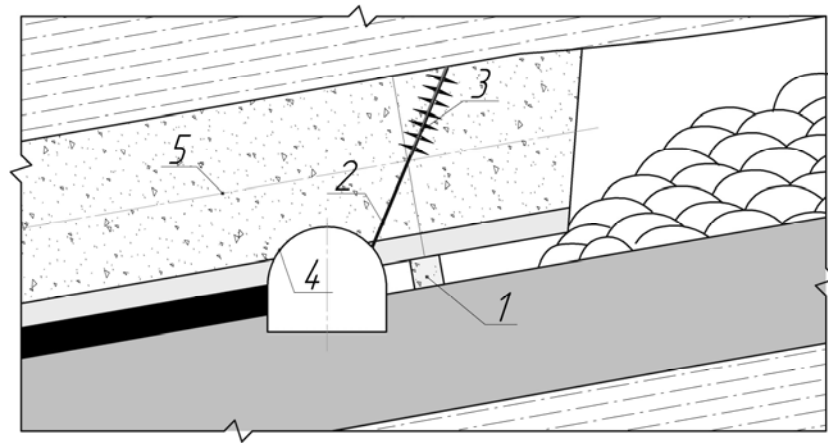
Из проведенных исследований следует, что чем длинней консоль основной кровли со стороны выработанного пространства, тем большие напряжения

возникают в массиве и тем больше нагрузка на крепь штрека и ее деформирование при обрушении консоли. Возникающие напряжения вблизи контура выработки значительно превышают несущую способность арочных крепей, поэтому противостоять разрушению пород и их деформациям в полость выработки традиционным способом весьма сложно.

В проведенных расчетах предполагалось, что охранная полоса вступает в работу мгновенно и сразу деформируется в заданном режиме, что позволило определить минимально необходимую жесткость полосы с позиций разрушения основной кровли над ней. На самом деле охранная полоса возводится с некоторым отставанием от забоя, вступает в работу не сразу после возведения, а после исчерпания зазоров и податливости между полосой и кровлей. Жесткость полосы не является константой, а изменяется во времени и по мере деформирования кровли. Основная кровля, таким образом, не имеет опоры сразу после выемки пласта, что приводит к ее изгибу в выработанное пространство и смещению области максимальных напряжений в сторону нетронутого пласта даже при высокой жесткости охранной полосы.

Таким образом, основной резерв повышения устойчивости подготовительной выработки, поддерживаемой за очистным забоем, заключается в изменении НДС массива путем предотвращения зависания основной кровли на границе с выработанным пространством, а также управлении временем и местом ее разрушения. При этом минимизация энергозатрат на принудительное обрушение консоли может быть достигнута за счет инициации разрушения в зоне естественных растягивающих напряжений (запредельных главных напряжений σ_1) выше нейтральной оси зависающего слоя пород основной кровли (в районе точки 11 по линии 1 см. рис. 5.27).

Технически предлагаемая идея может быть реализована в способе охраны подготовительных выработок [344] (рис. 5.36).



1 – охранный сооружение; 2 – разгрузочная скважина; 3 – заряд НРС; 4 – подготовительная выработка; 5 – основная кровля; 6 – непосредственная кровля

Рисунок 5.36 – Способ охраны подготовительных выработок, пройденных по пласту [344]

Способ включает возведение охранный сооружения вслед за лавой, бурение скважин из подготовительной выработки, таким образом, чтобы ось скважины проходила через точку, образованную пересечением нейтральной оси зависающего слоя основной кровли и нормали к напластованию, проведенной из центра масс охранный сооружения. Длину скважины определяют из соотношения

$$l_{\text{СКК}} = \left[\left(h_{\text{НК}} + \frac{h_{\text{ОК}}}{2} \right) / \sin \alpha \right] + \left[\frac{h_{\text{ОК}}}{2} / \sin \alpha \right], \text{ м}, \quad (5.7)$$

где $h_{\text{НК}}$ - мощность пород непосредственной кровли пересекаемой скважиной, м;

$h_{\text{ОК}}$ - мощность пород основной кровли, м;

α - угол наклона скважины к плоскости пласта, град.

При этом донную часть скважины заполняют (НРС) на величину

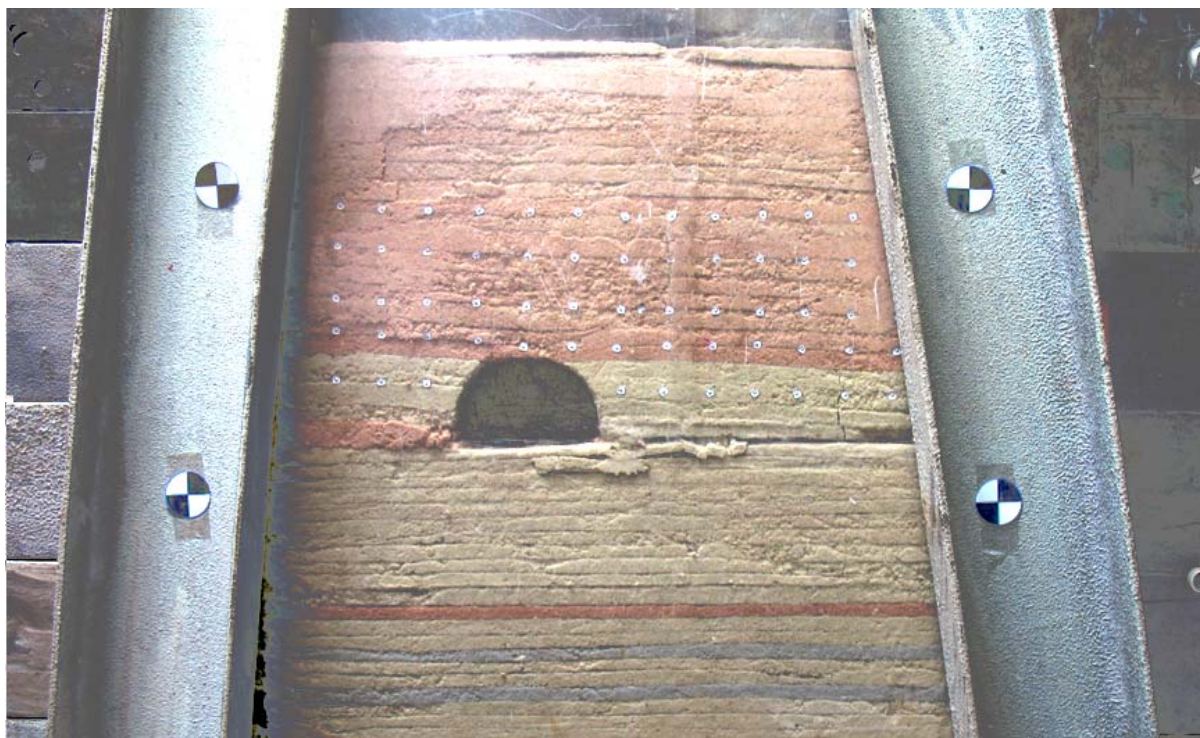
$$l_{\partial} = l_{\text{СКК}} - \left[\left(h_{\text{НК}} + \frac{h_{\text{ОК}}}{2} \right) / \sin \alpha \right], \text{ м}, \quad (5.8)$$

а устьевую ее часть герметизируют.

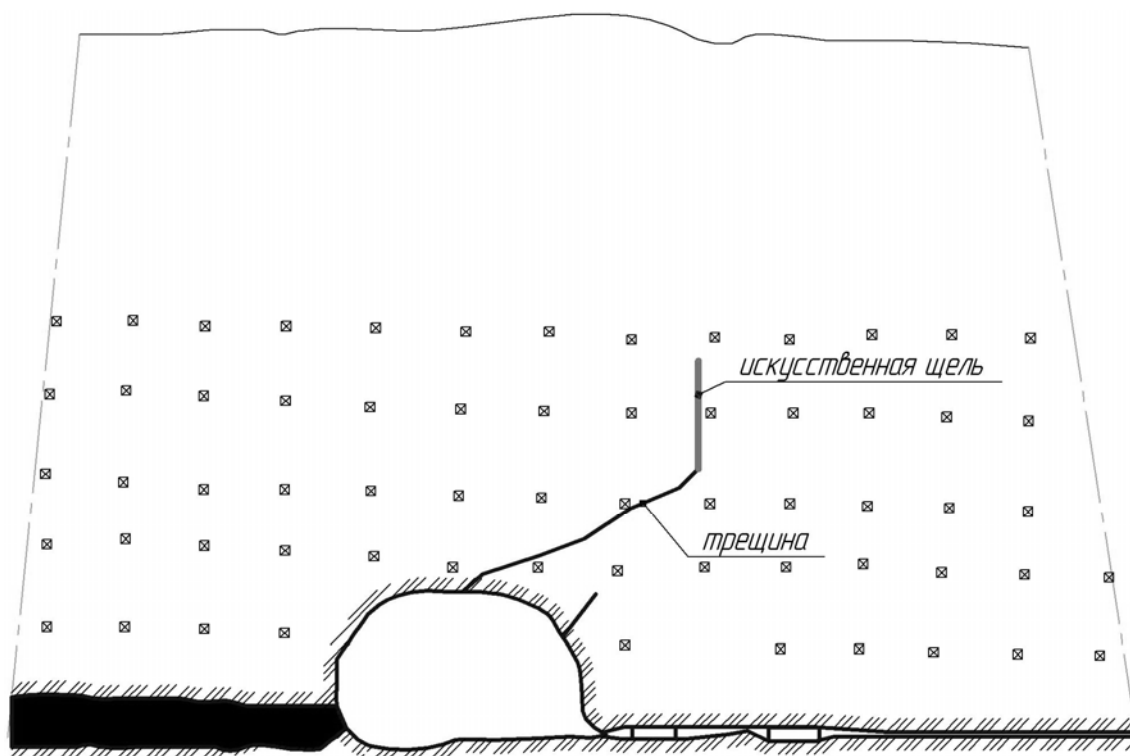
Разрушение зависающих со стороны выработанного пространства пород с помощью НРС не вызывает значительного повышения температуры, динамического воздействия на породы и может применяться в условиях пластов высокой газоносности и выбросоопасности. Ориентация оси скважины таким образом, чтобы она проходила через точку, образованную пересечением нейтральной оси зависающего слоя основной кровли и нормали к напластованию, проведенной из центра масс охранного сооружения, позволяет создать дополнительные растягивающие напряжения в зоне образования естественных растягивающих напряжений выше нейтральной оси изгибающейся зависающей консоли. Это дает возможность минимальными усилиями, с учетом естественных геомеханических деформационных процессов, создать направленное обрушение пород основной кровли и, таким образом, разгрузить охраняемую выработку и повысить ее устойчивость.

Исследование деформирования массива при применении предлагаемого способа охраны выработок проводили методом ЭМ на модели, аналогичной описанной в п. 5.3.2, в которой искусственно создавали щель в основной кровле. Щель имитировала трещину, возникающую между разгрузочными скважинами с НРС. На рис. 5.37 приведены общий вид модели и ситуационная картина на момент обрушения консоли основной кровли.

Анализ результатов моделирования показывает, что на начальных шагах нагружения деформирование моделируемой толщи сходно с деформированием в модели без искусственной щели. На восьмом шаге нагружения с контура выработки со стороны охранного сооружения в направлении искусственной щели прорастает трещина и останавливается на границе с основной кровлей. На девятом шаге нагружения наблюдается возникновение и быстрый рост магистральной трещины, от контура выработки до искусственно созданной щели и обрушение консоли основной кровли над охранными сооружениями с расслоением по 4 ряду реперов и межслоевому контакту. При этом состояние пород кровли и почвы в модели лучше, чем в модели без щели, а вывалов практически нет.



а)

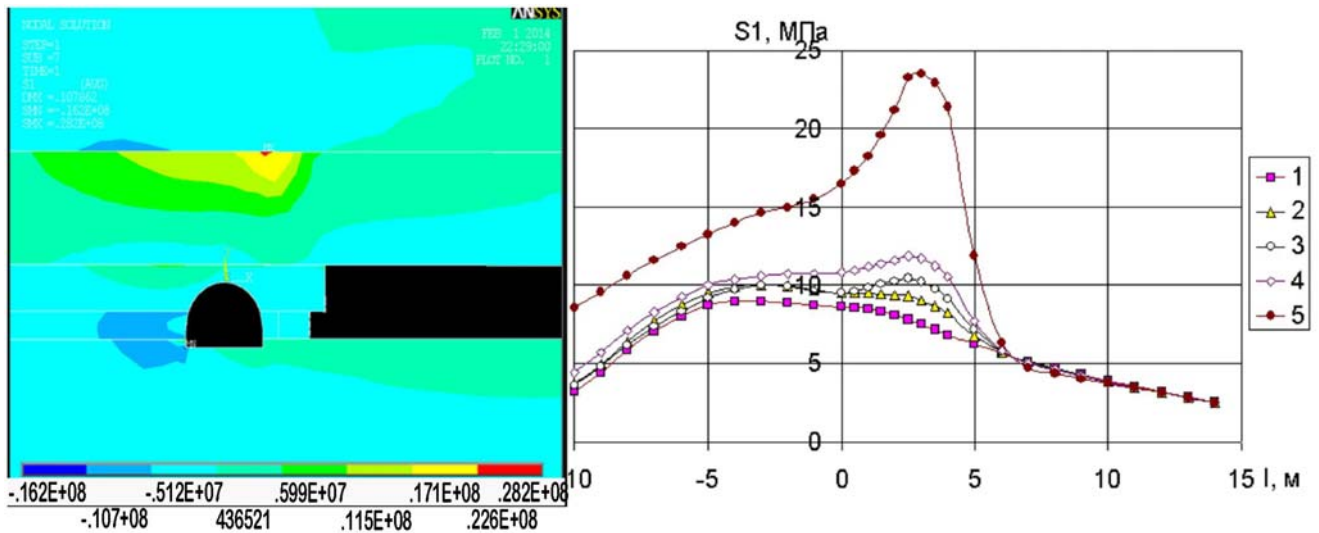


б)

Рисунок 5.37 – Общий вид модели (а) и ситуационная картина (б) на момент обрушения консоли основной кровли

Таким образом, искусственное формирование щели позволяет избавиться от многочисленных расслоений кровли и вывалов над охранном сооружением и в выработку; создать благоприятные условия для возникновения магистральной трещины над охранном сооружением и развития ее в направлении выработанного пространства. Обрушенные породы основной кровли ложатся своим весом на породы непосредственной кровли над выработанным пространством лавы, при этом снижается нагрузка на охранное сооружение и крепь выработки, что приводит к более устойчивому состоянию выработки.

Исследование предложенного способа численным моделированием было проведено по методике, изложенной в п. 5.3.3. Для имитирования заряда НРС в основной кровле на стенки скважины прикладывали распределенную нагрузку. Исследовалось влияние давления расширения НРС на изменение НДС массива при жесткости охранной полосы 0,02, 0,2, 0,6, 1,2 ГН. Исследования, приведенные в разделе 3, показали, что давление НРС в шпуровых и скважинных зарядах может достигать 52 МПа, а при допущении объемных деформаций 5-6% – 30 МПа. Эта величина принималась за максимум. Минимальное значение давление НРС принималось 10% от максимального, то есть 3 МПа, ему равнялось давление на фронте влияния скважины. Из рис. 5.38 а видно, что над охранной полосой в основной кровле формируется область максимальных напряжений σ_1 , в которой максимальные напряжения составляют 28 МПа, что превышает предельные для кровли в 4 раза. В то же время максимум напряжений в основной кровле находится со стороны пласта. Отсюда следует, что даже при жесткости полосы на 2 порядка меньше жесткости угля с помощью разработанного способа можно обеспечить изменение НДС в массиве таким образом, чтобы область максимальных растягивающих напряжений формировалась над охранной полосой, а величина напряжений в районе экстремума существенно превышала предельные. Это обеспечит разрушение основной кровли в заданном месте. Даже при обрушении непосредственной кровли со стороны пласта наиболее вероятно, что основная кровля обрушится над охранной полосой.



1, 2, 3, 4, 5 давление расширения НРС – 0 МПа, 3 МПа, 5 МПа, 8 МПа, 30 МПа соответственно

а)

б)

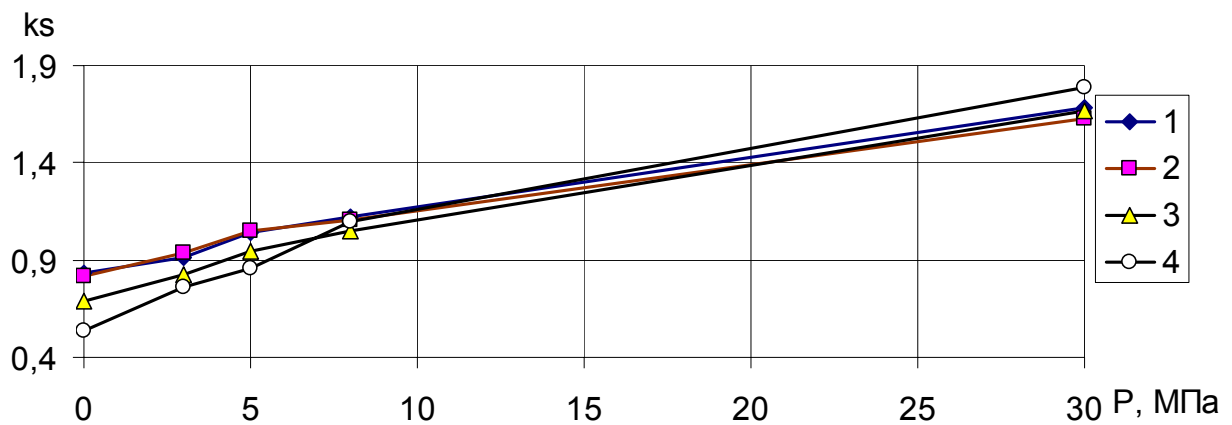
Рисунок 5.38 – Распределение главных напряжений σ_1 вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой, при давлении НРС 30 МПа (а) и расчетные напряжения S_1 (σ_1) по верхней грани слоя основной кровли (б) при жесткости охранной полосы 0,02 ГН

Для оценки влияния давления НРС на локализацию области максимальных напряжений в основной кровле при разной жесткости охранного сооружения проанализируем напряжения, формирующиеся в верхней части зависающей консоли (рис. 5.38 б).

Из графиков рис. 5.38 б следует, что путем создания давления в скважинах с помощью НРС можно существенно изменить НДС пород основной кровли. Так в начальном состоянии без искусственного воздействия главные напряжения S_1 (σ_1) над полосой составляют 7,4 МПа, а со стороны пласта 8,9 МПа, то есть наиболее вероятно разрушение основной кровли со стороны нетронутого пласта. Создание давления в скважинах с помощью НРС приводит к росту растягивающих напряжений в массиве. Так, при давлении 5 МПа напряжения над полосой составляют 10,2 МПа, а со стороны нетронутого пласта 9,76 МПа. То есть над ох-

ранной полосой они выше, чем со стороны пласта, что свидетельствует о создании условий для разрушения основной кровли над охранной полосой. При повышении давления НРС до 30 МПа напряжения над полосой (23,4 МПа) в 1,7 раз выше, чем со стороны пласта (14 МПа).

Для оценки влияния предложенного способа при разной жесткости охранной полосы результаты расчетов представим в виде графиков зависимости отношения k_s максимальных главных напряжений над полосой (σ_{1n}) и над угольным пластом (σ_{1y}) от давления НРС в скважине (рис. 5.39). В случае, когда k_s больше единицы создаются условия для первичного разрушения основной кровли над охранной полосой.



1, 2, 3, 4 – жесткость охранной полосы 0,02 ГН, 0,2 ГН, 0,6 ГН, 1,2 ГН соответственно

Рисунок 5.39 – Графики зависимости отношения k_s максимальных главных напряжений над полосой (σ_{1n}) и над угольным пластом (σ_{1y}) от давления НРС в скважине P

Из графиков следует, что давления НРС 8 МПа, то есть 1,14 предела прочности на растяжение [σ_p] пород основной кровли достаточно для создания условий для ее обрушения над охранной полосой. А при давлении НРС 30 МПа ($4,3[\sigma_p]$) главные напряжения σ_{1n} в 1,6-1,8 раза выше, чем σ_{1y} . По абсолютной величине σ_{1n} составляют 19-24 МПа, что больше [σ_p] основной кровли примерно в 3 раза. Таким образом, предложенный способ охраны подготовительных выработок,

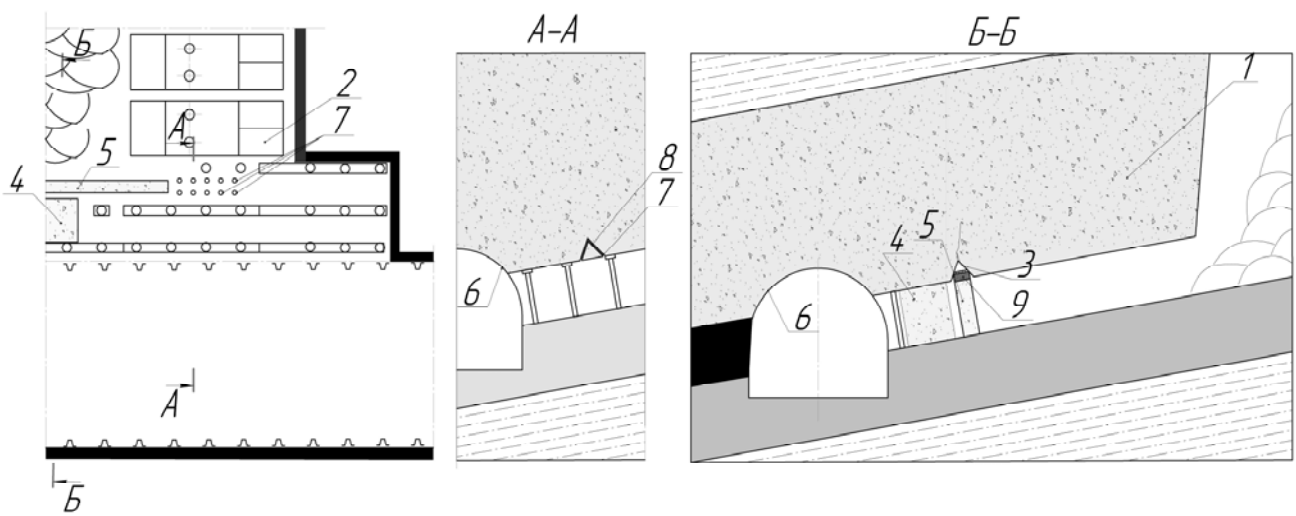
основанный на принудительном обрушении породной консоли, зависающей со стороны выработанного пространства, является эффективным при давлении расширения НРС $1,14[\sigma_p]$. Проведенное численное моделирование указывает на реальную возможность повышения устойчивости выемочных выработок при реализации предложенного способа охраны.

Обрушение основной кровли с помощью скважин основано на формировании условий для разрушения пород при превышении предела прочности на растяжение. Использование описанного выше способа требует применения специального бурильного и нагнетательного оборудования для подачи НРС в скважины и устройств их герметизации.

Вторым направлением формирования условий для обрушения основной кровли со стороны охранной полосы является создание зон опасных напряжений в нижней части основной кровли. Это направление может применяться в тех случаях, когда непосредственная кровля или имеет небольшую мощность, или имеет прочность соразмерную с прочностью основной кровли. Проведенные исследования показали, что давление на охранную полосу неравномерное: со стороны выработанного пространства полоса нагружается больше. Эта особенность была использована при создании способов охраны с режущим элементом.

Реализация этого направления обрушения консоли основной кровли была реализована в способе охраны подготовительной выработки [345]. Он включает возведение вслед за подвиганием секций механизированной крепи на границе с выработанным пространством и охраняемой выработкой охранного сооружения, создание в кровле на границе с выработанным пространством щели перед возведением охранного сооружения и подачу в нее режущих элементов. При этом щель в кровле создают V-образной в поперечном сечении формы, с ориентацией вершины вглубь массива по оси нормальной к напластованию пород. Угол, образуемый боковыми гранями щели, составляет 25-30 градусов, а глубина ее – 0,04-0,06 высоты зависающей породной консоли. После этого создают комбинированное охранное сооружение из опорного и режущего элементов. При этом режущий элемент располагают под щелью и при установке распирают в ее боковые грани, а

опорный элемент относительно режущего располагают со стороны сохраняемой выработки. Целесообразно щель в кровле создавать с помощью НРС, помещенных в предварительно пробуренные шпуров. При этом в качестве опорного элемента охранного сооружения применять литую полосу или полосу из блоков БЖБТ, а в качестве режущего элемента использовать отдельно стоящие охранные конструкции или конструкции в виде сплошной полосы. Распор режущего элемента в щель осуществлять за счет увеличения в объеме НРС, помещенного в контейнер. Сущность способа поясняется рис. 5.40.



1 – породная консоль; 2 – механизированная крепь; 3 – щель; 4 – режущий элемент охранного сооружения; 5 – опорный элемент охранного сооружения; 6 – охраняемая выработка; 7 – шпуров; 8 – патрон с НРС; 9 – контейнер с НРС

а)

б)

в)

Рисунок 5.40 – Способ охраны подготовительной выработки [345]:

а) план участка сопряжения лавы с подготовительной выработкой; б) – поперечный разрез А-А; в) поперечный разрез Б-Б

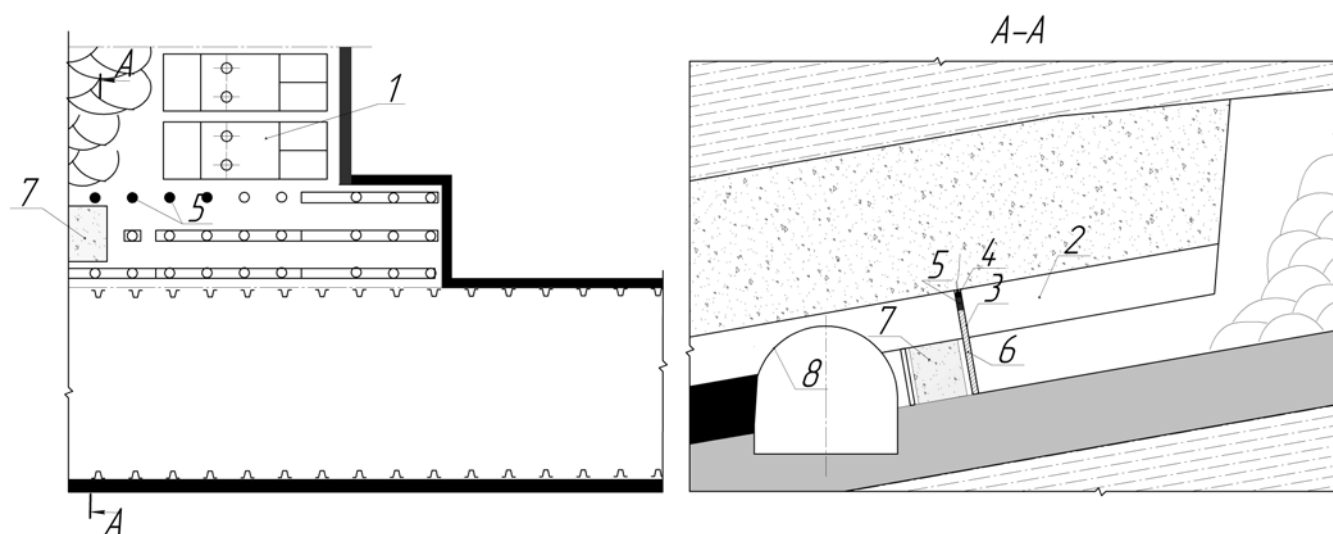
Выполнение щели в кровле V-образной в поперечном сечении формы, с ориентацией вершины вглубь массива по оси нормальной к напластованию пород, позволяет при вдавливании распорного элемента за счет концентрации растягивающих напряжений в вершине щели обеспечить рост магистральной трещины по требуемой линии, что позволит обрушить зависающую породную консоль. Соз-

дание охранного сооружения комбинированным из опорного и режущего элементов, позволяет разделить функции охранного сооружения – обрезания породной консоли и поддержания околоштрековых пород. Это дает возможность обеспечить обрушение зависающей породной консоли активным воздействием режущего элемента, после чего с помощью опорного элемента уменьшенной несущей способности, поддержать породы на границе с выработанным пространством. Использование в качестве режущего элемента отдельно стоящих охранных конструкций или конструкций в виде сплошной полосы, распор которых в щель осуществляется за счет увеличения в объеме невзрывчатого разрушающего материала, помещенного в контейнер, позволяет создать постоянно нарастающее давление до 52 МПа на контур щели. Это приводит к концентрации растягивающих напряжений в ее вершине и позволяет инициировать рост трещины, создать направленное разрушение пород над охранным сооружением и обеспечить устойчивость охраняемой выработки.

Также был разработан способ охраны подготовительных выработок [346], включающий возведение вслед за подвиганием секций механизированной крепи на границе с выработанным пространством и охраняемой выработкой охранный полосы, создание в кровле, на границе с выработанным пространством, полостей перед возведением охранный полосы и подачу в них режущих элементов. При этом полости в кровле создают в виде скважин длиной не менее мощности пород непосредственной кровли и не менее 30% от мощности вынимаемого пласта. Затем в каждую скважину подают режущий элемент и контейнер с НРС длиной 5-10% от мощности пород основной кровли, а между почвой и контейнером с НРС устанавливают жесткую распорную стойку. Целесообразно расстояние между скважинами принимать 0,8-2 м, а при мощности пород непосредственной кровли больше мощности пласта распорную стойку выполнять составной. Сущность способа поясняется на рис. 5.41.

Выполнение полостей в кровле в виде скважин, длиной не менее мощности пород непосредственной кровли, позволяет, за счет подачи режущих элемен-

тов в скважину, воздействовать ими непосредственно на зависающую породную консоль основной кровли, инициировать и поддерживать в ней рост трещины.



1 – механизированная крепь; 2 – кровля; 3 – скважины; 4 – режущие элементы; 5 – контейнеры с НРС; 6 – жесткие распорные стойки; 7 – охранная полоса; 8 – охраняемая подготовительная выработка

а)

б)

Рисунок 5.41 – Способ охраны подготовительных выработок [346]:

а) план участка сопряжения лавы с подготовительной выработкой; б) поперечный разрез по охранному сооружению

Это способствует созданию направленного разрушения кровли над охраняемым сооружением и обеспечению устойчивости охраняемой выработки. При мощности пород непосредственной кровли больше мощности пласта распорную стойку следует выполнять составной.

Выводы по разделу 5

1. Разработана концепция управления НДС массива горных пород, основанная на искусственном изменении компонент напряжений в окрестности проводимой горной выработки за счет принудительного сжатия массива при расширении НРС, помещенных в шпур. Предложена ее техническая реализация в разработанных способах крепления горных выработок [327, 329]. С помощью МКЭ

определена зона влияния шпура с НРС в сплошной среде, что позволяет определять параметры предложенных способов.

2. В результате анализа результатов шахтных наблюдений за сдвижением пород в окрестности ремонтируемой горной выработки установлено:

– в условиях высокой степени дробления пород в пределах ЗРП вектор максимальных смещений ориентирован нормально напластованию пород, зона влияния забоя перекрепления, в которой наблюдаются интенсивные смещения, ограничивается участком около 10 м перед забоем и 6-8 м после забоя. При этом максимальная доля смещений реализуется на участке 4 м перед забоем перекрепления. На участке 2-6 м после установки новой рамы крепи также наблюдаются интенсивные смещения, которые носят затухающий характер, и стабилизируются уже через 10 м после забоя перекрепления;

– в условиях блочно структурированного массива с выраженной кливажной системой движение структурных блоков в направлении полости выработки происходит по плоскостям скольжения в массиве, что приводит к возникновению горизонтальной составляющей сдвижений и, в частности, к наклону рам крепи в направлении продольной оси выработки. При этом до 70% вертикальной конвергенции в зоне влияния забоя перекрепления и 75% наклона рам в направлении продольной оси выработки происходит на участке около 4 м перед забоем перекрепления. При этом угол наклона рам может достигать 45 градусов, а максимальная вертикальная конвергенция 0,68 м.

3. Установлено, что передача давления от заряда НРС вглубь массива, представленного дискретной средой, при нагружении происходит по зависимости близкой к квадратичной. Это объясняется последовательным уплотнением и переупаковкой дискретного материала в направлении от зоны ближней к заряду НРС вглубь массива. Коэффициент передачи давления повышается при увеличении абсолютного значения нагрузки на внутреннем контуре. При разгрузке передача давления от контура зоны влияния к заряду НРС происходит не по пути нагружения, а более полого. Наблюдается запаздывание передачи давления, так в экспериментах рост давления на внешнем контуре модели начинается после дос-

тижения давлением на внутреннем контуре величины 7-10 кПа, а при уменьшении давления на внутреннем контуре, в начале разгрузки модели, на внешнем контуре давление еще продолжает расти. Коэффициент передачи давления и интенсивность его изменения зависят от вида дискретных элементов, их размера, величины абсолютного давления. При этом поэтапные перемещения дискретных элементов, особенно на начальном этапе нагружения, имеют случайный характер и зависят от взаимного положения соседних элементов, хотя результирующий вектор смещений направлен вглубь массива радиально оси шпура.

4. Разработаны способ крепления горных выработок, пройденных в породах, склонных к пучению [334] и способ повышения устойчивости почвы горной выработки [335].

5. Установлен эффект повышения несущей способности разрушенных горных пород, представленных блочно-дискретной средой при их распоре НРС, помещенными в шпуры. Разработаны основанные на этом эффекте способ упрочнения горных пород [336], и способ упрочнения горных пород в процессе поддержания выработки [339]. В результате обработки результатов численного математического моделирования методами математической статистики, получена регрессионная зависимость для определения расстояния между шпурами с НРС, учитывающая давление НРС на стенки шпура, длину шпура, высоту возможного вывала, максимальный удельный вес пород контура выработки и коэффициент трения породы.

6. В результате анализа результатов шахтных наблюдений за сдвижением пород в окрестности выработок сохраняемых за лавой установлено:

– динамика вертикальных и горизонтальных смещений пород кровли штрека, роста нагрузки на охранную полосу и стойки на участке сопряжения штрека с лавой имеет скачкообразный характер, что связано с разрушением массива;

– в выработке, поддерживаемой за лавой, можно выделить две зоны смещений, которые отличаются по скоростям деформаций контура выработки. В условиях проведенных экспериментов первая зона – зона активного проявления гор-

ного давления, заканчивается за лавой на расстоянии 30-60 м. Скорости смещения кровли в этой зоне составляют 13-14 мм/сутки. Вторая зона – зона затухающих деформационных процессов, характеризуется постепенным снижением скоростей смещений кровли в 9-10 раз, по сравнению с первой зоной, после чего они стабилизируются и происходят со скоростью 1-2 мм/сутки. Скорости смещения почвы во второй зоне в 5-6 раз меньше по сравнению с первой зоной, после чего они стабилизируются и происходят со скоростью 2-3 мм/сутки. Общая конвергенция составляет 3-5 мм/сутки;

– в условиях выраженного кливажа пород кровли, при наклоне трещин в сторону выработанного пространства, возрастает горизонтальная компонента смещений вдоль трассы выработки. Ее абсолютная величина увеличивается по закону близкому к логарифмическому. При этом в направлении продольной оси выработки наблюдается наклон рам, который достигает 25 градусов. Угол наклона рам изменяется неравномерно по трассе выработки, что объясняется общими закономерностями развития смещений, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях;

– средний прирост давления на стойку, установленную на участке сопряжения лавы со штреком, за сутки составляет 7,2 т. Интенсивный прирост давления на стойки наблюдается в течение 1 часа после выемки угля и передвижки секций механизированной крепи. Влияние производственных процессов на рост величины давления на стойки наблюдается на участке от забоя лавы до места возведения охранной полосы и имеет затухающий характер. Среднее давление по ряду стоек, оконтуривающих охранную полосу, на расстоянии 6 м от забоя, составляет 4,6-4,8 МПа, на расстоянии 10 м от забоя - 8-8,4 МПа. Давление на охранную полосу через 12 часов после ее возведения 0,5-0,53 МПа, через 3 суток – 4,8-5,2 МПа;

– потеря высоты лавы на участке от забоя до места погашения запасного выхода составляет 33-37%. При этом 15-17% конвергенции реализуется на участке от забоя лавы до охранного сооружения.

7. В результате исследование изменения НДС породного массива вокруг выработок, поддерживаемых за лавой методом численного моделирования, установлено:

– изменение жесткости охранного сооружения приводит к смещению области максимальных напряжений в основной кровле относительно охраняемой подготовительной выработки. При жесткости полосы больше чем угольного пласта $\frac{c_n}{c_y} > 1$ (при модуле деформации материала полосы выше модуля деформации угля) область максимальных напряжений формируется в породах основной кровли над охранным сооружением в верхней части зависающей породной консоли. При этом породы в области максимума находятся в состоянии обобщенного сдвига. Разрушение основной кровли будет происходить над охранный полосой, что позволит сохранить устойчивость выработки. В случае, когда жесткость полосы ниже жесткости угля $\frac{c_n}{c_y} < 1$ (при модуле деформации материала полосы ниже модуля деформации угля) область максимальных напряжений формируется в породах основной кровли над пластом в верхней части зависающей породной консоли. Породы также находятся в состоянии близком к обобщенному сдвигу. Разрушение происходит над угольным пластом, что приводит к значительной потере сечения выработки. При одинаковой жесткости угля и охранной полосы возникновение разрушения равновероятно над охранным сооружением и над пластом определяется структурным строением пород;

– охранный полоса нагружается неравномерно. Давление со стороны выработанного пространства больше, чем давление со стороны выработки до 1,5-1,6 раз. При этом с понижением жесткости полосы давление на нее по площади выравнивается. С точки зрения совместной работы полосы и угольного пласта как элементов одной системы наиболее оптимальная жесткость охранной полосы в диапазоне 6-2 ГН;

– увеличение длины зависающей в выработанном пространстве консоли приводит к росту напряжений в основной кровле. Максимальное влияние длины

консоли наблюдается над охраняемой выработкой и охранной полосой, где формируются максимальные напряжения S_1 (σ_1). Зависимость напряжений S_1 (σ_1) от длины консоли удовлетворительно, с коэффициентом корреляции не ниже 0,97, описываются полиномиальным законом;

– при соразмерных прочностях основной и непосредственной кровель место первичного разрушения последней определяет разрушение в основной кровле. Так после обрушения непосредственной кровли основная кровля лишается опоры, что приводит к увеличению ее прогиба в выработанное пространство. При этом если разрушение непосредственной кровли произошло над охранным сооружением, то дальнейшее деформирование и разрушение основной кровли будет происходить по механизму, описанному выше, а в случае обрушения непосредственной кровли со стороны пласта основная кровля, не имея достаточной опоры со стороны выработанного пространства, также разрушается над пластом.

8. Установлено, что основной резерв повышения устойчивости подготовительной выработки, поддерживаемой за очистным забоем, заключается в изменении НДС массива путем предотвращения зависания основной кровли на границе с выработанным пространством, а также управлении временем и местом ее разрушения. При этом минимизация энергозатрат на принудительное обрушение консоли может быть достигнута за счет инициирования разрушения в зоне естественных растягивающих напряжений выше нейтральной оси зависающего слоя пород основной кровли. Для технической реализации этой идеи разработан способ охраны подготовительных выработок [344].

9. Установлено, с помощью разработанного способа [344] можно обеспечить изменение НДС в массиве таким образом, чтобы область максимальных растягивающих напряжений формировалась над охранной полосой, а величина напряжений существенно превышала предельные. Это обеспечит разрушение основной кровли в заданном месте, даже при жесткости полосы на 2 порядка меньше жесткости угля и при предварительном обрушении непосредственной кровли со стороны пласта. При этом давления НРС 8 МПа, то есть $1,14 [\sigma_p]$ пород основной кровли достаточно для создания условий для ее обрушения над охранной по-

лосой, а при давлении НРС 30 МПа ($4,3[\sigma_p]$) главные напряжения σ_{1n} в 1,6-1,8 раза выше, чем σ_{1y} . По абсолютной величине σ_{1n} составляют 19-24 МПа, что больше $[\sigma_p]$ основной кровли примерно в 3 раза. Таким образом, предложенный способ охраны подготовительных выработок, основанный на принудительном обрушении породной консоли, зависающей со стороны выработанного пространства, является эффективным при давлении расширения НРС $1,14[\sigma_p]$.

10. Установлено, что в условиях, когда непосредственная кровля или имеет небольшую мощность, или имеет прочность соразмеримую с прочностью основной кровли, обрушение основной кровли со стороны охранной полосы, может быть обеспечено за счет создания зон опасных напряжений в нижней части основной кровли охранным сооружением с режущим элементом. Это реализовано в разработанных способах охраны подготовительной выработки [345, 346].

РАЗДЕЛ 6

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД В ВЫРАБОТКАХ

6.1 Исследования способов и средств разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей в промышленных условиях

Исследования разрушающих смесей, способов разрушения и методик расчета их параметров проводились в несколько этапов. На первом этапе были испытаны способы разрушения пород не подверженных объемному полю напряжений, то есть блоков отделенных от массива. При таких граничных условиях, в первом приближении, блоки горных пород в подземных условиях могут быть заменены на аналогичные в условиях открытой разработки. Эксперименты велись на Хлебодаровском карьероуправлении.

Полезными ископаемыми месторождения являются интрузивные кристаллические породы, представленные гранитоидами, среди которых встречаются дайки лампрофира. По восьми отобраным на карьере пробам предел прочности при сжатии в воздушно-сухом состоянии составлял 58,0-163,4 (среднее значение – 94,6 МПа). В водонасыщенном состоянии – 52,8-98,4 (среднее значение – 79,7 МПа) [347].

Расчет параметров разрушения с помощью НРС велся по разработанной методике, приведенной в разделе 4. Приготовление смесей проводилось на месте ведения работ. Смесь заливалась в шпуры диаметром 43 мм (рис. 6.1 а).

Разрушение негабаритного блока гранита размерами 950х650х900 мм при температуре окружающей среды 23 – 27 °С приведено на рис. 6.1 б, в. Результаты экспериментов подтвердили техническую возможность невзрывного разрушения пород и правильность подхода к расчету параметров предлагаемого способа.



а)

б)

в)

Рисунок 6.1 – Заливка НРС в шпуры (а) и общий вид гранитного блока до разрушения (б) и после разрушения (в)

Также были проведены экспериментальные работы по разрушению негабаритных блоков гранита разработанными смесями, исследования которых представлены в разделе 3. Эксперименты проводились в мае месяце, температура во время проведения экспериментов колебалась от $+25^{\circ}\text{C}$ до $+35^{\circ}\text{C}$. В качестве разрушающих смесей использованы:

1. Смесь №1 – кальцинированная сода – 2,0 – 9,0 масс. %, лигносульфонат технический модифицированный – 0,40 – 2,5 масс. %, этановая кислота – 0,25 – 1,1 масс. %, оксид кальция из обожженных известняка и гипса – остальное [304].

2. Смесь №2 – кальцинированная сода – 3,0 – 9,0 масс. %, сульфитно-дрожжевая барда (СДБ) – 0,5 – 3,0 масс. %, гумат натрия – 1 – 6 масс. %, негашеная известь – остальное [305].

В порядке испытаний разрушено более 70 м^3 негабаритов. По результатам работ составлен акт-внедрения, приведенный в приложении 31. Приемочная комиссия пришла к выводу, что использование предложенных НРС для вторичного дробления гранита в температурном диапазоне от $+25^{\circ}\text{C}$ до $+35^{\circ}\text{C}$ экономично и безопасно. Примеры разрушения негабаритов с помощью НРС приведены на рис. 6.2.

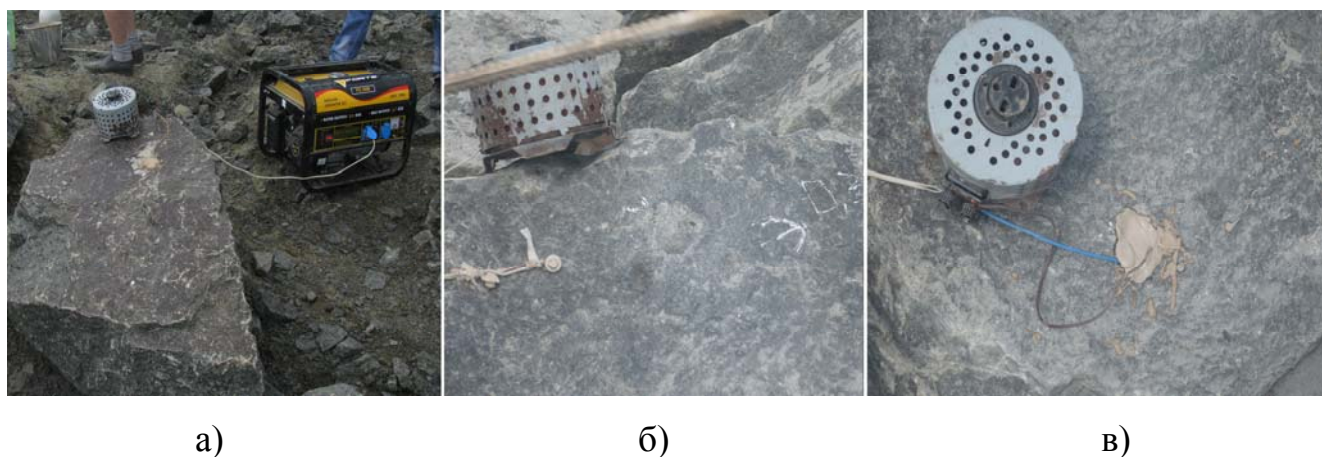
Экспериментальные работы, посвященные исследованию способов разрушения горных пород с управлением кинетикой расширения путем пропускания через раствор электрического тока [300] проводились на следующем этапе экспериментальных работ.



Рисунок 6.2 – Общий вид разрушенных негабаритных блоков гранита

В качестве НРС использовалась смесь, содержащая кальцинированную соду – 3,0 – 9,0 мас.%, сульфитно-дрожжевую барду (СДБ) – 0,5 – 3,0 масс. %, гумат натрия – 1 – 6 масс. %, негашеную известь – остальное.

Смесь заливалась в шпур, в донную и устьевую часть которых помещали электроды. Они объединялись в электрическую цепь и соединялись с источником энергии. Устьевые части шпуров герметизировались. После заливки НРС во все шпур и монтажа электрической цепи, производилось принудительное воздействие на скорость гидратации НРС электрическим током с напряжением 10-120 В. Подача напряжения в цепь осуществлялась в части экспериментов от автокрана, а в части – от бензинового генератора через лабораторный трансформатор ЛАТР-2,5 (рис. 6.3). Инициирование шпуров производили последовательно.



а)

б)

в)

Рисунок 6.3 – Общий вид эксперимента (а) подготовка электродов (б) и состояние на момент окончания монтажа электрической сети (в) при разрушении гранита с воздействием на НРС электрическим током

Разрушение гранитного блока по предложенному способу приведено на рис. 6.4. На рисунке видно образование трещины от контура шпура. По результатам работ составлен акт приемочных испытаний, приведенный в приложении 32. Экономический эффект от реализации способа невзрывного разрушения составляет 13,3 грн/1м³ в ценах 2013 года (приложение 33).



Рисунок 6.4 – Разрушение гранитного блока при пропускании через НРС электрического тока

Следующий этап исследований проводился непосредственно в условиях подземных горных работ и опирался на исследования, проведенные ранее на карьере.

Разрушение негабаритных блоков песчаника осуществлялось в 3 западном конвейерном штреке пл. к₈ [347], экспериментальный участок находился на ПК38.

На рис. 6.5 приведено разрушение негабаритного блока, имеющего форму близкую к параллелепипеду, представленного массивным монолитным песчаником. Средние размеры негабарита 900х600х350 мм. Для разрушаемого песчаника предел прочности пород на одноосное растяжение 8,5 МПа, диаметр шпура для заряжания НРС – 43 мм, температура объекта – 31 °С. В блоке было пробурено два шпура, расположенных в ряд по длинной стороне негабарита с расстоянием между шпурами 30 см (рис. 6.5).



а)

б)

в)

Рисунок 6.5 – Негабаритный блок песчаника до (а) и после (б) разрушения, стенки шпура с НРС после разрушения (в)

Шпуры были пробурены под углом 75 градусов к горизонтали, при этом их недобуривали до нижнего основания негабарита на 10-15 см. Через 7 часов после заливки раствора НРС от шпура начала прорастать трещина, развитие которой привело к разрушению блока (см. рис. 6.5 б). Состояние стенок шпура с НРС после разрушения блока приведено на рисунке 6.5 в. На фотографии видно, что длина зарядной камеры с НРС составляет около 50% от толщины блока.

Шахтные испытания способа невзрывного разрушения негабаритных блоков горных пород проводились также в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8 ПАО Ш/У «Покровское» на участке выработки, расположенном между ПК 37-42. Негабаритные блоки на экспериментальном участке были представлены в основном песчаниками мелкозернистыми с прочностью на одноосное сжатие 60-85 МПа, имели неправильную форму, близкую к прямоугольному параллелепипеду, с толщиной 0,4-0,6 м. Температура пород составляла 31,4 °С. Порядок приготовления и заливки смеси, ход работ и методика расчета параметров разрушения аналогичны описанному выше случаю. На рис. 6.6 приведен пример разрушения негабарита, по форме близкого к призме, с основанием в виде трапеции и размерами большего основания и высоты соответственно 540x500 мм, высотой призмы – 400 мм. В блоке был пробурен один шпур глубиной 15 см и диаметром 36 мм (см. рис 6.6 а). Расстояние от оси шпура до двух ближайших плоскостей свободы негабарита составило 240 и 250 мм соответственно. В шпур на

глубину 10 см заливалась НРС. Устьевая часть герметизировалась (см. рис. 6.6 б). Через 18 часов после заливки НРС произошел раскол блока на три части (см. рис. 6.6 в).



а)

б)

в)

Рисунок 6.6 – Состояние негабаритного блока песчаника после бурения шпура (а), заливки НРС и герметизации (б), разрушения (в)

По результатам проведенных работ составлен акт приемочных испытаний, приведенный в приложении 34.

Ведение очистных работ в условиях неустойчивых пород непосредственной кровли, местах геологических нарушений, зонах размывов и локальных ослаблений связано с вывалами из кровли. Обрушенные породные блоки, как правило, разрушают механическим способом с помощью исполнительного органа комбайна, отбойных молотков или участковых дробилок, установленных на конвейере лавы. Эксперимент по разрушению с помощью НРС негабаритных блоков песчаника был проведен в 4 южной лаве центральной панели бл. 8 ПАО Ш/У «Покровское» [348]. Разрушение проводили по способу [295]. Было проведено разрушение негабаритного блока песчаника, с прочностью по шкале проф. М.М. Протодяконова 7, по форме близкого к параллелепипеду с основанием в виде параллелограмма с размерами сторон 620x460 мм и толщиной – 400 мм. Посреди блока был пробурен один шпур глубиной 320 мм и диаметром 36 мм. В шпур помещался приготовленный на месте ведения работ НРС. В устьевую часть шпура устанавливался шток, соединенный с гидростойкой ГС. После чего гидростойка распира-

лась между кровлей лавы и негабаритным блоком горных пород, что приводило к повышению давления НРС в шпуре. В результате повышения давления и ограничения возможности роста объема НРС происходило разрушение негабарита.

Проведенные эксперименты доказали техническую возможность реализации разрушения горных пород при помощи НРС в условиях подземных горных выработок и открытых горных работ, подтвердили состоятельность предложенной методики определения параметров невзрывного разрушения. Все способы прошли опытно-промышленную проверку.

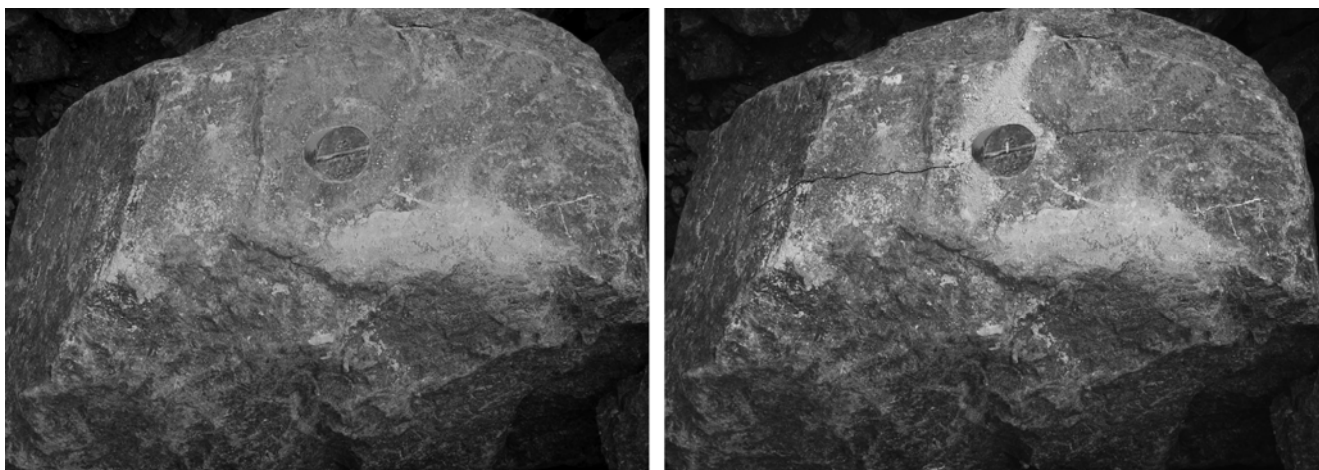
6.2 Исследования способов и средств направленного разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих смесей

Исследования предложенных способов и средств направленного разрушения [311, 312] в натуральных условиях велись в условиях Хлебодаровского карьероуправления на негабаритных блоках гранита. Приготовленная смесь НРС помещалась в патроны (рис. 6.7) после чего патроны устанавливались в шпуры. Расстояние между шпурами рассчитывалось, по зависимостям, приведенным п. 4.3.



Рисунок 6.7 – Заливка НРС в патроны

На рисунке 6.8 приведены результаты эксперимента по разрушению негабаритного блока размерами 600x350x550 мм с помощью предложенного способа направленного разрушения. Блок разрушен по длинной стороне одним шпуром с патроном НРС. Из рисунка видно, что магистральная трещина проходит ровно по всему блоку, начинается от стенок шпура в местах зазора между элементами патрона НРС.



а)

б)

Рисунок 6.8 – Процесс направленного разрушения гранита. Общий вид блока после установки патрона в шпур (а); после образования трещины (б)

Сравнение характера разрушения блоков при заливке НРС непосредственно в шпур и при помещении НРС в шпур в патронах можно сделать на основе анализа характера разрушения горных пород, представленного на рис. 6.9.

Анализ полученных результатов позволяет сделать выводы, что при заливке НРС непосредственно в шпур от его стенок образуется несколько разнонаправленных трещин (в основном – три), которые имеют различную траекторию роста. И даже при ряде шпуров, пробуренных по необходимой линии разрушения (на рис. 6.9 а – три шпура по длинной стороне блока) обеспечить направленное разрушение удастся не всегда. При использовании же патронов всегда образуется магистральная трещина в требуемом направлении (см. рис. 6.9 б). Это позволяет обеспечить направленное разрушение, исключив образование трещин в остальной части массива.



а)

б)

Рисунок 6.9 – Характер разрушения гранитных блоков при заливке НРС непосредственно в шпур (а) и при помещении в шпур патрона с НРС (б)

Примеры направленного разрушения негабаритов гранита с помощью НРС приведены на рис. 6.10.



Рисунок 6.10 – Общий вид направленного разрушения негабаритных блоков

Акт и протокол испытаний приведены в приложении 35. Проведенные работы дают основания считать предложенный способ направленного разрушения и методику расчета его параметров прошедшими опытно-промышленную проверку.

6.3 Экспериментальные работы по изучению способов ремонта горных выработок с помощью невзрывчатых разрушающих смесей в промышленных условиях

Промышленная проверка способа ремонта горных выработок [318] была проведена в три этапа [317]. Первый этап испытаний проводился в западном магистральном откаточном квершлага гор. 493 м на ПК-71. Приготовленный раствор НРС при помощи специального шприца заливался в герметичные полиэтиленовые ампулы (рис. 6.11 а). Ампулы с НРС помещались в шпуров глубиной 1 м. Герметизация шпуров производилась деревянными клиньями (рис. 6.11 б).



а)

б)

Рисунок 6.11 – Заливка НРС в ампулы (а) и герметизация шпуров с НРС (б)

Через 8 часов после заряжания произошло обрушение пород крепи ниже первого ряда шпуров, а через 9 часов ниже второго ряда на ослабленные рамы. Оконтуривание выработки для создания гладкого контура производилось с помощью обушка. После чего извлекались деформированные рамы крепи и устанавливались новые рамы по проектному контуру выработки. Цикл работ по замене 2 рам крепи был выполнен в течение двух смен. Таким образом, предложенный способ невзрывного разрушения пород, смещенных в полость выработки при ведении ремонта, позволил сократить долю ручного труда и существенно повысить производительность работ, при сохранении темпов ремонтных работ. Состояние забоя перекрепления представлено на рис. 6.12.

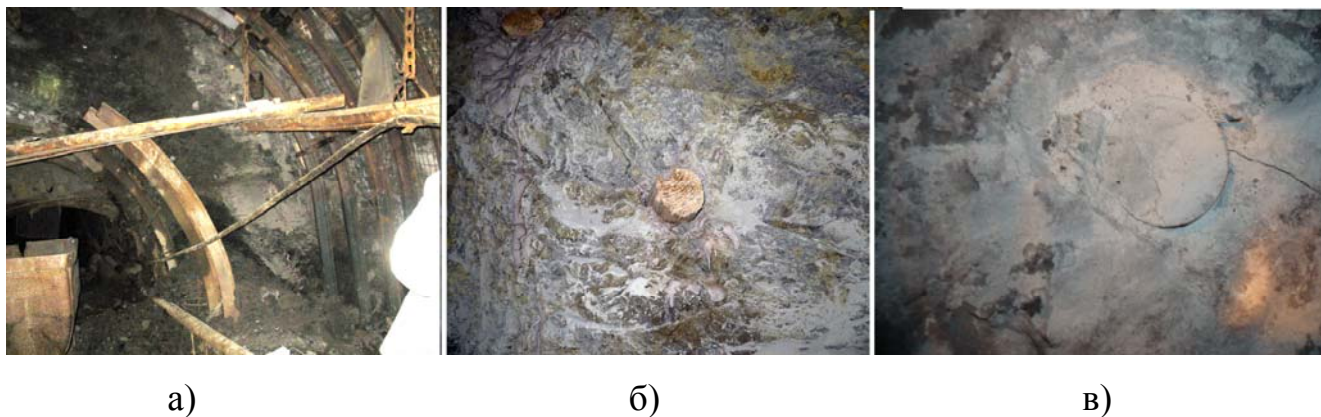


а)

б)

Рисунок 6.12 – Вид забоя перекрепления в западном магистральном откаточном квершлагае гор. 493 м после бурения шпуров для НРС (а) и после разрушения породы и установки новых рам (б)

Второй этап испытаний проводился во вспомогательном уклоне пласта m_2 на ПК 41+5. Разрушаемые породы были представлены в основном аргиллитами трещиноватыми с включениями сидерита. Порядок проведения работ описан в акте и протоколе промышленных испытаний. Общий вид забоя перекрепления представлен на рис. 6.13. Ход работ аналогичен описанному выше. Рост трещин между шпурами с НРС начался через 6,5 часов (рис. 6.13 б, в). Через 8 часов произошло отслоение пород, однако на почву выработки они не обрушились. Разборка породы была произведена вручную.



а)

б)

в)

Рисунок 6.13 – Общий вид забоя перекрепления во вспомогательном уклоне пласта m_2 (а), рост трещины между шпурами в боку (б) и кровле (в) выработки

Третий этап испытаний проводился в конвейерном штреке 26 восточной лавы на ПК 0. Пресекаемые породы были представлены в основном аргиллитами прочностью 45 МПа.

Также описанная технология невзрывного разрушения пород была апробирована при восстановлении 9 восточного вентиляционного штрека пласта k_2 . Штрек проводился по завалу с полным восстановлением сечения. Породы кровли представлены преимущественно сланцами глинистыми с пределом прочности на сжатие 20-48 МПа, вблизи тектонических нарушений сильно трещиноватыми. Работы по разрушению велись с помощью БВР технологии, что часто приводило к вывалам и образованию куполов до 1,5-2,5 м в кровле выработки. Общая технология работ по предлагаемому способу аналогична описанной выше. Состояние кровли штрека при взрывном и невзрывном способах разрушения смещенных в полость выработки пород приведено на рис. 6.14.



а)

б)

Рисунок 6.14 – Общий вид состояния кровли при восстановлении 9 восточного вентиляционного штрека пласта k_2 при разрушении пород буровзрывным (а) и невзрывным способом (б)

Изменение способа разрушения пород смещенных в полость выработки на невзрывной, позволило сохранить естественную прочность и несущую способность пород приконтурной зоны, что привело к сокращению количества вывалов из

кровли и уменьшению их высоты. Проведенные работы дают основания считать предложенный способ ремонта выработок прошедшим опытно промышленную проверку.

6.4 Исследования способа борьбы с пучением почвы горных выработок в шахтных условиях

Исследования способа борьбы с пучением почвы выработок [319] были проведены в условиях ПАО Ш/У «Покровское». Работы велись в соответствии с разработанной и утвержденной на предприятии методикой проведения шахтных экспериментов по обоснованию параметров способа подрывки прочных пород почвы способом их невзрывного разрушения. Экспериментальный участок был расположен в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8 между ПК 37-ПК 43. Глубина заложения – 750 м. Породы почвы выработки на экспериментальном участке представлены в основном песчаниками мелкозернистыми с прочностью на одноосное сжатие 38-85 МПа. Разработка пород такой прочности отбойным молотком невозможна, а ведение БВР недопустимо по газовому фактору и из-за наличия в выработке дегазационного трубопровода. Температура боковых пород 31,4 °С. Величина подрывки составляла 0,2-0,5 м. Через 6 часов после заливки шпуров произошло разрушение по участку подрывки, за счет прорастания магистральной трещины от шпура с НРС, после чего произошел откол породы на участке подрывки. Состояние забоя подрывки при выполнении операций по разрушению пород почвы представлено на рис. 6.15. На основании результатов приемочных испытаний описанного способа разрушения пород почвы при помощи НРС был составлен акт приемочных испытаний (приложение 36), что позволяет считать предложенный способ и методику расчета его параметров прошедшими опытно-промышленную проверку. Испытания способа подрывки прочных пород почвы при помощи НРС проводили также в 3 западном конвейерном штреке пл. k₈ между ПК 38-ПК 42. Было проведено разрушение пород почвы, представленных трещиноватым массивным песчаником.



а)

б)

в)

Рисунок 6.15 – Общий вид почвы с пробуренными шпурами (а), заливка НРС в шпуры (б) и установка деревянных стоек (в)

В забое подрывки были пробурены шпуры с расстоянием между ними 0,3 м, длиной 0,5 м и углом наклона к горизонтали 30 градусов. Расстояние от устьев шпуров до свободной поверхности 0,4 м (рис. 6.16 а). В шпуры на глубину 0,45 м заливали НРС, после чего шпур герметизировали. Через 4 часа после размещения НРС в шпуры произошел откол пород почвы (рис. 6.16 б), представляющий собой корж песчаника толщиной 0,25-0,3 м, после чего происходило его смещение в сторону открытой плоскости забоя подрывки.



а)

б)

Рисунок 6.16 – Общий вид забоя подрывки (а) и трещина между шпурами (б)

На ПК 42 было проведено разрушения пород почвы (разделка габаритов рельсового пути), представленных трещиноватым мелкослоистым песчаником. В забое подрывки нормально напластованию пород были пробурены шпуры с расстоянием между ними 0,27 м, длиной 0,6 м и углом наклона к горизонтали 80 градусов. Через 3 часа после размещения НРС в шпуры началось отслаивание и коржение песчаника с отжимом разрушенных пластин, толщиной 0,7-3 см в сторону забоя подрывки, при этом между шпурами с НРС проросла магистральная трещина. После прекращения разрушения пород, через 6 часов после начала эксперимента, массив был расслоен пластинками песчаника, разрушенными параллельно слоистости и отжат в сторону забоя подрывки.

Проведенные работы дают основания считать предложенный способ борьбы с пучением почвы выработок и методику его расчета прошедшими опытно-промышленную проверку.

6.5 Испытания способа упрочнения горных пород с помощью НРС в шахтных условиях

Шахтные испытания разработанного способа укрепления горных пород [339] проводились при перекреплении грузового ходка уклона пл. m_4^0 гор. 450 м на ОП «Шахта Добропольская» на участке длиной 16 м (ПК 9-10) [349]. Реализация данного способа при перекреплении выработок позволяет предотвратить нежелательный выпуск породы из запроектного контура при демонтаже деформированной рамы крепи, что обеспечивает минимальное нарушение сложившегося в окружающем массиве равновесия и способствует более устойчивому состоянию выработки в послеремонтный период. Горно-геологические условия на экспериментальном участке и описание технологии ведения работ приведены в акте внедрения и протоколе испытаний, приведенных в приложении И. Приготовленный раствор НРС помещали в шпуры в полиэтиленовых ампулах. В каждый шпур устанавливали по две ампулы с фиксацией в донной части (рис 6.17 а). Состояние

кровли околошпуровой области после обрушения пород за границей сжатой НРС области приведено на рис. 6.17 б.



а)

б)

в)

Рисунок 6.17 – Установка НРС в шпур (а), состояние околошпуровой области (б) и общий вид кровли (в) грузового ходка уклона после демонтажа деформированной рамы крепи

Анализ состояния грузового ходка уклона пл. m_4 гор. 450 м во время перекрепления показал, что при демонтаже деформированных рам крепи на экспериментальном участке не произошло ни одного вывала из запроектного контура кровли высотой более 0,35 м.

При этом средняя высота вывалов на экспериментальном участке составила 0,27 м, в то время как на контрольном участке максимальная высота вывала составила 0,50 м, а средняя высота вывалов – 0,35 м. Кровля выработки при этом пересечена двумя системами трещин с шагом 0,2-0,3х 0,4 м, что видно на фотографии, представленном на рис.6.17б. Общий вид кровли грузового ходка уклона пл. m_4^0 гор. 450 м после демонтажа представлен на рис. 6.17 в. На контрольном участке за время наблюдения средняя скорость смещений составила 3,66 мм/сут, а на экспериментальном – 1,53 мм/сут, то есть при применении предлагаемого способа была в 2,4 раза меньше, чем на участке перекрепления с выпуском породы. Таким образом, проведенные промышленные испытания разработанного способа в условиях ОП «Шахта Добропольская» при перекреплении грузового ходка уклона пл. m_4^0 гор. 450 м подтвердили его работоспособность.

6.6 Разработка рекомендаций по применению невзрывчатых разрушающих смесей в подземных горных выработках

Проведенные в работе исследования позволили разработать «Рекомендации по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса» (приложение К) и согласовать их в МакНИИ (приложение Л). Способ разрушения с помощью НРС является одним из вариантов воздействия на призабойную часть массива в СОУ-П 10.1.00174088.031:2011 «Контроль за проведением способов и технологических процессов по параметрам акустического сигнала при вскрытии склонных к ГДЯ угольных пластов» [350] (приложение М).

Положительные результаты шахтных испытаний и внедрения позволили разработать и утвердить стандарт предприятия [СТП (02070826) (33161769):2014] «Методика определения параметров разрушения горных пород в подземных горных выработках с помощью невзрывчатых разрушающих смесей» (приложение Н).

Суммарный годовой эффект от внедрения рекомендаций в условиях ПАО Ш/У «Покровское» ПрАО «Донецксталь» - металлургический завод» составил 1,46 млн. грн.

Выводы по разделу 6

1. Исследования способов и средств разрушения горных пород с помощью НРС в условиях Хлебодаровского карьероуправления позволили:

– подтвердить работоспособность разработанных смесей НРС, техническую возможность невзрывного разрушения пород и правильность подхода к расчету параметров предлагаемого способа;

– подтвердить параметры способов: расстояние между шпурами, расстояние от шпуров до открытой поверхности;

– подтвердить влияние электрического поля на скорость разрушения и величину оптимального напряжения;

– обеспечить экономический эффект от реализации способа невзрывного разрушения в размере 13,3 грн/1м³ в ценах 2013 г.

2. Исследования способов разрушения горных пород с помощью НРС в условиях подземных горных выработок ПАО Ш/У «Покровское» позволили:

– подтвердить параметры способов: расстояние между шпурами, расстояние от шпуров до открытой поверхности, время разрушения;

– подтвердить влияние предварительного сжатия НРС на скорость разрушения и величину давления.

3. Испытания предложенного способа направленного разрушения в условиях Хлебодаровского карьероуправления позволили подтвердить его эффективность и правильность расчета параметров.

4. Экспериментальные работы по изучению способа ремонта горных выработок с помощью НРС подтвердили работоспособность и правильность расчета параметров способа.

5. Исследования способа борьбы с пучением почвы горных выработок в условиях ПАО Ш/У «Покровское» позволили подтвердить работоспособность способа, верность расчета параметров.

6. Испытания способа упрочнения горных пород с помощью НРС в условиях ОП «Шахта Добропольская» позволили установить, что при реализации способа не произошло ни одного вывала из запроектного контура кровли высотой более 0,35 м, при этом средняя высота вывалов на экспериментальном участке составила 0,27 м, в то время как на контрольном участке максимальная высота вывала составила 0,50 м, а средняя высота вывалов – 0,35 м, а скорость смещений пород кровли при применении предлагаемого способа была в 2,4 раза меньше, чем на участке перекрепления с выпуском породы.

7. Разработаны и согласованы МакНИИ «Рекомендации по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса».

8. Способ разрушения с помощью НРС является одним из вариантов воздействия на призабойную часть массива в СОУ-П 10.1.00174088.031:2011 «Конт-

роль за проведением способов и технологических процессов по параметрам акустического сигнала при вскрытии склонных к ГДЯ угольных пластов».

9. Положительные результаты шахтных испытаний и внедрения позволили разработать и утвердить стандарт предприятия [СТП (02070826) (33161769):2014] «Методика определения параметров разрушения горных пород в подземных горных выработках с помощью невзрывчатых разрушающих смесей».

10. Суммарный годовой эффект от внедрения рекомендаций составил 1,46 млн. грн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная новая научная проблема установления закономерностей формирования НДС при применении невзрывчатых разрушающих смесей с учетом кинетики их гидратации в шпуровых и скважинных зарядах во времени, конструкции зарядов, влияния технологических физических процессов для управления состоянием горных пород при восстановлении эксплуатационного сечения горных выработок и обеспечении их устойчивости на разных этапах поддержания.

Основные научные и практические результаты работы и вытекающие из них выводы состоят в следующем:

1. Разработаны методики: определения фазового состояния растворов НРС в процессе гидратации методом ЯМР-спектроскопии; определения физико-механических свойств НРС в типичных деформационных режимах с помощью УНТС; определения физико-механических свойств НРС в условиях шпуровых и скважинных зарядов.

2. В результате экспериментальных исследований развиты представления о расширении НРС на основе оксида кальция в процессе гидратации. Установлены четыре стадии гидратационного твердения и расширения раствора НРС, которые характеризуются изменением фазового состояния воды в растворе, динамикой расширения системы и интенсивностью тепловыделения. При этом максимальное расширение НРС происходит на третьей стадии гидратационного твердения и сопровождается переходом воды в растворе из свободной фазы в химически связанное состояние. Определено влияние внешних факторов на скорость протекания реакции на каждой стадии работы НРС. Установлено, что гидратационное твердение в условиях жесткой оболочки протекает более интенсивно, характеризуется резким изменением фазового состояния воды из адсорбированного в связанное.

3. Впервые установлены закономерности изменения кинетики расширения НРС от коэффициента расширения смеси, температуры окружающей среды,

предварительного сжатия, воздействия электрического поля, введения этановой кислоты и гумата натрия, что позволяет регулировать скорость гидратации и давление расширения НРС при решении задач разрушения горных пород и управления их НДС. При расширении НРС давление в горных породах изменяется по логарифмической зависимости от жесткости системы «НРС-массив», температуры и воздействия электрическим полем. Предварительное сжатие НРС 0,26-17,5 МПа, увеличивает по квадратичной зависимости давление в 1,05 - 1,37 раз.

4. Впервые установлены особенности динамики расширения НРС в различных пространственных направлениях в разных деформационных режимах. Так при помещении НРС в замкнутую камеру давление его расширения и увеличение объема определяется сопротивлением стенок камеры в соответствующем направлении, то есть рост давления обеспечивает не весь объем НРС в образце, а некоторая его часть, находящаяся в непосредственной близости от границы с камерой, в которую он помещен. Модуль деформации НРС E также зависит от деформационного режима системы. При расширении смеси близком к нулю $E = 1987,3e^{0,1182 \cdot \sigma_{cp}}$, а при помещении НРС в полость с податливыми стенками, при расширении смеси до 13,6%, $E = 36,64 \ln(\sigma_{cp}) + 97,31$. При этом модуль поперечной деформации при расширении НРС не зависит от деформационного режима и равен 0,235-0,255.

5. Впервые установлена особенность разрушения пород вокруг шпура с НРС, заключающаяся в первоначальном стремительном прорастании радиальных трещин, в результате высвобождения накопленной упругой потенциальной энергии и ее перехода в поверхностную, остановкой их роста и дальнейшим раскрытием берегов трещин имеет затухающий ступенчатый характер, по мере роста давления расширения НРС в шпуре. На основании локального силового критерия Гриффитса-Ирвина разработана модель разрушения горных пород НРС с учетом существующего поля напряжений.

6. В результате математического моделирования установлено, что при размещении двухэлементного патрона НРС на стенках шпура создаются растягивающие напряжения, коэффициент концентрации которых описывается обратной

степенной зависимостью отношения зазора между оболочками патрона к диаметру шпура. При зазоре 4 - 27% от диаметра шпура коэффициент концентрации напряжений равен 1,9-4. Разработаны и апробированы способы и средства направленного разрушения горных пород с помощью НРС при разрушении негабаритов, проведении и восстановлении эксплуатационного состояния выработок.

7. Разработана концепция управления НДС массива горных пород, основанная на искусственном изменении компонент напряжений в окрестности проводимой горной выработки за счет принудительного сжатия массива при расширении НРС помещенных в шпуры, и предложена ее техническая реализация в разработанных способах крепления горных выработок. С помощью МКЭ определена зона влияния шпура с НРС в сплошной среде, что позволило определить параметры предложенных способов.

8. Экспериментально установлено, что передача давления от заряда НРС вглубь массива, представленного дискретной средой, при нагружении происходит по зависимости близкой к квадратичной. Это объясняется последовательным уплотнением и переупаковкой дискретного материала в направлении от зоны ближней к заряду НРС вглубь массива. Коэффициент передачи давления повышается при увеличении абсолютного значения нагрузки на внутреннем контуре, а при разгрузке передача давления от контура зоны влияния к заряду НРС происходит не по пути нагружения, а более полого, при этом наблюдается запаздывание передачи давления.

9. Впервые установлен эффект повышения несущей способности разрушенных горных пород, представленных блочно-дискретной средой, при их распоре НРС, помещенными в шпуры. Разработаны способы упрочнения горных пород в процессе поддержания выработки. Установлено, что расстояние между шпурами с НРС прямо пропорционально давлению НРС, длине шпура и коэффициенту внешнего трения пород и обратно пропорционально их удельному весу и высоте возможного вывала.

10. Развита представления о механизме разрушения массива вокруг выработки поддерживаемой за лавой. В частности установлено, что жесткость охран-

ного околоштрекового сооружения c_n существенно влияет на эпюру максимальных главных напряжений $\sigma_{1\max}$ в основной кровле и место ее разрушения относительно поддерживаемой за лавой подготовительной выработки. Так при жесткости охранного сооружения больше чем угольного пласта $\frac{c_n}{c_y} > 1$ область $\sigma_{1\max}$ в породах основной кровли формируется над охранным сооружением, выше нейтральной оси зависающей породной консоли, при этом породы в области максимума напряжений находятся в состоянии обобщенного сдвига, а разрушение основной кровли происходит над охранным сооружением. Это позволяет сохранить устойчивость выработки. В случае, когда $\frac{c_n}{c_y} < 1$ область $\sigma_{1\max}$ в породах основной кровли формируется со стороны пласта на расстоянии по нормали от бока выработки около половины ее ширины, в верхней части зависающей породной консоли. Это создает условия для разрушения основной кровли со стороны пласта. В этом случае сохранить устойчивость выработки можно с помощью принудительного обрушения. При этом охранный сооружение нагружается со стороны выработанного пространства больше в 1,5-1,6 раза, а увеличение длины зависающей в выработанном пространстве консоли приводит к росту σ_1 в основной кровле по полиномиальному закону.

11. Установлено, что минимизация энергозатрат на принудительное обрушение зависающей породной консоли может быть достигнута за счет инициирования разрушения с помощью НРС в зоне естественных растягивающих напряжений выше нейтральной оси зависающего слоя пород основной кровли. При этом помещение НРС в кровлю вызывает изменение градиента и экстремума $[\sigma_{1\max}]$ и их увеличение по линейной зависимости от давления расширения P , что позволяет управлять временем и местом обрушения основной кровли.

12. Разработаны и апробированы модифицированные НРС с добавлением портландцементов, этановой кислоты и гумата натрия, а также способы невзрывного разрушения горных пород, основанные на управлении кинетикой расширения НРС с помощью предварительного сжатия в зарядной камере, регулирования

теплообменных процессов между зарядом НРС и разрушаемым объектом, воздействия на НРС электрическим током. Испытания способов проведены на шахтах Министерства энергетики и угольной промышленности Украины. Суммарный годовой эффект от внедрения рекомендаций составил 1,46 млн грн.

13. Разработаны и согласованы МакНИИ «Рекомендации по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса»; СОУ-П 10.1.00174088.031:2011 «Контроль за проведением способов и технологических процессов по параметрам акустического сигнала при вскрытии склонных к ГДЯ угольных пластов» и СТП (02070826) (33161769):2014 «Методика определения параметров разрушения горных пород в подземных горных выработках с помощью невзрывчатых разрушающих смесей».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Янко, С.В. Состояние и перспективы приватизации угледобывающих предприятий в Украине / С.В. Янко, Е.С Чуприна // Уголь Украины. – 2007. – №3. – С. 17-22.
2. Отраслевой обзор. Уголь Украины. [Электронный ресурс] / Baker Tilly International [London, 2013] / URL: http://www.bakertilly.ua/media/Baker%20Tilly%20-%20Report_coal_industry_rus.pdf (дата обращения: 01.03.2015).
3. Проблема топливно-энергетических ресурсов в мире и Украине / В.С. Тополов, Л.Е. Хлапенев, А.А. Бортников [и др.] // Уголь Украины. – 2004. – №5. – С. 3-11.
4. Обзор: Запасы угля в Украине составляют 33,8 млрд. т. / [Электронный ресурс] / Информационное агентство RBC.UA [Киев, 2011] / URL: <http://www.rbc.ua/rus/analytics/bp-zapasy-uglya-v-ukraine-sostavlyayut-33-8-mlrd-t-09062011155700> (дата обращения: 01.03.2015).
5. Программа «Українське вугілля» Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 19.09.2001 р. № 1205.
6. Концепція державної енергетичної політики України на період до 2020 року // Національна безпека і оборона. – 2002. – № 2 (14) – С. 2-62.
7. Сургай, Н.С. О некоторых принципах обеспечения высокоэффективного и надежного функционирования шахты / Н.С. Сургай // Уголь Украины. – 1994. – №3. – С. 4-18.
8. Бабиюк, Г.В. Управление надежностью горных выработок: монография / Г.В. Бабиюк. – Донецк: Світ книги, 2012. – 420 с.
9. Мизин, В.А. Творческое сотрудничество института, завода и шахты – залог успеха / В.А. Мизин, А.В. Сытник, А.В. Нагорный // Уголь Украины. – 2003. – №8. – С. 43-44.
10. Софийский, К.К. Исследование и разработка элементов технологии комбайнового проведения выработок по выбросоопасным породам [Текст] : автореф.

дис. ... канд.техн.наук: 05.15.04 / Софийский Константин Константинович. – Днепропетровск, 1978. – 17 с.

11. Указания по охране, поддержанию и рациональному расположению подготовительных выработок на шахтах основных бассейнов страны – Л.: ВНИМИ, 1972. – 121 с.

12. КД 12.01.01.201–98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах : Методические указания. – К.: УкрНИМИ, 1998. – 149 с.

13. Бурчаков, Ю.И. Исследование напряженно-деформированного состояния пород с учетом их реологических свойств вокруг горизонтальных капитальных выработок глубоких шахт Донбасса [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / Бурчаков Юрий Иванович. – М.: МИРГЭМ, 1966. – 186 с.

14. Векслер, Ю.А. Исследования больших деформаций ползучести и разрушения горных пород вокруг горизонтальных выработок [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.15.02 / Векслер Юлий Абрамович. – Новосибирск, 1971. – 36 с.

15. Глушко, В.Т. Определение механических характеристик горных пород в лабораторных условиях / В.Т. Глушко // Уголь Украины. – 1975. – №5. – С. 23-26.

16. Глушко, В.Т. Охрана выработок глубоких шахт / В.Т. Глушко, Т.М. Цай, И.И. Баганов. – М.: Недра, 1975. – 200 с.

17. Глушко В.Т. Механика горных пород и охрана выработок / В.Т. Глушко, А.З. Широков. – К.: Наукова думка, 1967. – 153 с.

18. Заславский, Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна / Ю.З. Заславский. – М. : Недра, 1966. – 180 с.

19. Заславский, И.Ю. О бесцеликовой охране выемочных выработок / И.Ю. Заславский // Уголь Украины. – 1984. – №2. – С. 17-18.

20. Зорин, А.Н. Природа влияния слабых возмущений на состояние горного массива / А.Н. Зорин, В.В. Виноградов, А.Ф. Булат // Уголь Украины. – 1985. – №1. – С. 15-16.

21. Зорин, А.Н. Комплексный подход к решению вопроса крепления и охраны горных выработок / А.Н. Зорин, Б.М. Усаченко // Уголь. – 1979.– №3. – С. 55-56.
22. Либерман, Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок / Ю.М. Либерман. – М.: Наука, 1969. – 119 с.
23. Максимов, А.П. Горное давление и крепь выработок / А.П. Максимов. – М.: Недра, 1974. – 287 с.
24. Руппенейт, К.В. Некоторые вопросы механики горных пород / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.
25. Фисенко, Г.Л. Методы количественной оценки структурных ослаблений массива горных пород в связи с анализом их устойчивости / Г.Л. Фисенко // Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972. – С. 21-29.
26. Фисенко, Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
27. Черняк, И.Л. Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт / И.Л. Черняк, Ю.И. Бурчаков. – М. : Недра, 1984. – 304 с.
28. Черняк, И.Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок / И.Л. Черняк. – М.: Недра, 1978. – 237 с.
29. Феннер, Р. Исследование горного давления / Р. Феннер // Вопросы теории горного давления. – М.: Готгортехиздат, 1961. – С. 5 – 58.
30. Лабасс, А. Давление горных пород в угольных шахтах / А. Лабасс // Вопросы теории горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 59 – 164.
31. Черняк, И.Л. Повышение устойчивости подготовительных выработок / И.Л. Черняк. – М.: Недра, 1993. – 256 с.
32. Черняк, И.Л. Выбор сопротивления крепи подготовительных выработок в зоне опорного давления / И.Л. Черняк, Ю.И. Бурчаков, Е.М. Серебренник // Уголь. – 1983. – №4. – С. 16-18.
33. Усан-Подгорнов, Б.М. Влияние на трудоемкость поддержания горных выработок упрочнения пород с глубиной разработки / Б.М. Усан-Подгорнов, М.М. Ямпольский // Добыча угля подземным способом. – 1978. – №2. – С. 31-32.

34. Усан-Подгорнов, Б.М. Прогнозирование проявления горного давления в выработках, проводимых без подрывки боковых пород / Б.М. Усан-Подгорнов, Э.Е. Баранецкий // Экспресс-информация ЦНИЭИуголь. – М.: ЦНИЭИуголь, 1979. – 21 с.

35. Усан-Подгорнов, Б.М. Смещения боковых пород штреков, закрепленных податливой крепью / Б.М. Усан-Подгорнов, В.Я. Манинберг // Технология добычи угля подземным способом. – 1972. – №2. – С. 19-20.

36. Усан-Подгорнов, Б.М. Влияние формы штреков на их устойчивость в зоне опорного давления при слабых вмещающих породах / Б.М. Усан-Подгорнов, Е.А. Филипчук // Совершенствование подземной добычи угля. – М.: Недра, 1975. – С. 122-130.

37. Ардашев, К.А. Геомеханические основы выбора и совершенствования бесцеликовых способов охраны и поддержания подготовительных выработок / К.А. Ардашев, И.П. Бажин // Уголь. – 1979. – №3. – С. 23-31.

38. Горное давление в подготовительных выработках угольных шахт / И.Л. Давыдович, И.П. Бажин, Ю.П. Коренной [и др.]. – М.: Недра, 1971. – 228 с.

39. Комиссаров, М.А. Некоторые вопросы поддержания подготовительных выработок в условиях пологих пластов Донбасса / М.А. Комиссаров // Вопросы охраны и крепления горных выработок. – М.: Недра, 1968. – С. 3-25.

40. Ардашев, К.А. Поддержание выработок при бесцеликовой разработке пластов / К.А. Ардашев // Уголь. – 1983. – №9. – С. 2-29.

41. Борисов, А.А. Механика горных пород и массивов / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.

42. Лобков, Н.И. Геомеханическое обоснование прогноза зон интенсивных сдвижений кровли в выемочном поле лавы пологого пласта: [Текст] Дисс... докт. техн. наук: 05.15.02. / Лобков Николай Иванович. – Донецк, 2012. – 291 с.

43. Болгожин, Ш.А. Геомеханические условия охраны подготовительных выработок при отработке угольных пластов / Ш.А. Болгожин, Ф.И. Клиновицкий. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 86 с.

44. Зубов, В.П. Влияние подрывок на пучение пород в подготовительных выработках / В.П. Зубов, Л.Н. Чернышков, К.Н. Лазченко // Уголь Украины. – 1985. – №7. – С. 15-16.

45. Негрей, С.Г. Обоснование параметров механического отпора породам почвы выемочных выработок при отработке лав обратным ходом: [Текст] Дисс... канд. техн. наук: 05.15.02. / Негрей Сергей Григорьевич. – Донецк, 2007. – 296 с.

46. Экспериментальные исследования пучения пород почвы подготовительных выработок на пологих пластах Донбасса [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович [и др.]. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2014. – 224 с.

47. Кошелев, К.В. Поддержание, ремонт и восстановление горных выработок / К.В. Кошелев, А.Г. Томасов. – М.: Недра, 1985. – 215 с.

48. Кошелев, К.В. Охрана и ремонт горных выработок / К.В. Кошелев, Ю.А. Петренко, А.О. Новиков. – М.: Недра, 1990. – 218 с.

49. Экспериментальные исследования устойчивости повторно используемых выемочных выработок на пологих пластах Донбасса [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович [и др.]. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2012. – 426 с.

50. Аналитико-экспериментальные исследования повышения устойчивости выемочных выработок и расчет параметров крепежной системы [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович [и др.]. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2012. – 178 с.

51. Касьян, Н.Н. Геомеханические основы управления зоной разрушенных пород вокруг выработок для обеспечения их устойчивости на больших глубинах: [Текст] Дис. ... докт. техн. наук. 05.15.02 / Касьян Николай Николаевич. – Донецк, 2002. – 358 с.

52. Технологические схемы поэтапного поддержания капитальных выработок на основе разгрузки породного массива от повышенных напряжений. РД 12.18.096-90 // К.В. Кошелев, Ю.А. Петренко, А.О. Новиков [и др.] – Донецк – Харьков, 1991. – 80 с.

53. Петренко, Ю.А. Совершенствование способов поддержания горных выработок с учетом различных этапов их существования / Ю.А. Петренко, А.О. Новиков, А.В. Захаренко // Известия Донецкого горного института. – 1996. – №2. – С. 97-99.

54. Петренко, Ю.А. Обоснование своевременности применения способов охраны при поэтапном поддержании горных выработок / Ю.А. Петренко, А.О. Новиков, А.В. Захаренко // Известия Донецкого горного института. – 1998. – № 1. – С. 90-94.

55. Новиков, А.О. Наследственное напряженно-деформированное состояние армированного анкерами породного массива вокруг горной выработки / А.О. Новиков // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. – ИФГП НАН Украины, 2010. – вып. 13. – С. 85-92.

56. Ржевский, В.В. К вопросу об управлении состоянием горного массива / В.В. Ржевский // Уголь. – 1982. – №1. – С. 12-14.

57. Рутьков, К.И. Обобщение опыта охраны участковых подготовительных выработок на больших глубинах при бесцеликовой выемке: Обзорная информация / К.И. Рутьков, Ю.Л. Селиванов // Добыча угля подземным способом./ЦНИИ экон. и НТИ угольной промышленности. – 1989. – №19. – С. 1-26.

58. Зборщик, М.П. Поддержание подготавливаемых выработок в сохраняемых зонах разгрузки / М.П. Зборщик, В.В. Назимко // Уголь Украины. – 1989. – №4. – С. 8-11.

59. Литвинский, Г.Г. Управление напряженным состоянием пород вокруг выработки / Г.Г. Литвинский, Г.В. Бабиюк, С.Г. Коробкин // Уголь Украины. – 1982. – №10. – С. 6-7.

60. Литвинский, Г.Г. Повышение устойчивости выработок разгрузкой горного массива от напряжений щелями / Г.Г. Литвинский, Г.В. Бабиюк // Экспресс-информация ЦНИЭИуголь. – М.: ЦНИЭИуголь, 1979. – 28 с.

61. Полухин, В.А. Зависимость длины разгрузочных полостей от глубины проведения горных выработок / В.А. Полухин, Н.С. Хапилова // Горный журнал. Изв. вузов. – 1989. – №12. – С. 14-19.

62. Костамапов, А.И. Устойчивость подготовительных выработок при раз­работке свиты пологих пластов / А.И. Костамапов, К.Ф. Сапицкий. – М.: Не­дра, 1987. – 119 с.
63. Черняк, И.Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок / И.Л. Черняк. – М.: Не­дра, 1987. – 237 с.
64. Нацанерус, П.А. Исследование, прогноз и борьба с пучением почвы в подготовительных выработках / П.А. Нацанерус, И.Н. Кайдо, А.Н. Златицкий // Уголь. – 1991. – №4. – С. 59-60.
65. Мусиенко, В.Н. Параметры и технология охраны выемочных штреков разгрузкой приконтурного массива камуфлетным взрыванием / В.Н. Мусиенко // Совершенствование технологии производства на шахтах Донбасса : Сб. науч. тр. / Донецк. ДонУГИ. – Донецк, 1987. – С. 80-83.
66. А.с. 1479663 СССР, МПК E21D13/02, E21C41/04. Способ охраны пла­стовой выработки / В.С. Пихевкин, В.А. Дрибан, А.Е.Видулин, С.И. Дзигора; Ук­раинский филиал ВНИМИ. – № 4297818; заявл. 18.08.1987; опубл. 15.05.1989, Бюл. №18 – 3 с.
67. А.с. 1263868 СССР, E21 D 11/00. Способ управления напряженным со­стоянием пород вокруг выработки / Г.В. Бабиюк, В.В. Литвинов – № 3821040; за­явл. 05.12.84; опубл. 15.10.86, Бюл №38. – 2 с.
68. Касьян, Н.Н. Особенности сдвижения породного массива в зоне ведения ремонта горных выработок / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно // Наукові праці УКРНДМІ НАН України. – Донецьк, УКРНДМІ НАН України, 2012. – Вип. 10. – С. 296-308.
69. Ворожинцев, А.И. Способ щелевой разгрузки контуров подготовитель­ных и нарезных выработок от напряжений / А.И. Ворожинцев // Совершенство­вание техники и технологии гидродобычи угля: Сб. науч. тр. / [редакционная колле­гия: И.И. Арапов и др.] ; Министерство угольной промышленности СССР, Всесо­юзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт добычи угля гидравлическим способом (ВНИИГидроуголь). – Новокузнецк: ВНИИГидро­уголь, 1986. – С. 32-36.

70. Технологические схемы проведения, крепления и охраны выработок, сохраняемых позади очистного забоя на пологих и наклонных пластах Донбасса. – Донецк: ДонУГИ, 1984. – 73 с.

71. Болгожин, Ш.А. Поддержание пластовых выработок на большой глубине / Ш.А. Болгожин, Г.Д. Лезин, Т.К. Ищанов. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 103 с.

72. Дрижд, Н.А. Совершенствование способа управления труднообрушаемой кровлей / Н.А. Дрижд, А.Н. Тельгарин, Ю.А. Векслер / Горное давление в капитальных и подготовительных выработках: Сб. науч. тр. / Новосибирск: СО АН СССР. – Новосибирск, 1983. – С. 90-92.

73. Шишкин, В.П. Разупрочнение пород кровли гидромикроторпедированием / В.П. Шишкин, Л.М. Гусельников // Уголь. – 1981. – №11. – С. 27-29.

74. Кузнецов, С.Т. Разупрочнение труднообрушаемых кровель угольных пластов / С.Т. Кузнецов [и др.]. – М.: Недра, 1987. – 200 с.

75. Худин, Ю.Л. Бесцеликовая отработка пластов / Ю.Л. Худин, М.И. Устинов, А.В.Брайцев. – М.: Недра. – 1983. – 280 с.

76. Жулин, Ю.А. Результаты экспериментальной проверки способа охраны выработок отсечными скважинами / Ю.А. Жулин // Совершенствование технологии добычи угля на шахтах Донбасса : Сб. науч. тр. / Донецк. ДонУГИ. – Донецк, 1986. – С. 120-126.

77. Селезень, А.Л. Поддержание выработок в разгруженных отсечными скважинами породах / А.Л. Селезень, А.И. Марков, Ю.А. Жулин // Уголь Украины. – 1989. – №7. – С. 11-12.

78. Неборский, В.М. Разупрочнение кровли способом направленного гидро-разрыва пород вкрест напластования / В.М. Неборский, Е.В. Романов, П.Н. Васютинский // Уголь. – 1989. – №1. – С. 24-26.

79. Долгий, Е.И. Пути сокращения затрат на поддержание повторно используемых выработок при бесцеликовой отработке пластов / Е.И. Долгий, А.К. Горенюк, А.А. Сизякин // Уголь. – 1990. – №7. – С. 48-50.

80. Жарипов, Н.Х. Физико-химический способ ослабления труднообрушаемой кровли / Н.Х. Жарипов, Р.К. Атыгаев, К.Д. Ли // Добыча угля подземным способом. – М.: ЦНИЭИуголь, 1988. – Вып. 16. – 15 с.

81. Гладкий, Н.Л. Управление состоянием горного массива путем разупрочнения песчаника / Н.Л. Гладкий // Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского.– М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1986. – Вып. 244. – С. 79-83.

82. Васенина, Л.Э. Разупрочнение пород химически активными веществами как мера борьбы с динамическими проявлениями горного давления / Л.Э. Васенина, О.С. Нурбосынова, Г.Г. Берлаг // Разработка полезных ископаемых: Горношахтн. семин. / Ухта, 1988. – С. 121-124.

83. Атыгаев, Д.К. Основные параметры физико-химического разупрочнения пород труднообрушаемой кровли / Д.К. Атыгаев // Совершенствование средств и технологии разработки угольных пластов Карагандинского Бассейна / Караганда. КНИУИ. – Караганда, 1987. – С. 92-98.

84. Пат. DE2434408 ФРГ, МПК E21B10/32, E21B43/29, E21B43/30, E21C41/18, E21F13/04 Verfahren und vorrichtung zur gewinnung von mineralien / Van Eek Wouter Hugo, Boers Henry Marie, Gruppung Josephus Arnold Wille, Rehm Willem Christian, An Wamelen Pieter Jacobus Joh. - № DE19742434408; заявл. 17.07.73; опубл. 17.07.74.

85. Васильев, В.В. Физико-химическое упрочнение горных пород в шахтах: Обзор / В.В. Васильев, В.Г. Волков, В.И. Левченко. – М.: ЦНИЭИуголь, 1985. – 57 с.

86. Катков, В.Г. Специальные способы проведения горных выработок / В.Г. Катков, Ю.В. Михайлов. – М.: МГОУ, 2001. – 298 с.

87. Хямяляйнен, В.А. Физико-химическое укрепление пород при сооружении выработок / В.А. Хямяляйнен, В.И. Митраков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1996. – 352 с.

88. Беляев, В.Ф. Механические и физико-химические способы укрепления горных пород / В.Ф. Беляев, А.В. Пестолов. – М.: Недра, 1967. – 256 с.

89. Васильев, В.В. Технология физико-химического упрочнения горных пород / В.В. Васильев, В.И. Левченко. – М.: Недра, 1991. – 267 с.
90. Анкерная крепь: Справочник / А.П. Широков [и др.] ; под общ. ред. А.П. Широкова. – М.: Недра, 1990. – 205 с.
91. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. И.о. НАН Украины. Ин-т геотех. механики; Отв. ред. О. И. Волошин. – Днепропетровск : Вільпо, 2002.– 372 с.
92. Геомеханика взаимодействия анкерной и рамной крепей горных выработок в единой грузонесущей системе [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Ю.Я. Чередниченко [и др.] – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2010. – 174 с.
93. Ставрогин, А.Н. Механика деформирования и разрушения горных пород / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1992. – 224 с.
94. Griffith, A. The theory of rupture / A. Griffith // Proc. First Int. Congr. Appl. Mech. Delift. – 1924. – P. 55 – 63.
95. Griffith, A. The Phenomena of Rupture and flow in solids / A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. – 1921. – V. 221, № 2. – P. 163-198.
96. Orowan, E. Fracture and strength of solids / E. Orowan // Reports Progn. Phys. – 1948 – 49. – №12. – P. 185-232.
97. Orowan, E. Fundamentals of brittle behavior of metals / E. Orowan // Fatigue and Fracture of metal Wiley. – New York. – 1950. – P. 139-167.
98. Баренблатт, Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении / Г.И. Баренблатт // Журн. прикл. механики и техн. физики. – 1961. – № 4. – С. 3-56.
99. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М. : Высшая школа, 1980. – 368 с.
100. Журков, С.Н. К вопросу о физической природе прочности / С. Н. Журков // Физика твёрдого тела. – 1980. – № 22. – С. 3344-3349.
101. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твёрдых тел / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1957. – № 11. – С. 78-85.

102. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1968. – № 3. – С. 46-52.
103. Irwin, G. Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate / G. Irwin // J. App. Mech. – 1957. — №3. – P. 361-364.
104. Каминский, А.А. Механика разрушения полимеров / А. А. Каминский, Д. А. Гаврилов. – Киев : Наукова думка, 1988. – 224 с.
105. Леонов, М.Я. Упрощенная модель хрупкого тела / М. Я. Леонов // Инф. бюл. научн. совета по пробл. «Научные основы прочности и пластичности». — 1960. – № 1. – С. 85-92.
106. Новожилов, В.В. К основам равновесных трещин в хрупких телах / В.В. Новожилов // Прикл. математика и механика. – 1969. – 33. – № 5. – С. 797–812.
107. Новожилов, В.В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности / В.В. Новожилов // Прикл. математика и механика. – 1969. – 33. – № 2. – С. 212-222.
108. Панасюк, В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В.В. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1968. – 246 с.
109. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения: Основы механики разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 352 с.
110. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е. М. Морозов. – М.: Наука, 1974. – 416 с.
111. Работнов, Ю.Н. Механика разрушения / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
112. Алексеев, А.Д. Предельное состояние горных пород. / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев – К.: Наукова думка, 1982. – 200 с.
113. Алексеев, А.Д. Экспериментальные исследования вязкости скольжения хрупких тел / А.Д. Алексеев, В.Н. Ревва // ФХММ. – 1980. – №2. – С. 105-106.

114. Алексеев, А.Д. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений / А.А. Алексеев, В.Н. Ревва, Н.А. Рязанцев. – К.: Наукова думка, 1989. – 168 с.

115. Научное открытие № 123. Закономерность разрушения пористых газонасыщенных тел при циклическом гидродинамическом воздействии [Текст] / К.К. Софийский, Е.Г. Барадудин, Э.И. Мучник, В.Г. Александров, Е.А. Воробьев // Научные открытия: Сборник кратких описаний. – 1999. – Вып. 2; – М. – Санкт-Петербург. – 2000. – С. 36-38.

116. Булат, А.Ф. Фракталы в геомеханике / А.Ф. Булат, В.И. Дырда. – К. : Наукова думка, 2005. – 358 с.

117. Булат, А.Ф. Фрактальная природа углепородных массивов / А.Ф. Булат, В.В. Лукинов, В.В. Репка // Уголь Украины. – 1993. – №9. – С. 37-39.

118. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.

119. Литвинский, Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов : монография / Г.Г. Литвинский. – Донецк: Норд–Пресс, 2008. – 207 с.

120. Экспериментальная техника для исследования предельных состояний горных пород / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, Т.П. Асеева [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1993. – Т.3. – №3. – С. 135-145.

121. Алексеев, А.Д. Изменение трещиновато-пористой структуры и газопроницаемости угля в условиях неравномерного объемного сжатия / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев, Г.П. Стариков // Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: ИГД, 1990. – С. 19-23.

122. Христианович, С.А. Внезапные выбросы угля (породы) и газа. Напряжение и деформации / С.А. Христианович, Р.П. Солганик. – М.: ИПМ СССР (препринт № 153), 1980. – 87 с.

123. Черепанов, Г.П. Механика разрушения горных пород в процессе бурения / Г.П. Черепанов. – М.: Недра, 1987. – 308 с.

124. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

125. Иоффе, А.Ф. Деформация и прочность кристаллов / А.Ф. Иоффе, М.В. Кирпичев, А.И. Левитская // Журнал русского физико-химического общества. – 1924. – № 22. – С. 286-293.
126. Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин: сб. ст. / под ред. А.Ю. Ишлинского, Г.Г. Черного. – М., Мир, 1981. – 254 с.
127. Никифоровский, В.С. Динамическое разрушений твердых тел / В.С. Никифоровский, Е.И. Шемякин. – Новосибирск: Наука, 1979. – 271 с.
128. Weisinger, R. K_{Ic} and J-resistance-curve measurements on Nevada tuff / R. Weisinger, L. Costin, T.I. Luts // Exp. Mech. – 1980. – V. 20, N. 2. – P. 68-72.
129. Исследование развития трещин в горных породах: сб. ст. / под ред. Ш.А. Мамбетова. – Фрунзе: Илим, 1973. – 76 с.
130. Эдельштейн, Е.И. Теоретические и экспериментальные исследования механизма разрушения горных пород / Е.И. Эдельштейн, Р.М. Эйгелес, Ю.Я. Эстрим [и др.] // Проблемы механики горных пород : Материалы первой Всесоюзн. научн. конф. по механике горных пород. – Алма-Ата: Наука, 1966. – С. 473 – 482.
131. Ильюшин, А.А. Об одной теории длительной прочности / А.А. Ильюшин // Инж. журн. Механика твердого тела. – 1967. – № 3. – С. 21-35.
132. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : ГОСТ 25.506-85. – Введ. 1986–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 38 с. – (Государственный стандарт СССР).
133. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : ГОСТ 29167-91. – Введ. 1992–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 17 с. – (Государственный стандарт СССР).
134. Dugdale, O.S. Yielding of steel sheets containing slits / O.S. Dugdale // J.Mech. and Phys. Solids. – 1960. – 8, N 2. – P. 85-90.
135. Леонов, М.Я. Розвиток найдрібніших тріщин в твердому тілі / М.Я. Леонов, В.В. Панасюк // Прикл. механіка. – 1959. – № 4. – С. 391-401.
136. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений / Г.А. Соболев. – М.: Наука, 1993. – 314 с.

137. Стан технології та обґрунтування умов руйнування суцільного середовища гірських порід і будівельних конструкцій / М.Р. Шевцов, С.О. Калякин, І.В. Купенко [и др.] // Проблеми гірського тиску. Донецьк: ДонНТУ, 2009. – №17. – С. 226-249.
138. Светлов, Б.Я. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ / Б.Я. Светлов, Н.Е. Яременко. – М.: Недра, 1966. – 232 с.
139. Пат. 2026987 Российская Федерация, МПК⁶ E 21 C 37/00. Способ ведения буровзрывных работ / В.Г. Лабейш, О.Н. Кирсанов; заявитель и патентообладатель В.Г. Лабейш, О.Н. Кирсанов. – № 5039335/03; заявл. 24.03.1992; опубл. 20.01.1995, Бюл. № 27. – 3 с.
140. Новые методы разрушения горных пород: учеб. пособие для вузов / М.А. Емелин [и др.] – М.: Недра, 1990. – 290 с.
141. Звягинцев, Л.И. Совершенствование технологии выемки блоков известняков на карбонатных месторождениях / Л.И. Звягинцев, В.И. Супрун, А.П. Бульбашев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2001. – №2. – С. 126-130.
142. Латышев, Л.И. Инженерное решение как критерий отбора / Л.И. Латышев // Изобретатель и рационализатор. – 1996. – №6. – С. 28-30.
143. Лебедев, Ю.А. Добыча гранитных блоков в ЮАР / Ю.А. Лебедев, А.К. Горьков, А.Б. Макаров // Горный журнал. – 1996. – №6. – С. 43-44.
144. Алимов, О.Д. Экспериментальные исследования безвзрывного раскола природного камня с адаптивными рабочими органами / О.Д. Алимов, М.Т. Мама-саидов, А.Я. Хохлов // Физико-технические проблемы полезных ископаемых. – 1990. – №3. – С. 52-57.
145. Клишин, В.И. Способы и технические средства невзрывного разрушения горных пород растягивающими усилиями / В.И. Клишин, Ю.М. Леконцев, А.В. Новик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, 2000. – №10. – С. 70-72.
146. Латышев, О.Г. Прогнозирование эффективного использования поверхностно-активных веществ в процессе механического разрушения горных пород /

О.Г. Латышев, В.П. Рыбак // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2000. – №4. – С. 234-236.

147. Разрушение горного массива взрывоимпульсным действием / отв. ред. А.В. Докунин. АН СССР, ИГД им. А.А. Скочинского, Мин-во угольной промышленности СССР. – М.: Недра, 1974. – 228 с.

148. Муравин, Б.Г. Гидравлические методы дробления горных пород / Б.Г. Муравин, А.В. Бурштейн, Я.В. Симкин // Механизация строительства. – 1982. – №7. – С. 55-58.

149. Пат. 2182969 Российская Федерация, МПК⁶ Е 21 С 37/00. Способ беспламенного разрушения твердых тел и устройство для его осуществления / Б.А. Адамович, А.Г. Дебичев, В.И. Дудов [и др.]; заявитель ЗАО Промышленно-инвестиционная компания «Ресурспроминвест». – № 2000122639/03; заявл. 31.08.2000; опубл. 27.05.2002, Бюл. № 9. – 3 с.

150. Булавкин, А.А. Технологические комплексы на базе гидроагрегата УСВД-3500 для контурной резки камня / А.А. Булавкин, И.М. Семешин, М.Г. Шеметов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2000. – №3. – С. 105.

151. Шустов, Н.В. Взрывогидравлический способ разрушения твердых пород / Н.В. Шустов. – М.: Недра. 1968. – 48 с.

152. Автоматизированная экспериментальная установка для термической резки горных пород в массиве и результаты ее производственных испытаний / И.П. Голдаев, Н.Н. Попов, В.В. Спесивцев [и др.] // Термические методы разрушения горных пород : Труды II Всесоюзной науч.-техн. конф. Днепропетровск. Ч. IV. – Киев: Наукова думка, 1972. – С. 100-103.

153. Осадчих, В.Н. Результаты опытно-промышленной резки скальных массивов в условиях строительства ДНЕПРОГЭС-2 / В.Н. Осадчих, В.П. Черепанов, К.А. Захваткин // Термические методы разрушения горных пород : Труды II Всесоюзной науч.-техн. конф. Днепропетровск. – Ч. IV. – Киев: Наукова думка, 1972. – С. 76-77.

154. Менжулин, С.Е. Наведенная трещиноватость, разупрочнение и разрушение горных пород при СВЧ нагреве / С.Е. Менжулин, Н.В. Соколова, А.И. Шишов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, 2001. – №2 –С. 126-130.

155. Назаров, П.Ч. Технология направленного раскола крупных отдельных и дробления негабаритов электроразрядным методом на карьерах природного камня / П.Ч. Назаров, Г.Л. Левковский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, – 2000. – №9 – С. 129.

156. Комбинированное разрушение массива на основе электрофизического отрыва / А.В. Долголаптев, Ю.Д. Вороновский, С.С. Красновский [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, 2000. – №10 – С. 88.

157. Орешкин, В.А. Испытание расширяющихся составов для добычи блоков мрамора на Газганском месторождении / В.А. Орешкин // Экспресс-информация ВНИИЭСМ. Сер. Т. Промышленность нерудных и неметаллорудных материалов. – 1984. – Вып. 12. – С. 10-13.

158. Осин, В.В. Негашенная известь. / В.В. Осин. – М.: Стройиздат, 1954. – 364 с.

159. Mehta, P.K. Mechanism of expansion associated with ettringite formation / P.K. Mehta // Cement and concrete res. – 1973. – Vol. 3. – P. 1 – 6.

160. Mehta, P.K. Effect of line on bydcation of peates containing gepsium and calceium aluminatos or calcium sulfoaluminate / P.K. Mehta // J. amer. cer. soc. – 1973. - № 56. – P. 315-319.

161. Шейкин, А.Е. Безусадочный цемент / А.Е. Шейкин, Т.Ю. Якуб. – М.: Госстроймандат, 1966. – 103 с.

162. Сиверцев, Г.Н. Расширяемость цементов / Г.Н. Сиверцев, А.И. Лапина, Л.В. Никитина // Совершенствование методов исследования цементного камня и бетона. – М.: Стройиздат, 1968. – 70 с.

163. Исследование физико-химических процессов при гидратации и твердении расширяющихся цементов / В.И. Бабушкин, Л.И. Мокрицкая, С.П. Новикова

[и др.] // Шестой международный конгресс по химии цемента. – М. : Стройиздат, 1976. – Т. 3. – С. 187-188.

164. Lafuma, H. Expansive Cements / H. Lafuma // The Third International Symposium on the Chemistry of Cement. – London: Cement and Concrete Association, 1952. – P. 581 – 597.

165. Средства статического разрушения/ Юкинори Ямадзаки // Сэкко то сэккай, Gyps and Lime. – 1987. – № 208. – С. 175-183.

166. Expansion mechanism and hydration of expansive cement / Yamadsaki Y., Kamiaka H., Kobayashi S., Hirose T. // Rev. 34th Gen. Meet Cem. Assoc. Jap. Techn. Sess. – Tokyo, 1980. – P. 59-61.

167. Кавано, Тошио Невзрывные средства разрушения / Тошио Кавано // Сэкко то сэккай, Gyps and Lime. – 1982. – № 175. – С. 11-48.

168. Михайлов, В.В. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции / В.В. Михайлов, С.А. Литвер. – М.: Стройиздат, 1974. – 330 с.

169. Mather, B. A discussion of the paper «Mechanism of expansion associated with ettringite formation» by P.K. Metha / B. Mather // Cement and concrete research. – 1973. – Vol. 3. - № 5. – P. 651-652.

170. Hanson, W.C. A discussion of the paper «Mechanism of expansion associated with ettringite formation» by P.K. Metha / W.C. Hanson // Cement and concrete research. – 1973. – Vol. 3. - № 5. – P. 655-656.

171. Кравченко, К.В. Расширяющиеся цементы / К.В. Кравченко. – М.: Госстройиздат, 1962. – 164 с.

172. Кузнецова, Т.В. Напрягающие цементы / Т.В. Кузнецова // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. – 1982. – Т. 27. - № 5. – С. 20 (500) – 24 (504).

173. Кузнецова, Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы / Т.В. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с.

174. Сегалова, Е.Е. Роль величины перенасыщения в формировании кристаллизационных структур твердения / Е.Е. Сегалова, Е.А. Амелина, П.А. Ребиндер // Коллоидный журнал. – 1963. – Т. 25. - № 2. – С. 229-233.

175. Шабанова – Амелина, Е.А. Влияние дисперсности на конечную прочность структур твердения в зависимости от растворения исходного вяжущего / Е.А. Шабанова-Амелина, Е.Е. Сегалова, П.А. Ребиндер // Коллоидный журнал. – 1963. – Т. 25. - № 3. – С. 221-228.

176. Красильников, К.Г. Природа объемных деформаций при твердении расширяющихся цементов / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина // Физико-химическое исследование цементного камня и бетона. Труды НИИЖБ. – М., 1972. – Вып. 7.

177. Красильников, К.Г. Расширяющийся портландцемент с добавкой СаО // К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, А.И. Лапшина // Физико-химические исследования цементного камня и бетона. Труды НИИЖБ – М, 1972. – Вып. 7.

178. Никитина, Л.В. Зависимость между условиями кристаллизации этtringита и развитием деформаций расширения при твердении сульфитосодержащих цементов / Л.В. Никитина, А.И. Лапшина, К.Г. Красильников // Физико-химические исследования камня и бетона. Труды НИИЖБ. – М., 1972. – Вып. 7.

179. Красильников, К.Г. Физикохимия процессов расширения цементов // К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская // Шестой международный конгресс по химии цемента. – М., 1976. – Т. 3. – С. 173-179.

180. Красильников, К.Г. Физикохимия собственных деформаций цементного камня // К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская. – М.: Стройиздат, 1980. – 256 с.

181. Ребиндер, П.А. Физико-химические представления о механизме схватывания и твердения минеральных вяжущих веществ / П.А. Ребиндер // Труды совещания по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1956. – С. 125-137.

182. Огороков, С.Д. К вопросу о механизме «коллоидации» по А.А. Байкову при твердении вяжущих веществ / С.Д. Огороков // Труды совещания по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1956. – С. 173-182.

183. Составы для безвзрывного разрушения старого бетона / В.В. Галкин, В.В. Михайлов, Л.И. Будагянц [и др.] // Бетон и железобетон. – 1986. – № 6. – С. 16-17.

184. Заявка 62-59687 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Статическая разрушающая добавка и способ ее применения / Ханада Мицуо, Накадзава Содзо, Сирон Такэси; заявитель Йосидзава сэккай когэ х.к. – № 60 – 198775; заявл. 09.09.85; опубл. 16.03.87.

185. Заявка 58-11048 Япония, МКИ В 02 С 19/18. Добавка для разрушения бетона или горной породы / Сато Масао, Кинасита Небу; заявитель Сумимото сэ-мэнто х.к. – № 56 – 107594; заявл. 11.07.81; опубл. 21.01.83.

186. Заявка 57-119850 Япония, МКИ В 02 С 19/10, Е 04 с 23/08. Композиция для разрушения бетона, дорожного покрытия и т.п. / Яксихара Акио, Мива Мотому; заявитель Тала Сюити и Асахи дэпка коге к.к. – № 56 – 5779; заявл. 16.01.81; опубл. 26.07.82.

187. Заявка 58 – 76149 Япония, МКИ В 02 С 13/10. Разрушающая добавка для шлаковых отвалов накипи и бетона / Ханада Мицуо, Касавара Тосихиро, Вун-ре Синсбуг; заявитель Йосидзава сэккай коге к.к. – № 56 – 172962; заявл. 30.10.81; опубл. 09.10.83.

188. Заявка 59 – 45379 Япония, МКИ С 09 К 3/00, Е 04 23/08. Композиция для разрушения хрупких материалов и способ ее применения / Хироко Конкити; заявитель Дэнки кагаку когэ.к. – № 57 – 155615; заявл. 07.09.82; опубл. 14.03.84.

189. А.с. 1414820 СССР, МКИ С 04 В 7/345. Разрушающий материал / Т.Г. Габададзе, К.Ш. Суладзе, В.Г. Сихарулидзе, Р.Э. Схвиаридзе; заявитель Грузинский политехнический институт. – № 4212199/29-33; заявл. 07.01.87; опубл. 07.08.88, Бюл. № 29. – 4 с.

190. Japanese Application Publication P 57-136954, В 02 С 19/18. Crushing agent / Nishihara Akio, Miwa Motomu, Tada Shiyuichi; Asahi Denka Kogyo Kk., Priority Jp (1981) - 23509 A. 19.02.81, Published on 24.08.82.

191. Невзрывчатое разрушающее вещество / Г.В. Кузнецова, Д.А. Розман, Т.В. Мингазутдинова [и др.] // Труды ВНИИ цементной промышленности. – 1985. – № 83. – С. 118-121.

192. Розман, Д.А. Новое невзрывчаое разрушающее вещество / Д.А. Розман // Экспресс-информация ВНИИЭСМ. Сер. Т. Промышленность нерудных и неметаллорудных материалов. – 1987. – Вып. 6. – С. 19-21.

193. Пащенко, А.А. Невзрывной разрушающий материал на основе пассивированного оксида кальция / В.А. Пащенко, Т.В. Кузнецова, А.И. Дмитриев [и др.] // Труды МХТИ. – 1985. – № 137. – С. 61-65.

194. А.с. 1204591 СССР, МКИ С 04 В 7/38. Сырьевая смесь для получения разрушающего материала / А.А. Пащенко, Т.В. Кузнецова, Е.А. Мясникова, Ю.Р. Евсютин, М.М. Салдугей, В.В. Токарчук, А.М. Салдугой; заявитель Киевский политехнический институт. – № 3713806/29 – 33; заявл. 07.03.84 ; опубл. 15.01.86, Бюл. № 2. – 3 с.

195. А.с. 1209637 СССР, МКИ С 04 В 7/17. Разрушающий материал / А.А. Пащенко, А.Д. Дмитриев, Т.В. Кузнецова, Ю.Р. Евсютин, Е.А. Мясникова, В.А. Свицерский, М.М. Салдугай, А.И. Повзьяк, Д.А. Резман, В.А. Шевченко, С.И. Иващенко; заявитель Киевский политехнический институт. – № 3540711/29-33; заявл. 02.12.82 ; опубл. 07.02.86, Бюл. № 5. – 6 с.

196. Заявка 59-226084 Япония, МКИ С 09 3/00, В 02 С 13/18. Разрушающая добавка / Такания Конти, Накасими Кэйта; заявитель Син-Ниппон кагаку коге к.к. – № 58-100266; заявл. 03.07.83, опубл. 19.12.1984.

197. Заявка 60-40179 Япония, МКИ С 09 К 3/00, Е 21 С 37/00. Композиция для разрушения материала / Сато Накао, Сато Кунио; заявитель Сумимото сиханте к.к. – № 58-147950; заявл. 15.08.83; опубл. 02.03.85.

198. Заявка 63-92684 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Статическая расширяющаяся разрушающая добавка / Ватабэ Кадзутака; заявитель Асами касэй кога к.к. – № 61-23797; заявл. 07.01.86; опубл. 23.04.88.

199. Заявка 60-15480 Япония, МКИ С 03 К 3/00; Разрушающая добавка и способ ее получения / Кобаяск Кадзунти; заявитель Отака Акии Уба Косан к.к. – № 58-123769; заявл. 06.07.83; опубл. 26.01.85.

200. Заявка 58-141216 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка для хрупких материалов, например, бетона / Хакада Мицуо; заявитель Йосидзава секкай когэ к.к. – № 57-22038; заявл. 16.02.82; опубл. 22. 08.83.

201. Заявка 57-190667 Япония, МКИ В 02 С 19/18. Средство для разрушения каменных материалов / Судзукава Сити, Кабаяси Ваити, Оттока Аки; заявитель Убэ Косэн к.к. – № 56-7195; заявл. 19.05.83; опубл. 24.11.82.

202. Николаев, М.И. Рациональные методы применения невзрывчатых разрушающих средств / М.И. Николаев // Строительные материалы. – 1987. – № 10. – С. 23-24.

203. Заявка 63 – 33488 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Способ и быстродействующий материал для статистического разрушения / Ханада Мицуо, Вахадзава Садзо, Вупре Синобу, Ханэда Хироси, Ятэда Сигэру; заявитель Йосидзава сэккай коге х.к. – № 61 – 177431; заявлено 28.07.86; опубл. 13.02.88.

204. Заявка 61-72038 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка / Ямадзаки Юкинори, Бик Тадао, Сирсенэ Хисаси, Ямагути Осаму; заявитель Ниппон симэнто к.к. – № 59-194046; заявл. 18.09.84; опубл. 14.06.86.

205. Заявка 61-72079 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка / Ямадзаки Юкинори, Охата Такаси, Накасима Юдзи, Окраоне Хисаси; заявитель Килнок сэмэнто к.к. – № 59 – 194047; заявл. 18.09.84; опубл. 14.06.86.

206. Заявка 62-149783 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая композиция / Хидака Рокуро; заявитель Андо Осака сэмэнто к.к. – № 60-201578; заявл. 24.12.85; опубл. 03.07.87.

207. Заявка 39-120675 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Добавка для разрушения хрупких материалов / Ямадзаки Юкинори, Соми Тадао, Сиро Ионахиса, Накадзима Юдзи, Манаго Такуси; заявитель Нихок сэмэнто к.к. – № 57-227372; заявл. 28.12.82; опубл. 12.07.84.

208. Волженский, А.В. Состав пережженной извести и причины пережога / А.В. Волженский, В.Н. Виноградов // Строительные материалы. – 1961. – № 6. – С. 30-32.

209. Табунщиков, В.П. Физико-химические основы процесса обжига карбоната кальция / В.П. Табунщиков // Исследование шахтных известково-обжигательных печей. – М. – Л.: «Химия», 1964. – С. 41- 68.

210. Волженский, А.В. Влияние размера кристаллов окиси кальция и температурных условий на скорость гидратации извести / А.В. Волженский, В.Н. Виноградов // Изв. вузов «Строительство и архитектура». – 1965. – С. 67-71.

211. Заявка 60-32879 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка для хрупких материалов, включающая доменный шлак / Кавамура Хироки. – № 58-139359; заявл. 01.08.83; опубл. 20.02.85.

212. Заявка 58-142957 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Композиция для разрушения хрупкого материала / Иногути Юкиот; заявитель Мицуи ходзай к.к. – № 57-24460; заявл. 19.02.82; опубл. 25.08.83.

213. Заявка 60-32878 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка для крупного материала / Киба Кейтира, Мияка Тойдзиро, Уэдзи Ясуси, Накада Хирохико; заявитель Мицуи ходзай к.к. – № 58-139758; заявл. 01.08.83; опубл. 20.02.85.

214. Заявка 60-26080 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/10. Композиция для разрушения материалов / Фудзиока Исами, Кибаси Такаюки, Киада Кадзутоси; заявитель Сэнтотару гарасу к.к. – № 58-132822; заявл. 22.03.83; опубл. 08.02.85.

215. Заявка 60-110778, Япония, МКИ с 09 к 1/00, в 02 с 19/10. Состав для разрушения скальных пород / Фудэкака Исами, Исибаси Такаюки, Имада Кадаутоси, Нисимура Нотоясу; заявитель Сэнтотару гарасу к.к. – № 58-217898; заявл. 21.11.83; опубл. 17.06.85.

216. Пат. 4565579 США, МКИ С 04 В 2/0 НКИ 106/118². Nonexplosive chemical composition for gently breaking rock or concrete nase. / Fujiok Isani, Imada Kazutushi, Kishmura Motoyasu; заявитель Ishibashi Jakayuhli Cenral Glass Co., Ltd. – № US 06/545,695; заявл. 26.10.83; опубл. 21.01.86.

217. Заявка 59-78286 Япония, МКИ С 09 К 3/00. Химическая разрушающая композиция / Будзиока Исами, Имада Кадзутоси, Нисимура Мотолсу; заявитель Сэнторару гарасу к.к. – № 57-188238; заявл. 28.10.82; опубл. 07.05.84.

218. Заявка 58-87177 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 14/18. Композиция для разрушения бетона, горных пород и т.п. / Миуро Масахори, Нисикура Итолсу; заявитель Сэнторари гарасу к.к. – № 56-184426; заявл. 19.11.1981; опубл. 24.05.83.

219. Заявка 56-87178 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Композиция для разрушения бетона, горных пород и т.п. / Миура Масанори, Нисиура Нотолсу; заявитель Сэнторари гарасу к.к. – № 56-184427; заявитель заявл. 19.11.1981; опубл. 24.05.83.

220. Заявка 59-227969 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка и способ разрушения с ее помощью хрупких материалов / Инэуэ Госикацу, Нагаицу ацуя, Хосэке Ан; заявитель Мицусиси Каге сэмэнто к.х. – № 58-103740; заявл. 10.06.83; опубл. 21.12.84.

221. Пат. DD221992 ГДР, МКИ С04В2/02; С04В7/34; Е04G23/08 Expansivmittel zum zerstoeren von naturgestein und baumaterialien / Eckler Hans - Otto, Bergholz Wolfgang, Grosch Peter Deylig Waltraut, Korth Dietrich; заявитель BAUAKADEMIE DDR. – № 19830257336; заявл. 01.12.83, опубл. 08.05.85.

222. Заявка 58-154779 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 03 С 19/18. Средств для разрушения хрупких материалов / Токахаси Акио, Сайто Акира, Накагаки Сэйити; заявитель Дэнки кагаку когэ к.к. – № 57-37655; заявл. 10.03.82; опубл. 14.09.83.

223. Заявка 59-169877 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка для хрупкого материала / Накино Йосио, Какипума Тосиаки, Ивата Тохио, Ито Сакэдзуми, Хроса Такаеси; заявитель Мицубиси коге сэмэнто к.к. Фудзисава яхудзи коне к.к. – №58-33646; заявл. 28.02.83; опубл. 10.04.84.

224. Заявка 62-226843 Япония, МКИ С 04 В 2/04, С 01 Е 11/02. Способ регулирования скорости гашения негашеной извести / Аоки Кукитакэ, Кадокура То-

сио, Сучино Сабуро, Сайге фумикадзу; заявитель Титибу сэккай когэ к.к. – № 61-68214; заявл. 26.03.86; опубл. 05.10.87.

225. Заявка 62-226843 Япония, МКИ С 04 В 2/04, В 01 Е 11/02. Способ регулирования скорости гашения негашеной извести / Аоки Кукитакэ, Кадокура Тосио, Сучино Сабуро, Сайге фумикадзу; заявитель Титибу сэккай когэ к.к. – № 61-68214; заявл. 26.03.86; опубл. 05.10.87.

226. Заявка 60-81276 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/10. Расширяющийся таблетированный материал, обеспечивающий статическое разрушение хрупких материалов / Мацуо Сюдзи, Хирота Такао; заявитель Асахи касэй когэ к.к. – № 58-189216; заявл. 12.10.83; опубл. 09.05.85.

227. Заявка 60-81277 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Способ статического разрушения материалов и приготовления используемых для этого таблеток / Мацуо Сюдзи, Хирога Такао; Асахи касэй коге к.к. – № 58-189216; заявл. 12.10.83; опубл. 09.05.85.

228. Шпынова, Л.Г. Исследование свойств извести / Л.Г. Шпынова, С.К. Мельник, Я.Б. Якимечко // Строительные материалы. – 1985. – № 6. – С. 26-27.

229. Шпынова, Л.Г. Известковый материал для разрушения горных пород / Л.Г. Шпынова, Я.В. Якимечко // Строительные материалы и конструкции. – 1986. – № 2. – С. 1-11.

230. Заявка 61-85488 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Тонкомолотый материал, расширяющийся при гидратации / Сато Кадэуо, Ямути Кадзуо, Курсива Исабуро; заявитель Аса самэнтто к.к. – № 59-208887; заявл. 03.10.84; опубл. 01.05.06.

231. Заявка 58-225175 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 19/18. Средство для разрушения бетона или каменных пород / Ямадзаки Юкинори, Танака Кэндзо, Накадзима Юдзи, Сиро Йсиахиса; заявитель Ниппон симанто к.к. – № 57-106898; заявл. 23.06.82; опубл. 27.12.1983.

232. Japanese Application Publication JP 57-187044, В 02 С 19/18. Crushing agent / Aitou Akira, Nakatani Seiichi, Miwa Akira, Yagi Isao, Isogai Jiyun; Denki Kagaku Kogyo Kk., Priority JP (1981) – 71233 A. 12.05.81; Published on 17.11.82.

233. Заявка 59-75976 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Статическая разрушающая добавка / Санко Таксими, Дияна Сэйдаи, Танахоги Акио; заявитель Кэнки Кагату коге к.к. – № 57-186519; заявл. 23.10.84; опубл. 28.04.04.

234. Пат. 4477284 США, МКИ С 24 В 7/32, НКИ 106/104. Demolition agent for demolishing brittle materials / Asojai Jun, Nakaya Seilchi, Saitou Akira, Takahasi Akio, Yagi Isao; заявитель Denki Kagaku Regyo k.k. – № 447377; заявл. 07.12.82., опубл. 16.10.84.

235. А.с. 1189831 СССР МКИ С 04 В 7/00. Разрушающий материал / Л.Г. Шпынова, Л.В. Якимченко, И.И. Петрушка; заявитель Львовский политехнический институт. – № 3698569/29-33; заявл. 30.01.84; опубл. 07.11.85, Бюл. № 41. – 2 с.

236. А.с. 1217813 СССР, МКИ С 04 В 7/00. Разрушающий материал / Л.Г. Шпынова, Л.Б. Якимечко, М.А. Саницкий; заявитель Львовский политехнический институт. – № 3532361/29-33; заявл. 04.01.83; опубл. 16.03.86, Бюл. № 10. – 2 с.

237. А.с. 1114645 СССР, МПК 5 С 04 В 15/06. Невзрывчатый разрушающий состав / Л.Г. Шпынова, Я.Б. Якимечко, М.А. Саницкий, Х.С. Соболев; заявитель Львовский политехнический институт. – №3459317; заявл. 25.07.1982 ; опубл. 23.09.1984, Бюл. № 35 – 6 с.

238. А.с. 1251611 СССР, МПК Е 21 С 37/00. Способ направленного формирования трещин в массиве твердой среды / Е.М. Гарцуев, А.А. Хрипко, А.И. Штомпель; заявитель Стахановский филиал Коммунарского горно-металлургического института Минвуза УССР. заявл. 25.12.1984; опубл. 25.10.86.

239. Средство невзрывчатое разрушающее (НРС-1). Технические условия ТУ 21-53-22-87. – Изд. январь 1987. М.: МПСМ СССР, 1987. – 37 с.

240. Пат. 2035421 Российская Федерация. МПК⁶ С04В7/00, С04В38/02. Состав газовыделяющей сырьевой смеси, стержень и этой смеси и способ статического разрушения массивов или конструкций из хрупкого материала /

Ю.Л. Грамовский, Ю.А. Белов Ю.А., Ю.И. Седов; заявитель Научное проектно-строительное объединение "Монолит". – № 5047245/33; заявл. 09.04.1992; опубл. 20.05.1995, Бюл. № 7. – 8 с.

241. Заявка 93058105 Российская Федерация. МПК ⁶ E21C37/00, C04B7/34. Невзрывчатый разрушающий материал быстрого воздействия / Ю.Л. Грамовский, В.М. Захаров, Е.А. Кузнецов заявители Ю.Л. Грамовский, В.М. Захаров, Е.А. Кузнецов – № 93058105/03; заявл. 30.12.1993; опубл. 20.10.1996.

242. Пат. 246982 ГДР, МКИ С 04 В 7/34. Способ разрушения хрупких материалов / Н.О. Eckler, W. Bergholt, M. Peneyal, D. Korth; заявитель Banakademie der DDR. – № 2854807; заявл. 27.12.85; опубл. 24.06.87.

243. Пат. CS241200 ЧС, МПК C04B20/02, F42D99/00. Method of suspension preparation from mixture for solid systems disengagement / J. Siska, J. Supala, R. Fedorik, M. Miazdra, M. Pavlik, J. Sloboda, J. Sevcikova, H. Martauzova; заявитель J. Siska – № CS19830009330; заявл. 12.12.1983; опубл. 13.03.86.

244. Пат. CS248903 ЧС, МПК B02C19/18; C01F11/02. Inexplosive mixture for rigid systems disintegration with quick-acting effect / R. Fedorik, M. Miazdra, H. Martauzova, J. Siska, J. Sevcikova; заявитель R. Fedorik. - № CS19820006097; заявл. 20.08.1982; опубл. 12.03.87.

245. Rios Varguer Joine Практическое применение расширяющихся цементов для дробления и выемки пород / Joine Varguer Rios // Rocas y miner. – 1983. – 12 (№ 143). – P. 20-21, 24-26.

246. Невибухова руйнуюча речовина: ТУ У В.2.7-26.5-24478901-004:2007. [На заміну ТУ У БВ 2.7.00030937.089397]. Без обмеження терміну дії. – Харьков: Госстандарт. Харьк. центр стандартизації и аэрологии, 2007. – 14 с.

247. Пат. 59940 Украина, МПК 51 С 04 В 7/00. Невибухова руйнівна речовина НРР-80 / В.Ф. Грибко; С.В. Щепликін, А.В. Палей; заявитель В.Ф. Грибко – № 2002129862 ; заявл. 09.12.02 ; опубл. 15.07.05 , Бюл. №7. – 6 с. : ил.

248. Руководство по применению невзрывчатых разрушающих средств для разборки строительных конструкций и каменных горных пород. – Киев: ВНИИСтром им. П. П. Будникова Минстройматериалов СССР, 1988 – 48 с.

249. Пустобриков, В.Н. Разработка способа и обоснование параметров разрушения горных пород с использованием невзрывчатых разрушающих составов при низких температурах: [Текст] Дисс... докт. техн. наук: 25.00.22., 25.00.20 / Пустобриков Владимир Николаевич. – Владикавказ, 2005.– 268 с.

250. Долударева, Я.С. Обоснование рациональных параметров и конструкций шпуровых зарядов для снижения разупрочнения горных пород при направленном расколе: [Текст] Дисс... канд. техн. наук: 05.15.09. / Долударева Яна Станиславовна. – Кременчук, 2010. – 180 с.

251. Косолапов, А.И. Научные основы формирования технологических комплексов горных работ для разработки месторождений мрамора : [Текст] Дисс... докт. техн. наук: 05.15.09. / Косолапов Александр Иннокентьевич. – Красноярск, 1993. – 287 с.

252. Дарков, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С.Шпиро. – М.: Высшая школа, 1969. – 734 с.

253. Пат. № 2141563 Российская Федерация, МПК 6 E 21 C 37/00. Способ раскалывания каменных материалов невзрывчатыми разрушающими составами / А.Е. Азаркович, М.Б. Эткин; заявитель ООО «Гидроспецпроект». – № 97121553/03; заявл. 11.12.97; опубл. 20.11.99, Бюл. № 11.

254. Леше, А. Ядерная индукция / А. Леше. – М.: Иностранная литература, 1963. – 684 с.

255. Сместер, Н.П. Основы теории магнитного резонанса / Н.П. Сместер. – М.: Мир, 1967. – 324 с.

256. Слоним, И.Я. Ядерный магнитный резонанс в полимерах / И.Я. Слоним, А.Н. Любимов. – М.: Наука, 1966. – 339 с.

257. Уо Дж. Новые методы ЯМР в твердых телах / Дж. Уо. – М.: Мир, 1978. – 324 с.

258. Радиофизика в угольной промышленности / А.Д. Алексеев, В.Е. Зайденварг, В.В. Синолицкий [и др.]. – М.: Недра, 1992. – 184 с.

259. Алексеев, А.Д. Совершенствование УНТС с целью повышения точности измерений / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, И.А. Бойко // ФТВД. – 1987. – №25. – С. 23-28

260. Экспериментальная техника для исследования предельных состояний горных пород / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, Т.П. Асеева [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1993. – Т.3. – №3. – С. 135-145.

261. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – К.: Наукова думка, 1969. – 210 с.

262. Пат. 60794 Україна, МПК(2011.01) G01L 1/10, E21C 37/00. Стенд для випробувань невибухових руйнуючих речовин / М.М. Касьян, І.Г. Сахно; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – u 2010 15412; заявл.20.12.2010; опубл. 25.06.2011, Бюл. №12. – 6 с.: ил.

263. Кутателадзе, С.С. Анализ подобия и физические модели / С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, 1986. – 297 с.

264. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема [Текст]. – Введ. 1976-10-14. – М.: Госстрой СССР, 1976. – № 169.– 6 с.

265. ГОСТ 10181.1-81 Смеси бетонные. Методы определения удобоукладываемости. – Введ. 1982-01-01. – М.: Госстрой СССР, 1980. – № 228.– 6 с.

266. Курант, Р. Методы математической физики. В 2 т. Т. 1. / Р. Курант, Д. Гильберт. – М. – Л.: Гостехтеориздат, 1951. – 525 с.

267. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 539 с.

268. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

269. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг. – М.: Недра, 1974. – 368 с.

270. Амусин, Б.З. Метод конечных элементов при решении задач геомеханики / Б.З. Амусин, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 144 с.

271. Ержанов, Ж.С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород / Ж.С. Ержанов, Т.Д. Каримбаев. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 237 с.

272. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

273. Касьян, Н.Н. Моделирование структурно-неоднородных массивов горных пород с применением метода конечных элементов / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, С.Г. Негрей // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2008. – №5. – С. 49-52.

274. Сахно, И.Г. Численное моделирование геомеханических процессов с учетом их нелинейности / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2012. – №20-21. – С. 57-67.

275. Мельников, Н.В. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Н.В. Мельников, В.В. Ржевский, М.М. Протодяконов – М.: Недра, 1975. – 279 с.

276. Моделирование проявлений горного давления / Г.Н. Кузнецов [и др.] – Л., Недра, 1968. – 279 с.

277. Глушихин, Ф. П. Методические указания по рациональному планированию экспериментов для изучения проявления горного давления на моделях из эквивалентных материалов / Ф. П. Глушихин, М. Ф. Шклярский, В. Н. Павлов. – Л.: ВНИМИ, 1980. – 65 с.

278. Сахно, И.Г. Изучение динамики развития деформационных процессов и трещинообразования в породном массиве вокруг выработки поддерживаемой за лавой / И.Г. Сахно, Н.Н. Малышева, В.Е. Нефедов // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2014. – №6 (144). – С. 46-51.

279. Алексеенко, С.Ф. Основы моделирования при решении задач горной геомеханики / С.Ф. Алексеенко, А.Г. Заболотный, Л.А. Штанько. – К.: Техніка, 1996. – 173 с.

280. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования явления передачи давления от саморасширяющегося состава мелкофракционным дискретным материалом / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2009. – №17. – С. 180-191.

281. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования процесса передачи давления от заряда невзрывчатого разрушающего вещества в дискретной среде / И.Г. Сахно // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2012. – №1. – С. 241-249.

282. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы разрушенных горных пород при формировании из них несущей конструкции / И.Г. Сахно, Ю.А. Петренко, Н.А. Овчаренко // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2008. – №16. С. – 70-81.

283. Касьян, Н.Н. Лабораторные исследования особенностей повышения несущей способности разрушенных пород путем их распора / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, В.Д. Иващенко // XIV Międzynarodowe Sympozjum Geotechnika - Geotechnics 2010. – Gliwice-Ustron, Poland, 19-22 października, 2010. – С. 83-92.

284. Методические указания по исследованию горного давления на угольных и сланцевых шахтах. – Л.: ВНИМИ, – 1973. – 102 с.

285. Пат. 100069 Україна, МПК9 Е 21 С 39/00. Способ контроля состояния горной выработки [Текст] / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, В.М. Мокриенко; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № u 20101591; заявл. 11.02.2011; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21. – 4 с. : ил.

286. Касьян, Н.Н. Обоснование параметров способа контроля состояния горной выработки и методика его реализации / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, В.Н. Мокриенко // Научные труды УкрНИМИ НАН Украины. – Донецк, 2011. – Вып. 9. Ч. 1 – С. 57-79.

287. Приборы и аппаратура для исследования проявлений горного давления: справочник / Ш.М Билик [и др.] – М.: Углеиздат, 1958. – 365 с.

288. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих составов в условиях их предварительного сжатия / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – Донецк, 2011. – №19. – С. 109-123.

289. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования динамики роста давления саморасширения невзрывчатой разрушающей смеси в типичных деформационных режимах / И.Г. Сахно, А.В. Молодецкий // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2013. – №1 (22)-2(23). – С. 3-17.

290. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих веществ при фиксированном сопротивлении их объемному расширению / И.Г. Сахно // Проблемы гірського тиску. – Донецьк, 2010. – №18. – С. 135-149.

291. Сахно, И.Г. Деформирование и разрушение невзрывчатой саморасширяющейся смеси в твердой фазе при объемном нагружении / И.Г. Сахно, А.В. Молодецкий // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2013. – №2. Ч.2 – С. 73-80.

292. Касьян, Н.Н. Обоснование методов управления скоростью роста распорно-компрессионных характеристик невзрывчатых разрушающих веществ/ Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, Я.О. Шуляк // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2010. – №2. – С. 209-219.

293. Сахно, И.Г. Влияние температуры и теплофизических свойств материалов на скорость их разрушения при помощи невзрывчатых разрушающих составов / И.Г. Сахно // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 (8). С. 86-94. (наукометрична база «INDEX COPERNICUS»)

294. Изучение причин самопроизвольного выброса невзрывчатых разрушающих веществ из шпуров / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян, А.О. Новиков [и др.] // Разработка рудных месторождений: Сб. научн. трудов. – Кривой Рог, 2011. – Вип. 94. – С. 75-78.

295. Пат. 100767 Україна, МПК(2013.01) E21C 37/00. Спосіб руйнування гірських порід / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а2011 03298; заявл. 21.03.2011; опубл. 25.01.2013, Бюл. № 2. – 3 с.: ил.

296. Повышение давления саморасширения невзрывчатых разрушающих составов / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян, И.И. Клочко [и др.] // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 4/2012 (75). С. – 83-86. (наукометрична база «INDEX COPERNICUS»).

297. Исследование особенностей работы невзрывчатых разрушающих смесей в температурных полях характерных для подземных горных выработок / Н.Н. Касьян, О.К. Мороз, И.Г. Сахно [и др.] // IXV Jubileuzowe Miedzynarodowe Sympozjum Geotechnika-Geotechnics 2012, Materialy Naukowe. Czesc II: zagraniczna. – Gliwice-Ustron, Poland, 23-26 pazdernika, 2012. – С. 51-64.

298. Пат. 98053 Україна, МПК (2012.01) E21C 37/00. Спосіб руйнування твердих тіл / М.М. Касьян, І.Г. Сахно; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а201012929; заявл. 01.11.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7. – 4 с.: ил.

299. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования изменения скорости гидратации и фазового состояния саморасширяющихся смесей при воздействии электрического поля / И.Г. Сахно // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2013. – №1. – С. 263-269.

300. Пат. 100780 Україна, МПК(2006.01) E21C 37/18. Спосіб руйнування гірських порід / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а2011 05599; заявл. 04.05.2011; опубл. 25.01.2013, Бюл. № 2. – 4 с.: ил.

301. Пат. 100605 Украина, МПК E 21 C 37/00. Спосіб руйнування гірських порід / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а2011 06731; заявл. 30.05.11; опубл. 10.01.13, Бюл. № 1. – 4 с.: ил.

302. Сахно, И.Г. Лабораторные исследования комплексных невзрывчатых разрушающих смесей с добавками портландцементов / И.Г. Сахно, Н.Н. Малышева, А.А. Кириллова // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2012. – №1(30)-2(31). – С. 408-417.

303. Сахно, И.Г. Новая невзрывчатая разрушающая смесь для разрушения горных пород в условиях температурных полей подземных горных выработок / И.Г. Сахно, С.В. Борщевский, Я.О. Шуляк // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 1/2012 (72). Ч.1 – С. 116-120. (научно-метрична база «INDEX COPERNICUS»).

304. Пат. 102305 Україна, МПК (2013.01) C04B 37/00. Невибухова руйнуюча суміш / І.Г. Сахно, М.М. Касьян, Я.О. Шуляк, О.О. Кирилова; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а2011 14102; заявл. 29.11.2011; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 5 с.: ил.

305. Пат. 102158 Україна, МПК (2013.01) C04B 7/34 (2006.01) B02C 23/06 (2006.01) C09K 3/00. Невибухова руйнуюча суміш / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а201114387; заявл. 05.12.2011; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11. – 4 с.: ил.

306. Yoffe, E. The moving Griffith crack // Philos.Mag. – 1951. – V.42, N2.-P. 243-250.

307. Касьян, Н.Н. Особенности передачи давления, от стенок шпура, содержащего невзрывчатый разрушающий материал, вглубь породного массива / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, Я.О. Шуляк // Збірник наукових праць національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2010. – №34. Т.1 – С. 136-143.

308. Сахно, И.Г. Обоснование параметров разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих составов / И.Г. Сахно // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук.праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 93. – С. 245-253.

309. Сахно, И.Г. Исследование механизма направленного разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями / И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2013. – №6 (138). – С. 20-26. (наукометрична база SciVerse Scopus).

310. Сахно, И.Г. Направленное разрушение горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян // Гірничий вісник: Науково-технічний. збірник / ДВНЗ «Криворізький національний університет». – Кривий Ріг, 2013. – Вип. 96. – С. 16-20.

311. Пат. 95732 Україна, МПК(2006.01) E21C 37/10. Патрон невибухового руйнуючого матеріалу / І.Г. Сахно, М.М. Касьян, І.І. Клочко; заявитель и патентообладатель І.Г. Сахно, М.М. Касьян, І.І. Клочко – а 2010 07567; заявл.17.06.2010; опубл. 25.08.2011, Бюл. №16. – 6 с.: ил.

312. Пат. 100062 Україна, МПК (2006.01) E21C 37/06. Спосіб руйнування гірських порід невибуховими руйнуючимим складами й патрон для його реалізації / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а2011 00476; заявл. 17.01.2011; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21. – 5 с.: ил.

313. Пат. 98726 Україна, МПК E 21 D 9/00, E 21 C 37/00. Спосіб проведення гірничих виробок / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а2011 02300; заявл. 28.02.11; опубл. 11.06.12, Бюл. № 11. – 5 с. : ил.

314. Касьян, Н.Н. Применение невзрывчатых разрушающих составов при проведении выработок вслед за лавой / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук.праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 99. – С. 110-117.

315. Сахно, И.Г. Проведение выработок вслед за лавой с помощью невзрывчатых разрушающих составов [Электронный ресурс] / И.Г. Сахно, О.К. Мороз // XI Szkoła Geomechaniki 2013, Gliwice-Ustron, Poland, 15-18 października. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM): цв.; 12 см.

316. Сахно, И.Г. Восстановление сечения и ремонт горных выработок с помощью невзрывчатых разрушающих смесей / И.Г. Сахно // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы XII Международной конференции (Москва (Россия) – Занджан (Иран). – М.: РУДН, 2013. – Т. 1. – С. 150-152.

317. Сахно, И.Г. Восстановление эксплуатационного состояния горных выработок с помощью невзрывчатых разрушающих смесей / И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. –2012. – №5. (131). – С. 22-28. (наукометрична база SciVerse Scopus).

318. Пат. 99208 Україна, МПК E 21 D 11/00. Спосіб ремонту гірничих виробок / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; – № а201104658; заявл. 12.09.11; опубл. 25.07.12, Бюл. № 14. – 5 с. : ил.

319. Пат. 105324 Україна, МПК Е 21 D 11/00. Спосіб боротьби зі здиманням підосви гірничих виробок / Є.М. Халімендіков, О.В. Агафонов, О.О. Яйцов, Г.О. Дишлевой, В.І. Літвінов, І.Г. Сахно; заявитель и патентообладатель ПАТ «Донецьксталь – Металургійний завод». – № а201305530; заявл. 29.04.13; опубл. 25.04.214, Бюл. № 8 – 5 с. : ил.

320. Сахно, И.Г. Исследование особенностей деформирования породного массива, вмещающего выработку, закрепленную анкерной крепью / И.Г.Сахно, А.О. Новиков // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2007. – №1. С. 82-88.

321. Маттен, В. Заполнение закрепного пространства штреков природным ангидритом / В. Маттен, И. Зеегер, Х. Цильэссен // Глюкауф. – 1980. – №14. – С. 15-20.

322. Брайт, Ф. Заполнение пустот за рамами штрековой крепи методом Бул-флекс / Ф. Брайт, Ю.Крае // Глюкауф. – 1980. – №13 С. 12-17.

323. Инъекционное упрочнение горных пород / Ю.З. Заславский [и др.] – М.: Недра, 1984. – 176 с.

324. Изменение структуры и метаноносности углей под действием геодинамических и технологических факторов / В.Г. Гринев, Е.В.Ульянова, А.Н. Молчанов [и др.] // «Неделя горняка 2013» : Международный научный симпозиум. – М. : МГГУ, 2013.

325. Чирков, С.Е. Прочность горных пород при трехосном неравнокомпонентном сжатии / С.Е. Чирков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1976. – №1 – С. 11-17.

326. Касьян, Н.Н. Новый концептуальный подход к обеспечению устойчивости горных выработок / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2011. – №5 (125). – С. 70-75.

327. Пат. 96816 Україна, МПК Е 21 D 11/00, Е 21 D 21/00, Е 21 D 11/00. Спосіб кріплення гірничих виробок / М.М. Касьян, І.Г. Сахно; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а201000705; заявл. 25.01.10; опубл. 12.12.11, Бюл. № 23. – 8 с. : ил.

328. Зборщик, М.П. Повторное использование выработок высоконагруженных лав – крупный резерв снижения производственных затрат / М.П. Зборщик, И.Г. Сахно // Уголь Украины. – 2013. – №8 – С. 6-12.

329. Пат. 100993 Україна, МПК Е 21 D 20/02, Е 21 D 21/00. Спосіб кріплення гірничих виробок / М.М. Касьян, І.Г. Сахно; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а2010 04568; заявл. 19.04.10 ; опубл. 25.02.13, Бюл. № 4. – 4с. : ил.

330. Черняк, И.Л. Упрочнение пород в подготовительных выработках / И.Л. Черняк. – М.: Недра, 1993. – 256 с.

331. Сонин, С.Д. Борьба с пучением почвы горных выработок взрыванием камуфлетных зарядов / С. Д. Сонин, М.Н. Шейхет, И.Л. Черняк // Шахтное строительство. – 1961. – № 3. – С. 8-10.

332. Мельников, Н.И. Анкерная крепь / Н.И. Мельников. – М.: Недра, 1980. – 252 с.

333. Касьян, Н.Н. Повышение несущей способности разрушенных горных пород путем применения саморасширяющихся составов / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, С.Ю. Гладкий // Уголь Украины. – 2011 – №5.– С. 12-16.

334. Пат. 97588 Україна, МПК Е 21 D 11/00, Е 21 D 13/00. Спосіб кріплення гірничих виробок, пройдених у породах, схильних до здимання / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а201014051; заявл. 26.04.11 ; опубл. 27.02.12, Бюл. № 4. – 8 с. : ил.

335. Пат. № 104702 Україна, МПК Е 21 D 20/00, МПК Е 21 D 11/10. Спосіб підвищення стійкості підшви гірничої виробки / І.Г. Сахно, І.В. Назимко, Д.Д. Виговський, Д.Д. Виговська; заявитель и патентообладатель І.Г. Сахно. – № а2013 05066; заявл. 12.08.13; опубл. 25.02.14, Бюл. № 4 – 6 с. : ил.

336. Пат. 51574 Україна, МПК Е 21 D 11/00. Спосіб зміцнення гірських порід / М.М. Касьян, І.Г. Сахно, М.А. Овчаренко, О.А. Новіков, Ю.А. Петренко ; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № u 2010 00011; заявл.11.01.10; опубл. 26.07.10, Бюл. №14. – 5 с. : ил.

337. Обґрунтування параметрів нової технології перекріплення виробок за допомогою методу скінчених елементів / М.М. Касьян, М.А. Овчаренко, І.Г. Сахно [и др.] // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2008. – №2. – С. 104-109.

338. Расчет параметров нового способа перекрепления выработок / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, А.О. Новиков [и др.] // Записки Горного Института/ – Санкт-Петербург, 2012. – Том. 199. – С. 185-189. (научометрическая база «РИНЦ»)

339. Пат. 106071 Україна, МПК Е 21 D 11/00. Спосіб зміцнення гірських порід в процесі підтримання виробки / І.Г. Сахно, М.М. Касьян, В.М. Мокрієнко; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а201112645; заявл. 28.10.11; опубл. 25.07.14, Бюл. № 14 – 4 с. : ил.

340. Касьян, Н.Н. Опытнo-промышленная проверка способа охраны выработки жесткими сооружениями с компенсационными полостями в условиях шахты „Щегловская-Глубокая“ / Н.Н. Касьян, В.Н. Мокриенко, И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2012. – №6 (132). – С. 30-36. (наукометрична база SciVerse Scopus).

341. Сахно, И.Г. Особенности конвергенции пород и пространственного перемещения рам крепи в условиях шахты «Щегловская-Глубокая» / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничo-геологічна. – Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.– Вип. 2(17) С. – 16-23.

342. Молодецкий, А.В. Влияние неравнокомпонентности объемного нагружения и глубины залегания на физико-механические свойства углей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.09 / Молодецкий Андрей Владимирович ; Нац. акад. наук Украины, Ин-т физики горн. процессов. – Донецк, 2012. – 183 с.

343. Сахно, И.Г. Управление напряженно-деформированным состоянием массива горных пород вокруг выработок, поддерживаемых за лавой / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук.праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – №112 – С. 152-162.

344. Пат. 100270 Україна, МПК Е 21 D 11/00, Е 21 F 15/00. Спосіб охорони підготовчих виробок пройдених по пласту / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и

патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а2010 15564; заявл. 23.12.10 ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23. – 4 с.: ил.

345. Пат. 104065 Україна, МПК Е 21 D 11/08. Спосіб охорони підготовчої виробки / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а201206668; заявл. 31.05.12; опубл. 25.12.13, Бюл. № 24 – 8 с. : ил.

346. Пат. 106094 Україна, МПК Е 21 D 11/00, Е 21 С 41/18. Спосіб охорони підготовчої виробки / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – № а201112658; заявл. 29.05.12; опубл. 25.07.14, Бюл. № 14 – 8 с. : ил.

347. Касьян, Н.Н. Опыт разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими составами / Н.Н. Касьян, О.К. Мороз, И.Г. Сахно // X Szkoła Geomechaniki 2011. – Gliwice-Ustron, Poland, 18-21 pazdziernika, 2011. – С. 77-87.

348. Сахно, И.Г. Невзрывное разрушение негабаритных блоков в очистном забое / И.Г. Сахно // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах / Сб. научн. тр. МакНИИ. – МакНИИ: Макеевка-Донбасс, 2011. – Вып. 2(28) – С. 107-115.

349. Шахтные испытания нового способа укрепления разрушенных пород, основанного на применении невзрывчатых разрушающих веществ / Н. Н. Касьян, С.Ю. Гладкий, И.Г. Сахно [и др.] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна.– Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ».– 2011. – Вип. 14 (181). – С. 8-13.

350. СОУ-П 10.1.00174088.031:2011. Контроль за проведением способов и технологических процессов по параметрам акустического сигнала при вскрытии склонных к ГДЯ угольных пластов. – К. : Минэнергоуголь Украины, 2011. – 10 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Методика определения физико-механических свойств НРС по результатам испытаний на УНТС

Тензоры напряжений и деформаций:

$$\sigma_1 = (31400 * \sigma_1) / ((L_2 - y) * (L_3 - x)), \text{ (МПа)}$$

$$\sigma_2 = (31400 * \sigma_2) / ((L_1 - z) * (L_3 - x)), \text{ (МПа)}$$

$$\sigma_3 = (31400 * \sigma_3) / ((L_1 - z) * (L_2 - y)), \text{ (МПа)}$$

$$\varepsilon_1 = z / L_1$$

$$\varepsilon_2 = y / L_2$$

$$\varepsilon_3 = x / L_3,$$

где L_1, L_2, L_3 – размеры ребер образца в направлении действия соответственно: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$;

x, y, z – перемещение нажимных плит – соответственно в направлении действия $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Объемная деформация:

$$V_{def} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3.$$

Средние напряжения:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

где σ_1 – вертикальная составляющая тензора напряжения;

σ_2, σ_3 – горизонтальные составляющие тензора напряжения.

Средние деформации:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3},$$

где ε_1 – вертикальная составляющая тензора деформаций,

$\varepsilon_2, \varepsilon_3$ – горизонтальные составляющие тензора деформаций.

Девииаторы напряжений:

$$\sigma_{de1} = \sigma_1 - \sigma_{cp}$$

$$\sigma_{de2} = \sigma_2 - \sigma_{cp}$$

$$\sigma_{de3} = \sigma_3 - \sigma_{cp}.$$

Девииаторы деформации:

$$\varepsilon_{de1} = \varepsilon_1 - \varepsilon_{cp}$$

$$\varepsilon_{de2} = \varepsilon_2 - \varepsilon_{cp}$$

$$\varepsilon_{de3} = \varepsilon_3 - \varepsilon_{cp}.$$

Октаэдрическое напряжение:

$$\sigma_{ок} = 1/3 \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}.$$

Максимальное касательное напряжение:

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2.$$

Инварианты напряжений:

$$l_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$l_2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)$$

$$l_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3.$$

Инварианты деформаций:

$$j_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$j_2 = -(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_2\varepsilon_3)$$

$$j_3 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3.$$

Объемный модуль деформации:

$$K = \frac{1}{3} \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\varepsilon_{\text{ср}}}.$$

Модуль сдвига:

$$G = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_1 \cdot \sigma_3}{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_3}}, \text{ МПа.}$$

Модуль Юнга:

$$E = \frac{9K \cdot G}{3K + G}, \text{ МПа.}$$

Коэффициент поперечной деформации (Пуассона):

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G}.$$

Энергия изменения объема:

$$A_V = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 / 18K.$$

Энергия формоизменения:

$$A_F = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \cdot (1 + \nu) / 18K (1 - 2\nu).$$

Параметр вида деформационного состояния:

$$\mu_\varepsilon = (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_3).$$

Параметр вида напряженного состояния:

$$\mu_\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3).$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ
МАКІВСЬКИЙ НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ

з безпеки робіт у гірничій
промисловості
МакНДІ

86108, Україна, Макіївка Донецької обл.
вул.Лихачова, 60.
Телефони: (062) 300-11-32;
(06232) 96-1-07.
Факс: (0623) 22-19-00
e-mail: maknii@tr.dn.ua
<http://mupmaknii.se-ua.net>



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И
УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

по безопасности работ в горной
промышленности
МакНИИ

86108, Украина, Макеевка Донецкой обл.
ул.Лихачева, 60.
Телефоны: (062) 300-11-32;
(06232) 96-1-07.
Факс: (0623) 22-19-00
e-mail: maknii@tr.dn.ua
<http://mupmaknii.se-ua.net>

ЗД. Н. 11 № 14/ *10194*

На № 75 від 08.11.2011

Про використання
лазерного далекоміра

Директору
інституту гірничої справи та геології
ДВНЗ «Донецький національний
технічний університет»

Булгакову Ю. Ф.

*вул. Артема, буд. 58, корп. 9,
м. Донецьк, 83001, Україна*

В результаті вивчення матеріалів по г/л № 75/1711140076 від 08.11.2011 встановлено наступне:
- цифровий лазерний далекомір BOSCH DLE 70 Professional призначений для вимірювання відстані, довжини і висоти, а також для розрахування площі і об'єму. Прилад придатний для робіт всередині приміщень та надворі;

- цифровий лазерний далекомір BOSCH DLE 70 Professional відноситься до переносних приладів загального призначення і не має рудникового виконання. Прилад має ступінь захисту від пилу та бризок води – IP 54 (крім секції для батарейок);

- цифровий лазерний далекомір BOSCH DLE 70 Professional створює лазерне випромінювання класу 2 відповідно до норми IEC 60825-1 з вихідними параметрами лазера: довжина хвилі 635 нм, випромінювана потужність не більше 1 мВт, які відповідають вимогам ДСТУ 7113:2009.

МакНДІ вважає за можливе тимчасове до 28.11.2012 періодичне використання цифрового лазерного далекоміру BOSCH DLE 70 Professional (серійний № 009745257) співробітниками інституту гірництва та геології в підземних виробках вугільних шахт України, у тому числі небезпечних по газу (метану) та/або пилу, за умови дотримання вимог пункту 6 розділу 2 глави VIII НПАОП 10.0-1.01-10 «Правила безпеки у вугільних шахтах» та керівництва з експлуатації далекоміром.

При проведенні вимірювання в підземних виробках вугільних шахт необхідно дотримуватись наступних рекомендацій:

- не користуватися далекоміром, при виявленні пошкоджень корпусу, кришок, кріпильних гвинтів і захисних стекол;

- у підземних виробках шахти не проводити заряд або заміну акумуляторів або батарейок у далекомірі;

- виконання заходів безпеки при використанні цифрового лазерного далекоміру BOSCH DLE 70 Professional (серійний № 009745257) в підземних виробках вугільних шахт повинне здійснюватися спільно з особами нагляду.

Заст. директора з наукової роботи

А. Г. Мнухін

Відділ електрообладнання
Демченко О. О. (06232) 96-2-73
Гречка А.В. (06232) 96-2-68

ПРИЛОЖЕНИЕ В

МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ
МАКІЇВСЬКИЙ НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
з безпеки робіт у гірничій
промисловості



МакНДІ
86108, Україна, Макіївка Донецької обл.
вул.Лихачова, 60.
Телефони: (062) 300-11-32;
(06232) 96-1-07.
Факс: (0623) 22-19-00
e-mail: maknii@ir.dn.ua
<http://mupmaknii.se-ua.net>

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И
УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
по безопасности работ в горной
промышленности

МакНИИ
86108, Украина, Макеевка Донецкой обл.
ул.Лихачева, 60.
Телефоны: (062) 300-11-32;
(06232) 96-1-07.
Факс: (0623) 22-19-00
e-mail: maknii@ir.dn.ua
<http://mupmaknii.se-ua.net>

16.11.11 № 14/ *9756*

На № 6/н від 31.10.2011

Директору
інституту гірничої справи та геології
ДВНЗ «Донецький національний
технічний університет»

Булгакову Ю. Ф.

Про використання
фотокамери Canon

*вул. Артема, буд. 58, корп. 9,
м. Донецьк, 83001, Україна*

В результаті вивчення матеріалів по г/л № 1711140069 від 31.10.2011 встановлене наступне:

- фотокамера Canon PowerShot A2000 призначена для фото-відео зйомки в звичайних умовах;
- фотокамера Canon PowerShot A2000 відноситься до переносних приладів загального призначення і не має рудникового виконання.

МакНДІ вважає за можливе тимчасове до 08.11.2012 періодичне використання фотокамери Canon PowerShot A2000 (инв. № 123) співробітниками інституту гірництва та геології в підземних виробках вугільних шахт України, у тому числі небезпечних по газу (метану) та/або пилу, за умови дотримання вимог пункту 6 розділу 2 глави VIII НПАОП 10.0-1.01-10 «Правила безпеки у вугільних шахтах».

При проведенні фотографувань в підземних виробках вугільних шахт необхідно дотримуватись наступних рекомендацій:

- не користуватися фотокамерою, при виявленні пошкоджень корпусу, кришок, кріпильних гвинтів і захисних стекол;
- у підземних виробках шахти не проводити заряд або заміну акумуляторної батареї у фотокамері;
- виконання заходів безпеки при використанні фотокамери Canon PowerShot A2000 (инв. № 123) в підземних виробках вугільних шахт повинне здійснюватися спільно з особами нагляду.

Заст. директора з наукової роботи

А. Г. Мнухін

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Характеристики модифицированных НРС

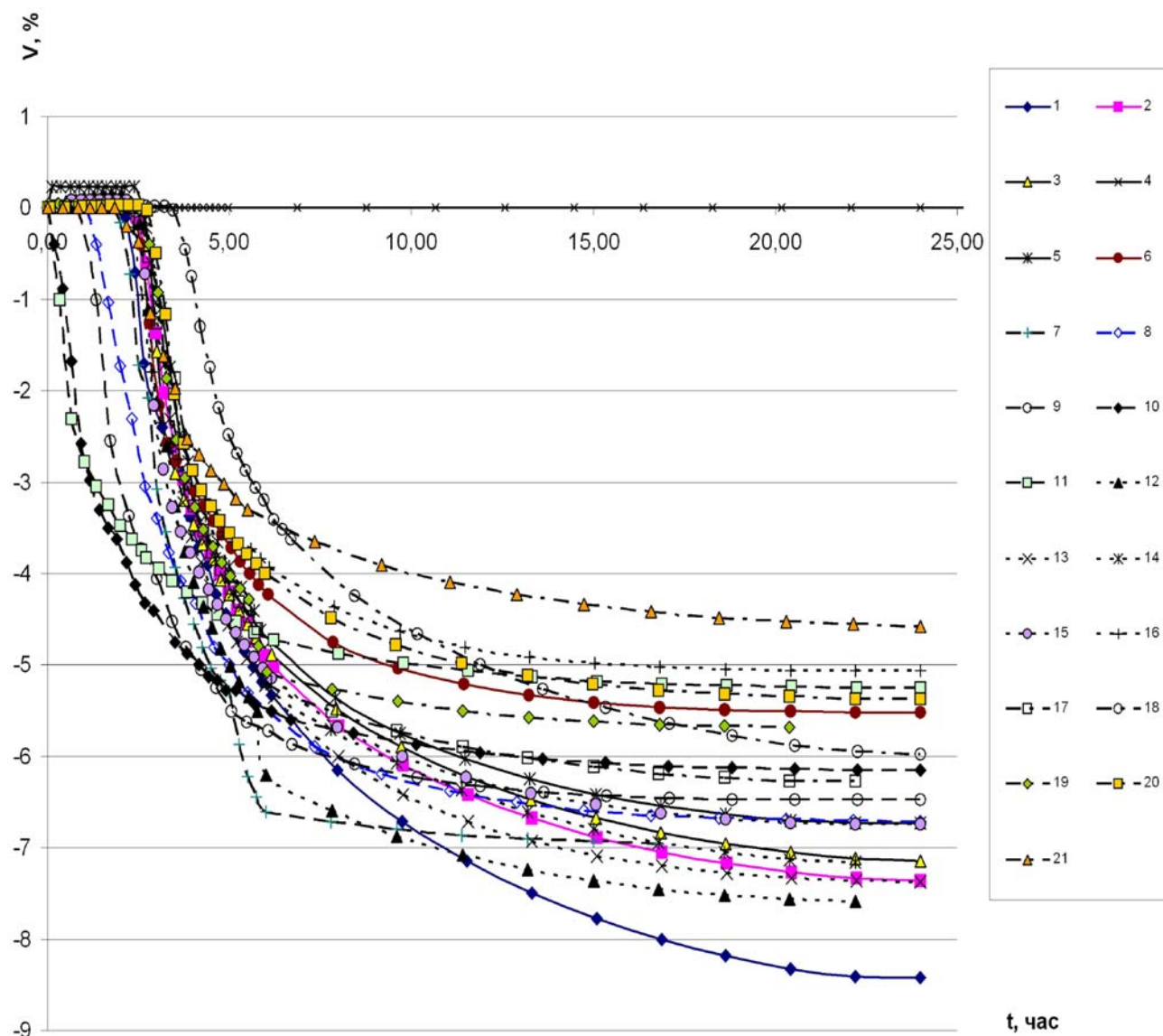


Рисунок Г1 – Графики объемных изменений смесей в рабочей камере стэнда при добавлении портландцементов масс. %:

1 – 0, 2 – 8,3 ПЦ ПБ, 3 – 16,6 ПЦ ПБ, 4 – 25 ПЦ ПБ, 5 – 33 ПЦ ПБ, 6 – 50 ПЦ ПБ, 7 – 8,3 ПЦ Ш, 8 – 16,6 ПЦ Ш, 9 – 25 ПЦ Ш, 10 – 33 ПЦ Ш, 11 – 50 ПЦ Ш, 12 – 8,3 ПЦ I, 13 – 16,6 ПЦ I, 14 – 25 ПЦ I, 15 – 33 ПЦ I, 16 – 50 ПЦ I, 17 – 8,3 ПЦ II, 18 – 16,6 ПЦ II, 19 – 25 ПЦ II, 20 – 33 ПЦ II, 21 – 50 ПЦ II

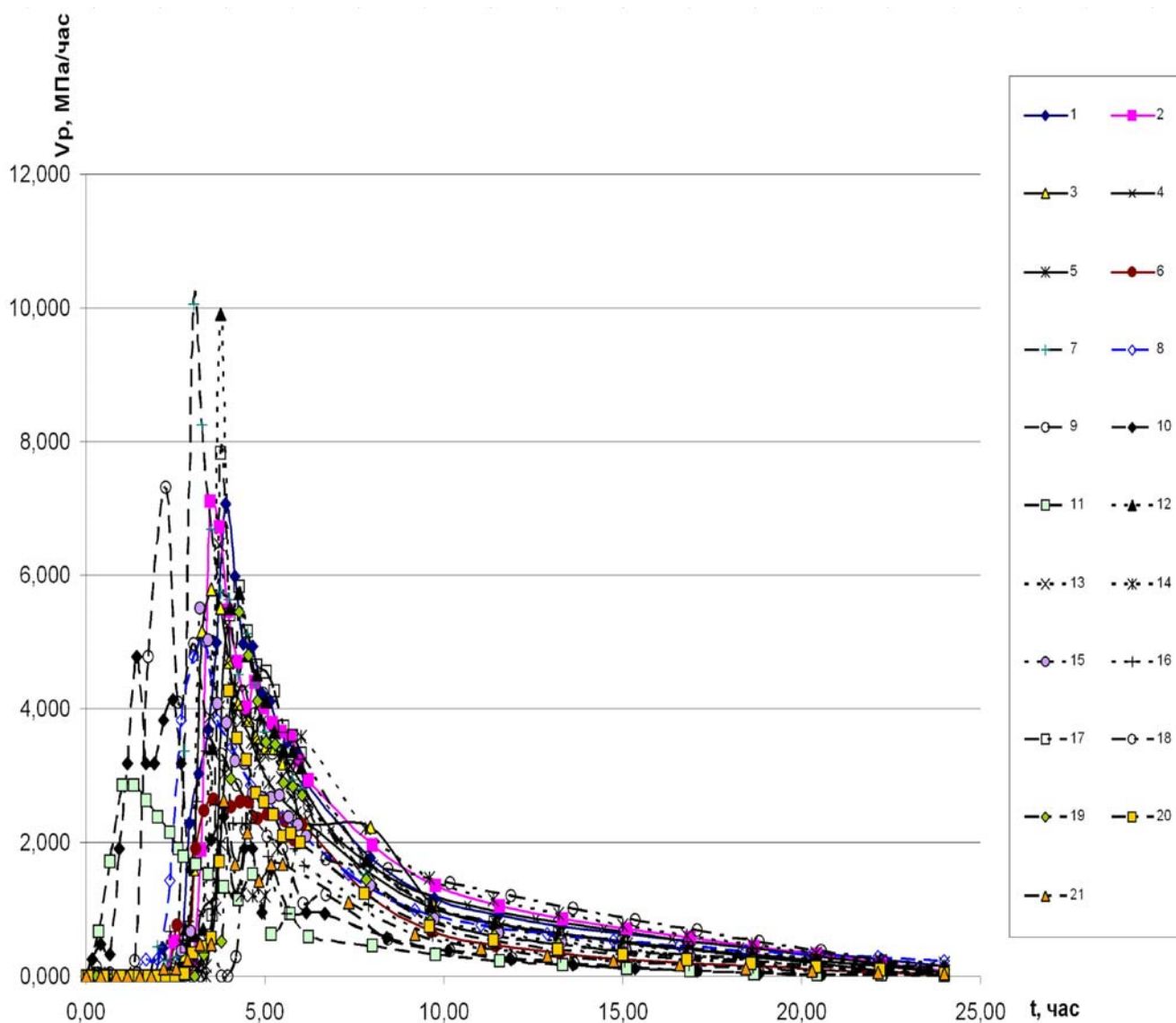


Рисунок Г2 – Графики изменения скорости роста давления расширения смесей в рабочей камере стенда при добавлении портландцементов масс. %:

1 – 0, 2 – 8,3 ПЦ ПБ, 3 – 16,6 ПЦ ПБ, 4 – 25 ПЦ ПБ, 5 – 33 ПЦ ПБ, 6 – 50 ПЦ ПБ, 7 – 8,3 ПЦ Ш, 8 – 16,6 ПЦ Ш, 9 – 25 ПЦ Ш, 10 – 33 ПЦ Ш, 11 – 50 ПЦ Ш, 12 – 8,3 ПЦ I, 13 – 16,6 ПЦ I, 14 – 25 ПЦ I, 15 – 33 ПЦ I, 16 – 50 ПЦ I, 17 – 8,3 ПЦ IIА, 18 – 16,6 ПЦ IIА, 19 – 25 ПЦ IIА, 20 – 33 ПЦ IIА, 21 – 50 ПЦ IIА

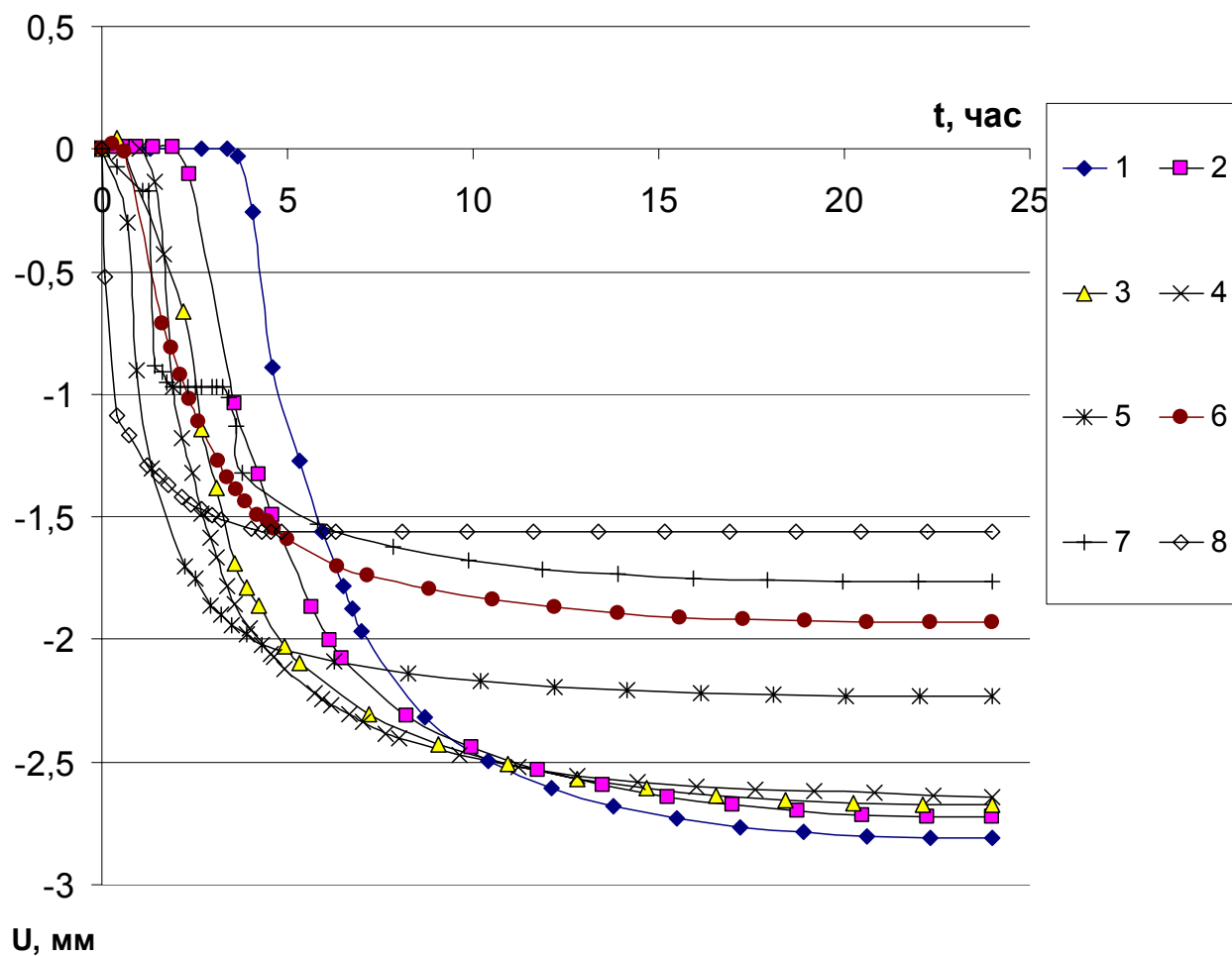


Рисунок ГЗ – Графики объемных изменений смесей в рабочей камере стенда при добавлении этановой кислоты масс. %:

1 – 0, 2 – 0,56, 3 – 0,9, 4 – 1,13, 5 – 1,65, 6 – 1,98, 7 – 2,17, 8 – 2,20

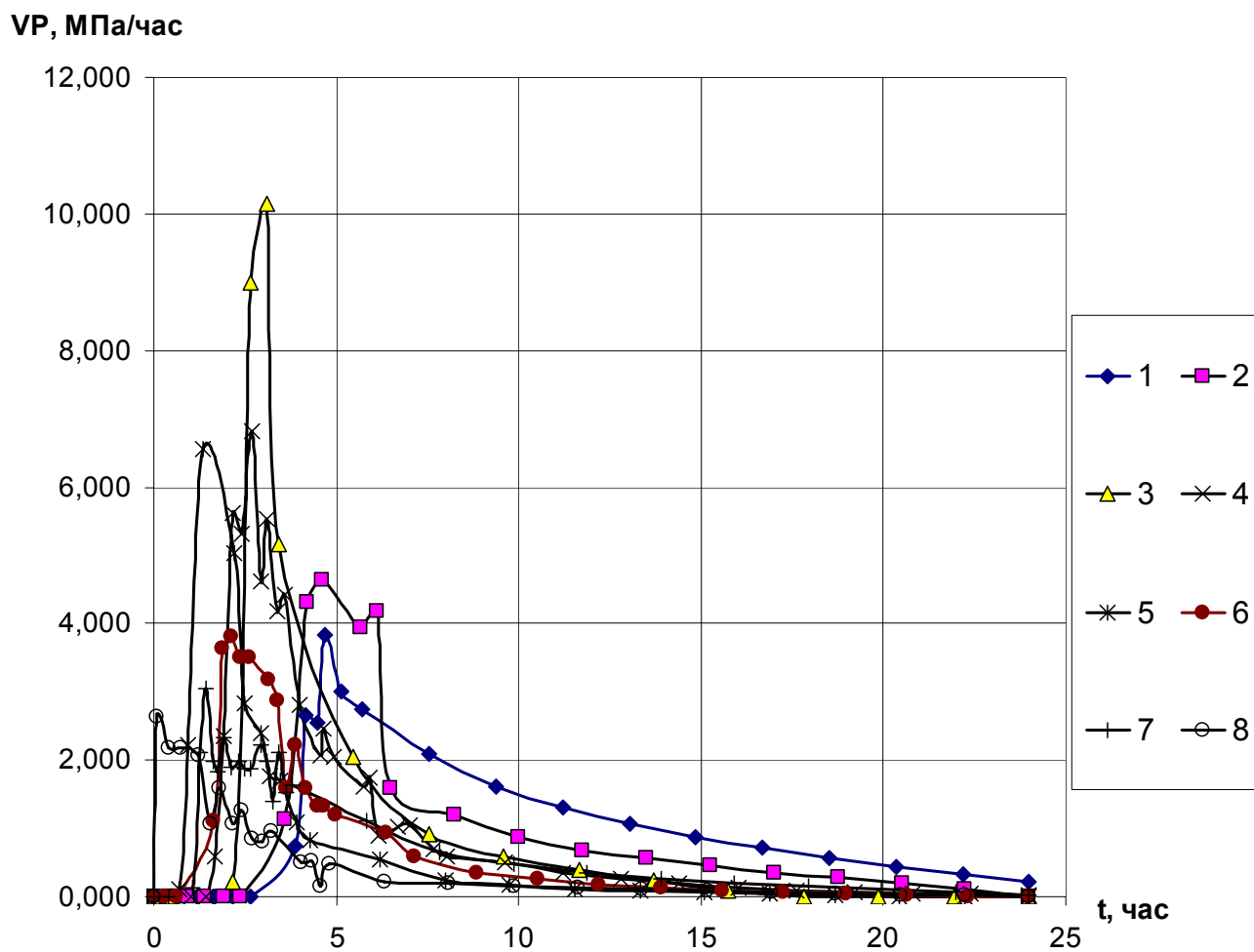


Рисунок Г4 – Графики изменения скорости роста давления расширения смесей в рабочей камере стенда при добавлении этановой кислоты масс. %:

1 – 0, 2 – 0,56, 3 – 0,9, 4 – 1,13, 5 – 1,65, 6 – 1,98, 7 – 2,17, 8 – 2,20

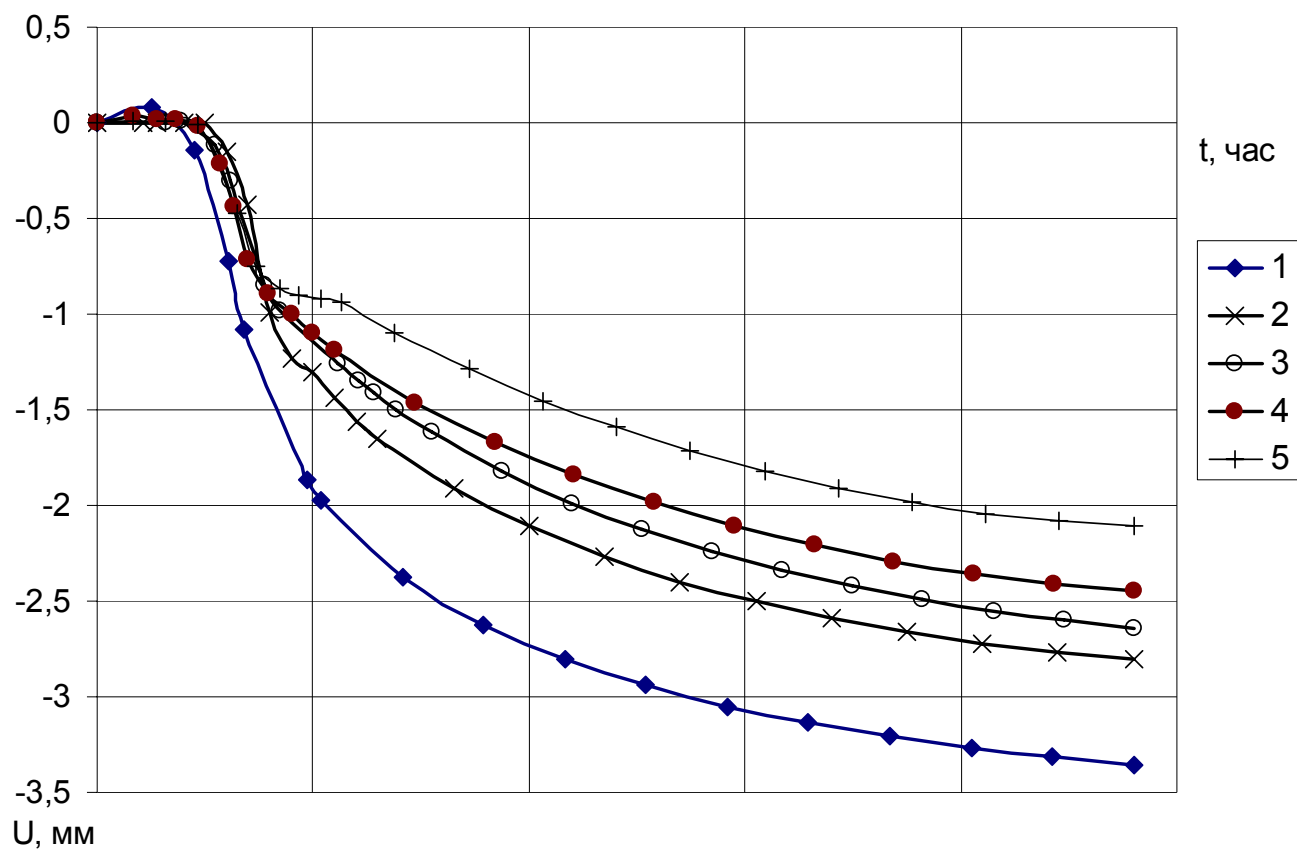


Рисунок Г5 – Графики объемных изменений смесей в рабочей камере станда при добавлении гумата натрия масс. %:

1 – 0, 2 – 1,2, 3 – 2,3, 4 – 5,5, 5 – 10

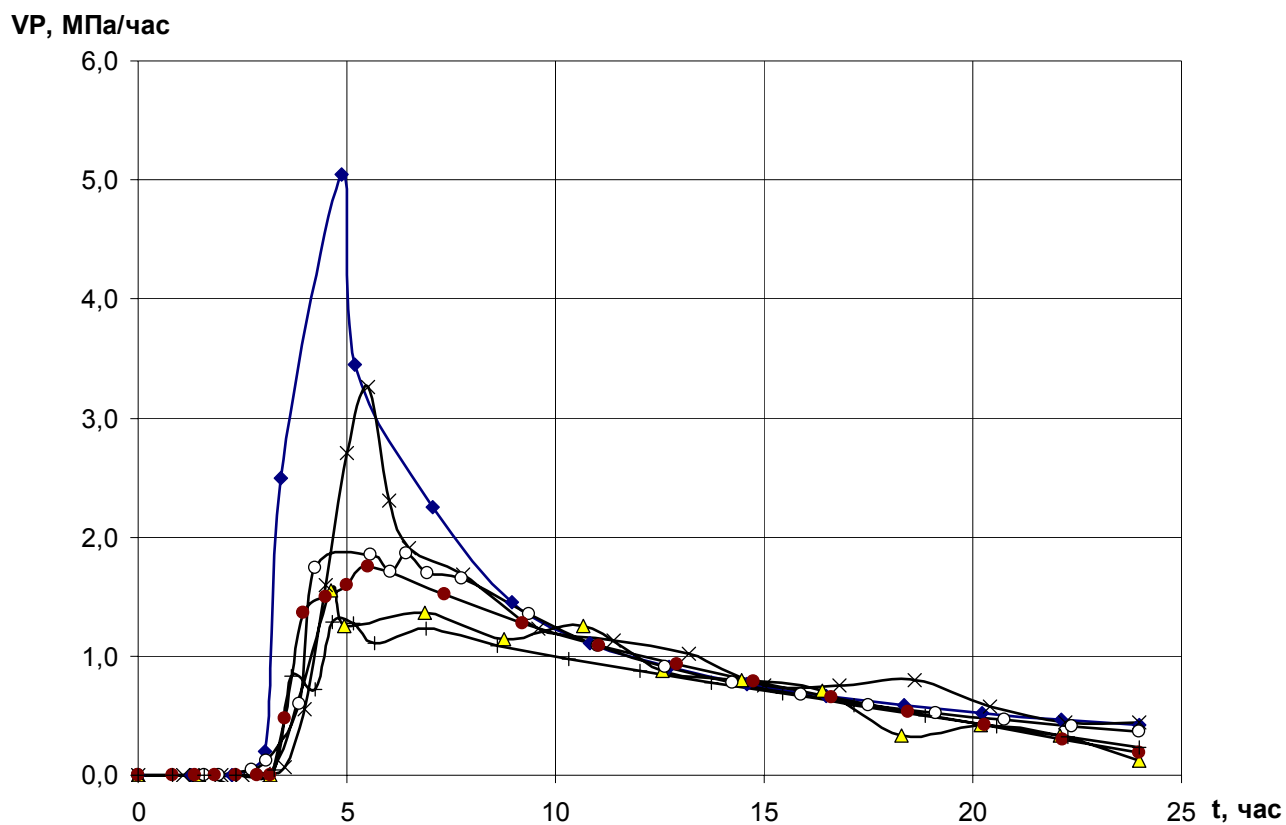


Рисунок Г6 – Графики изменения скорости роста давления расширения смеси в рабочей камере стенда при добавлении в состав гумата натрия масс. %:

1 – 0, 2 – 1,2, 3 – 2,3, 4 – 5,5, 5 – 10

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

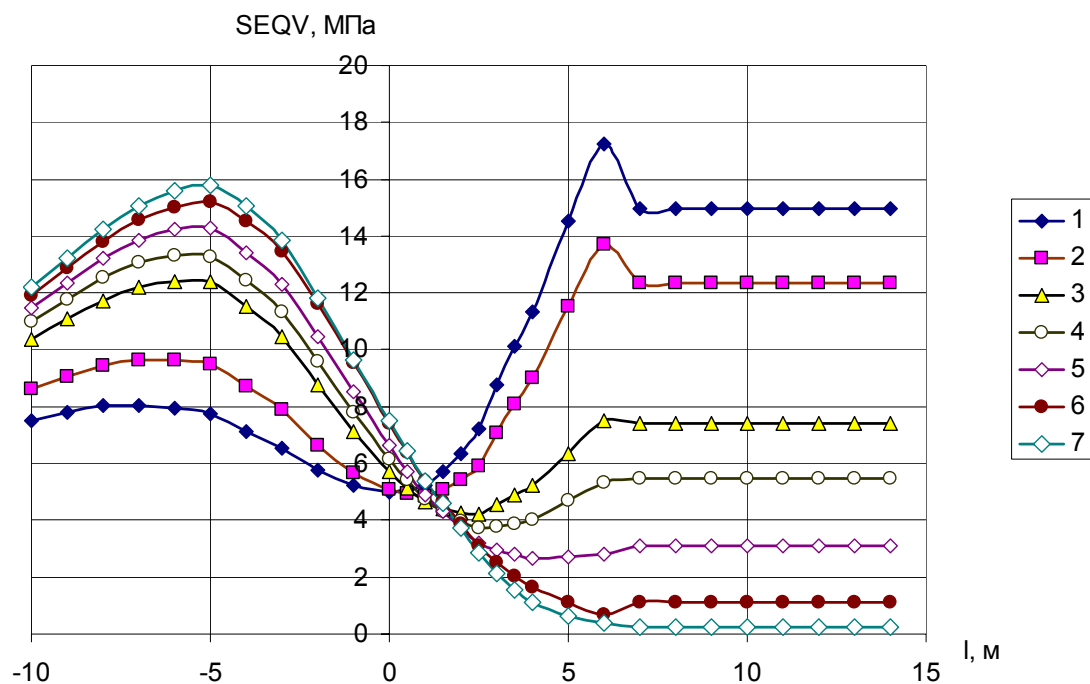


Рисунок Д1 – Расчетные напряжения $SEQV$ по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 6 м, и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

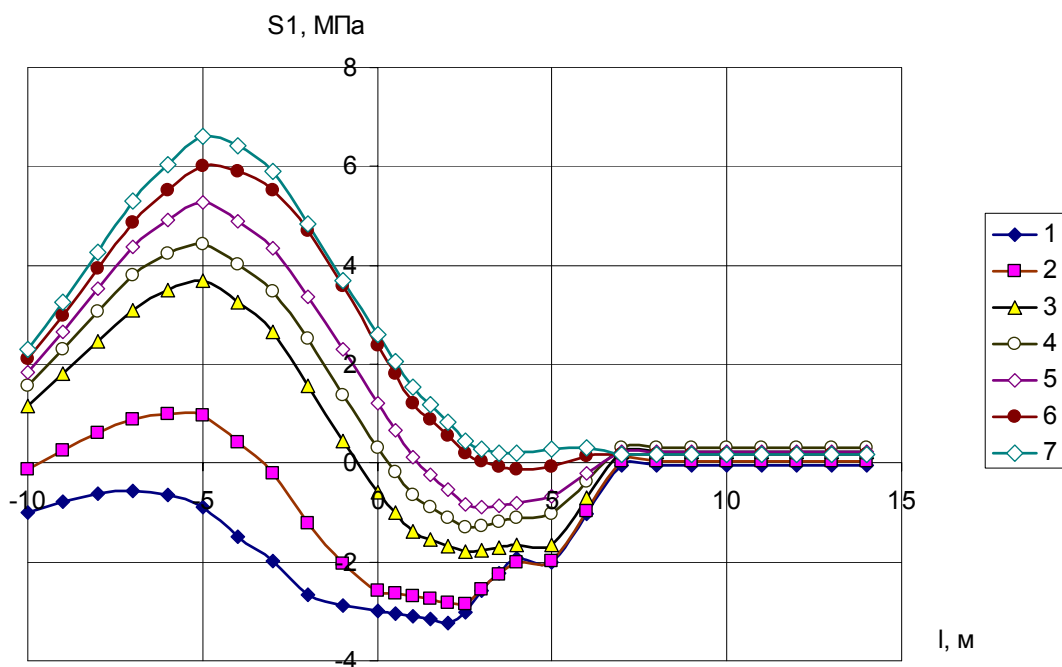


Рисунок Д2 – Расчетные напряжения $S1$ (σ_1) по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 6 м, и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

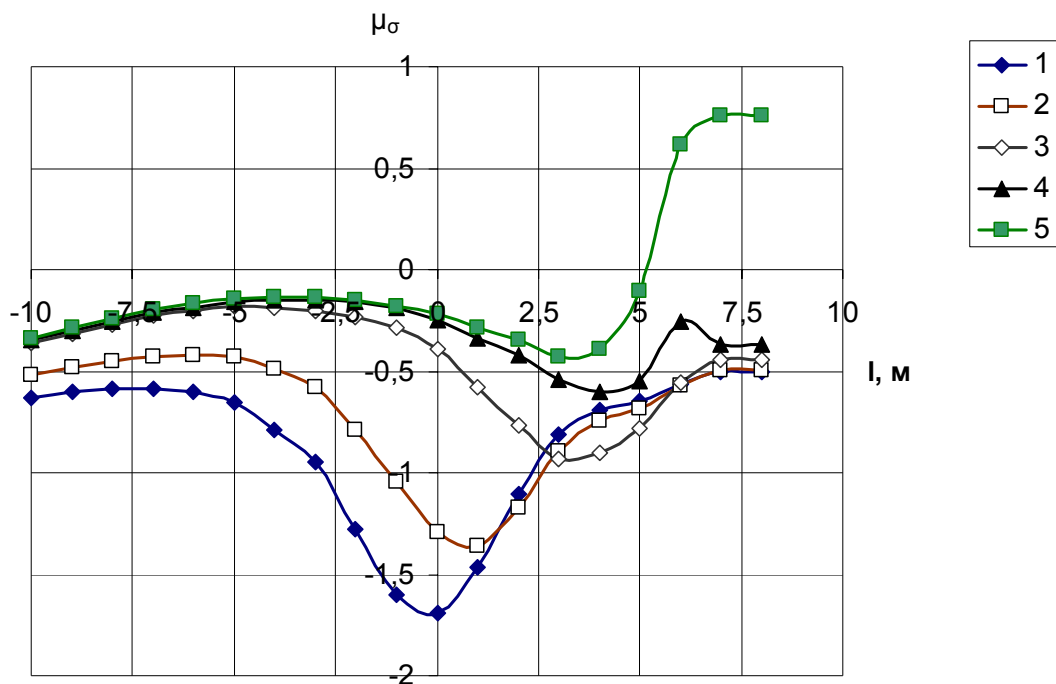


Рисунок Д3 – Зависимость вида напряженного состояния $\mu\sigma$ в основной кровле по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 6 м, и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

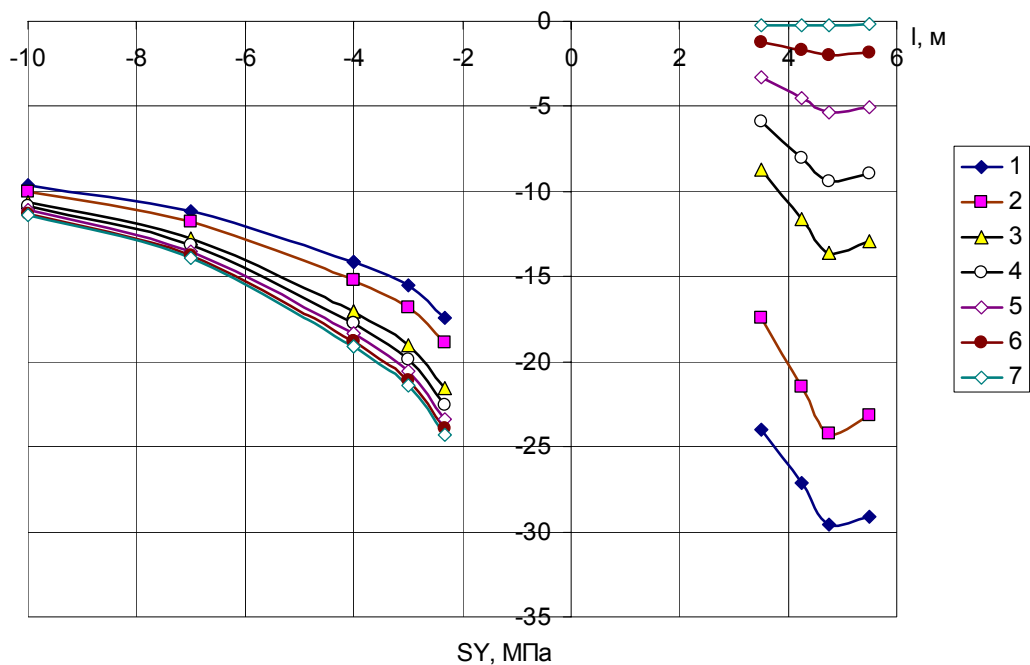


Рисунок Д4 – Расчетные напряжения S_Y по линии 2 (рис. 5.27) проведенной по верхней грани слоя угля и охранной полосы при длине консоли 6 м и жесткости полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

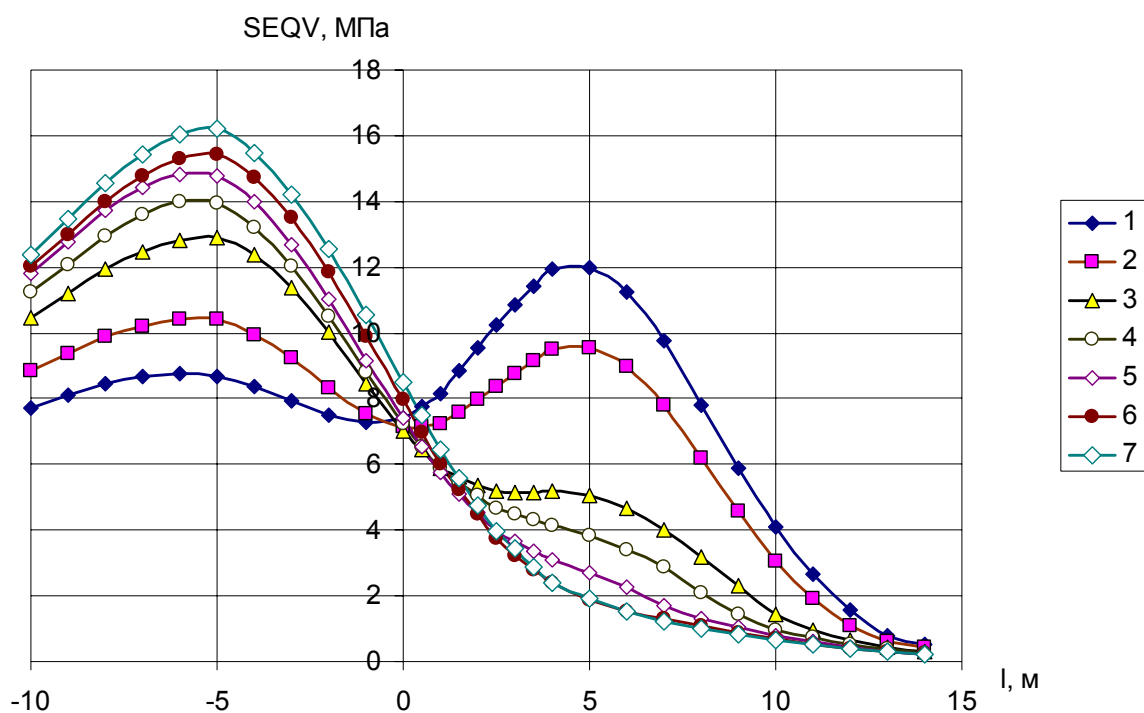


Рисунок Д5 – Расчетные напряжения SEQV по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 18 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

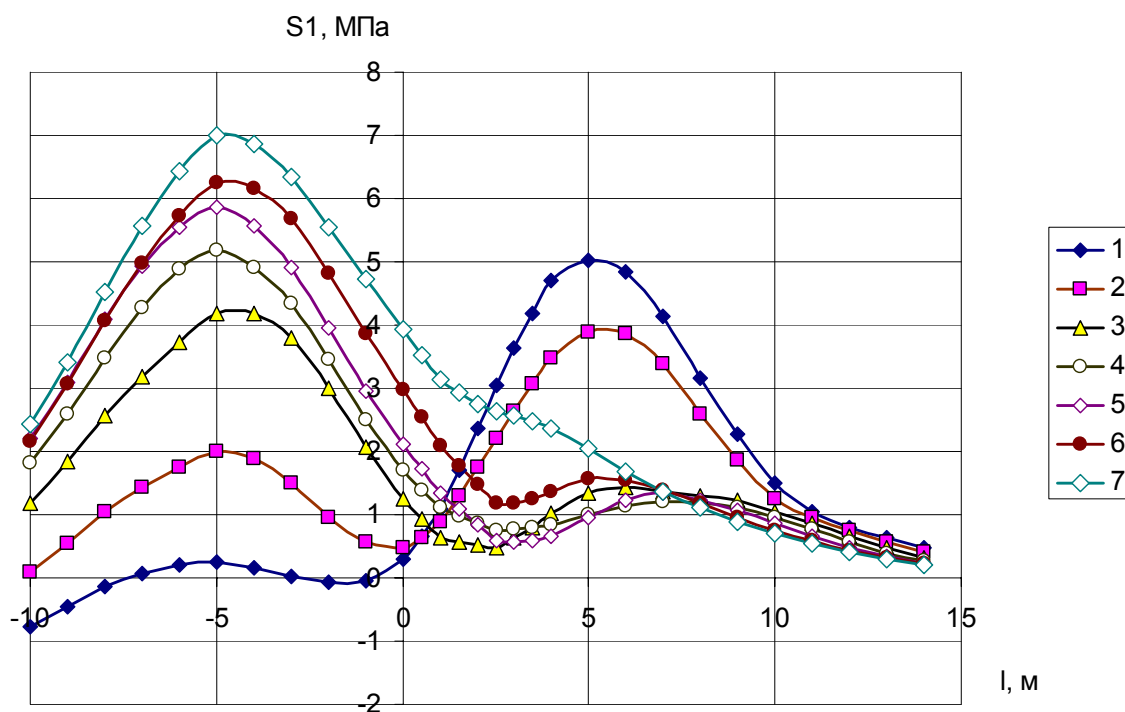


Рисунок Д6 – Расчетные напряжения S_1 (σ_1) по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 18 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

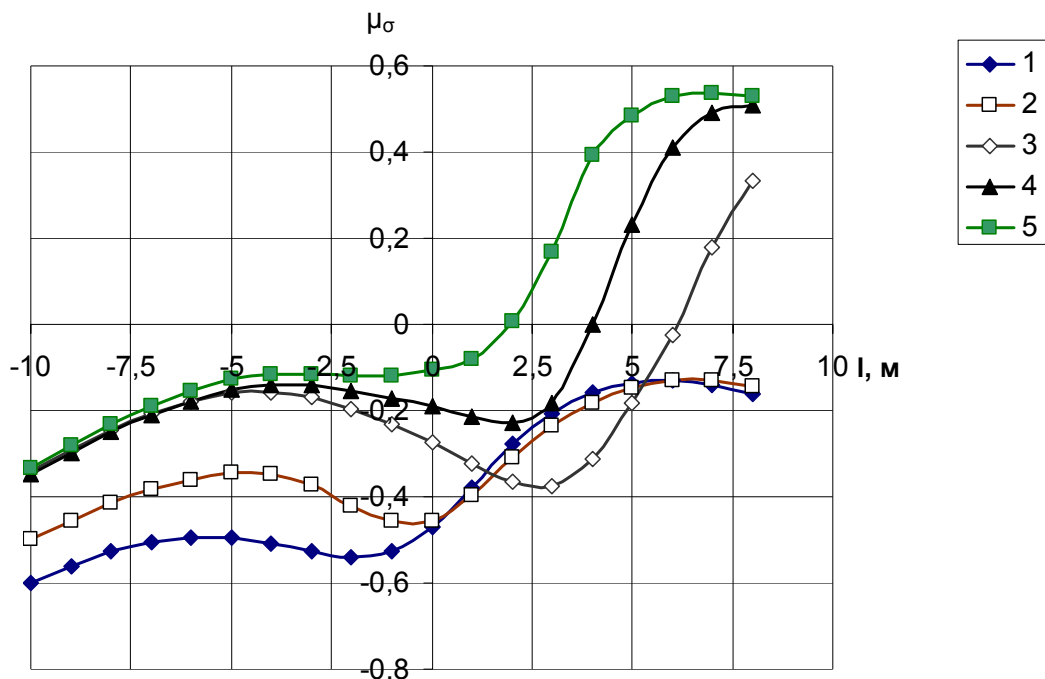


Рисунок Д7 – Зависимость вида напряженного состояния $\mu\sigma$ в основной кровле по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли, при длине консоли 18 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

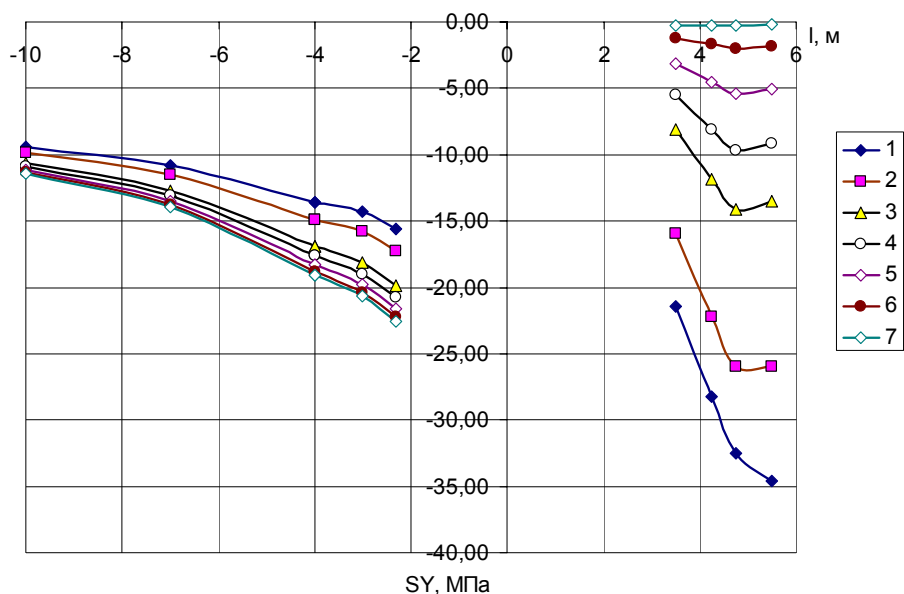


Рисунок Д8 – Расчетные напряжения S_Y по линии 2 (рис. 5.27) проведенной по верхней грани слоя угля и охранной полосы при длине консоли 18 м и жесткости полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

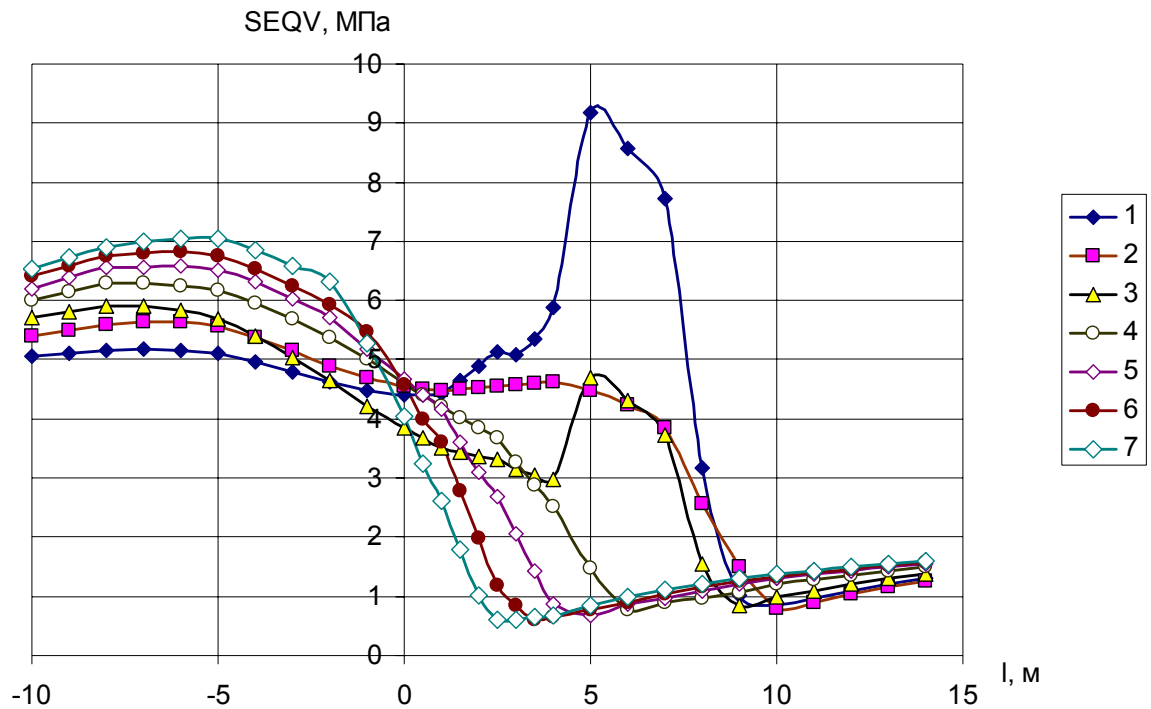


Рисунок Д9 – Расчетные напряжения SEQV по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 42 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

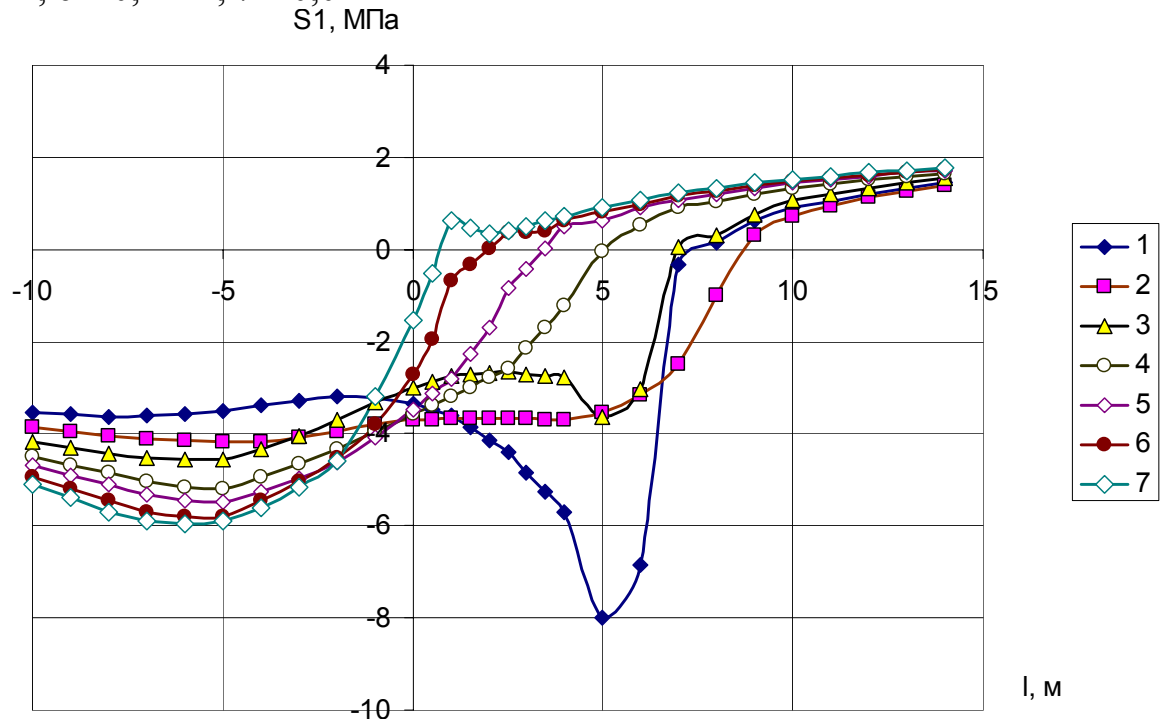


Рисунок Д10 – Расчетные напряжения S1 (σ_1) по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 42 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

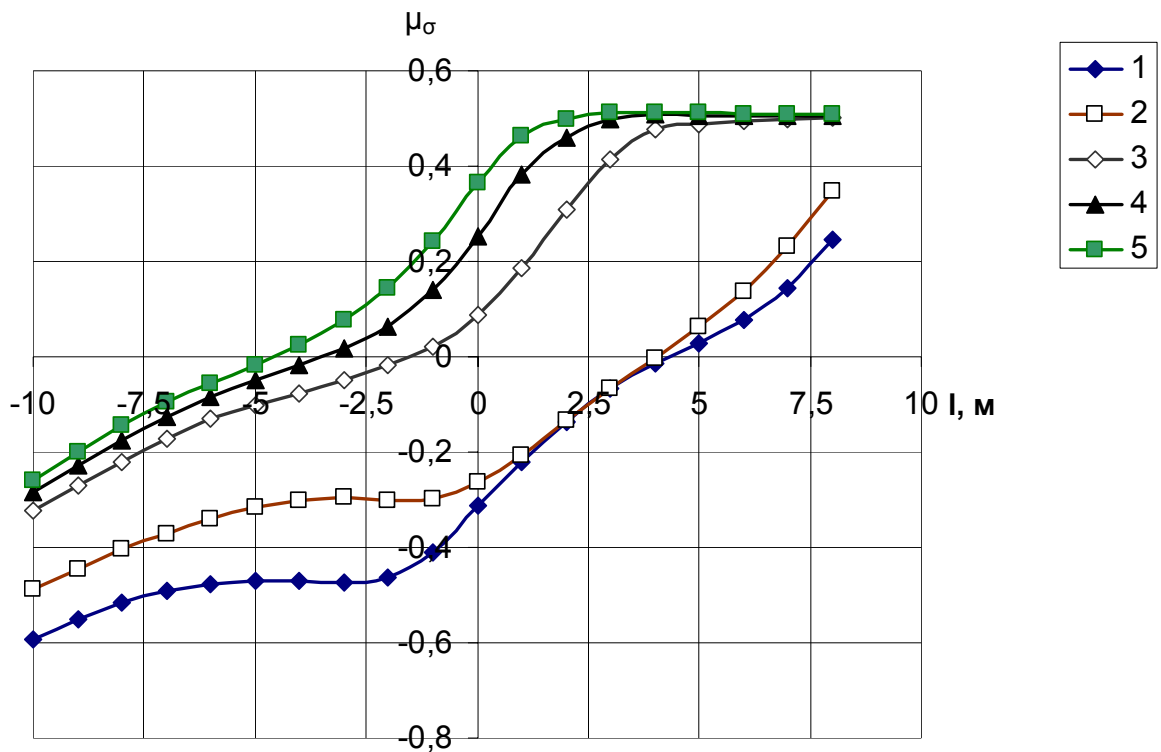


Рисунок Д11 – Зависимость вида напряженного состояния μ_σ в основной кровле по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 42 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

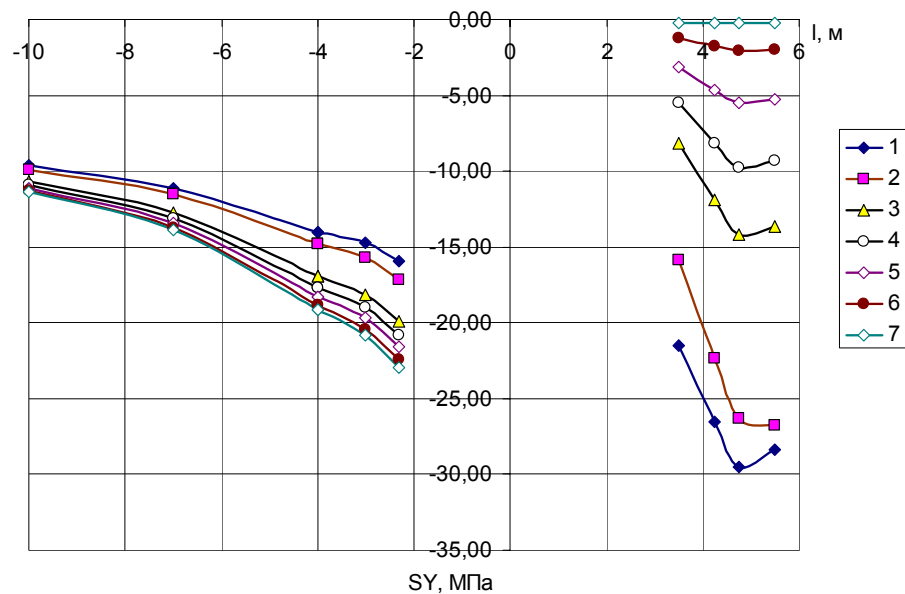


Рисунок Д12 – Расчетные напряжения S_Y по линии 2 (рис. 5.27) проведенной по верхней грани слоя угля и охранной полосы при длине консоли 42 м и жесткости полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

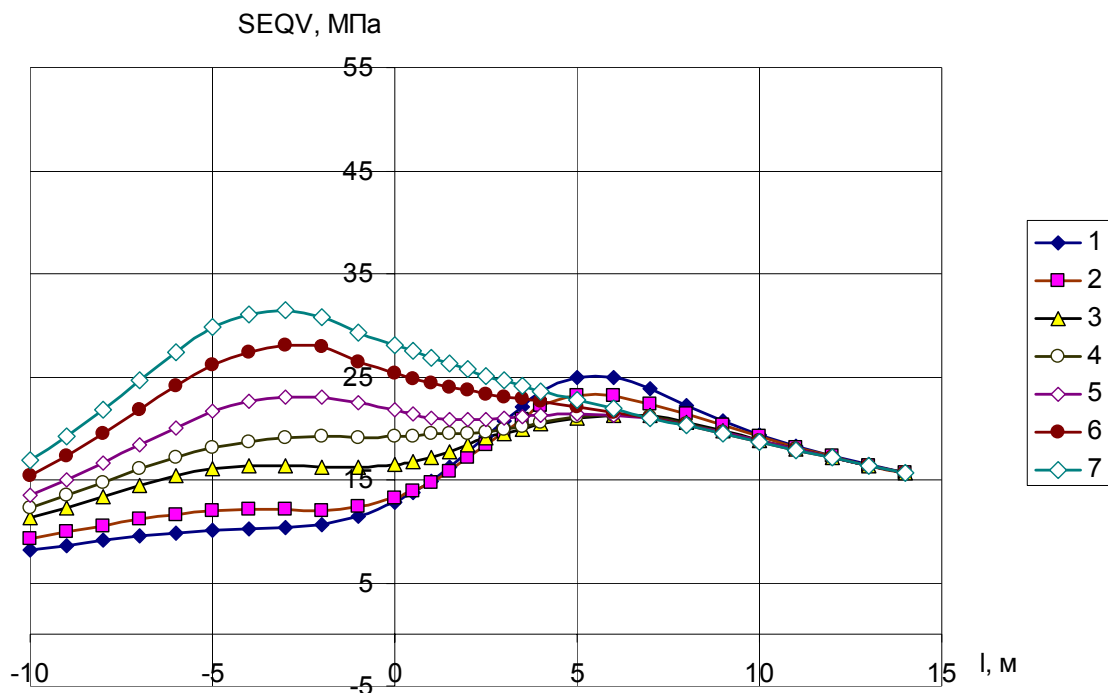


Рисунок Д13 – Расчетные напряжения SEQV по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 57 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

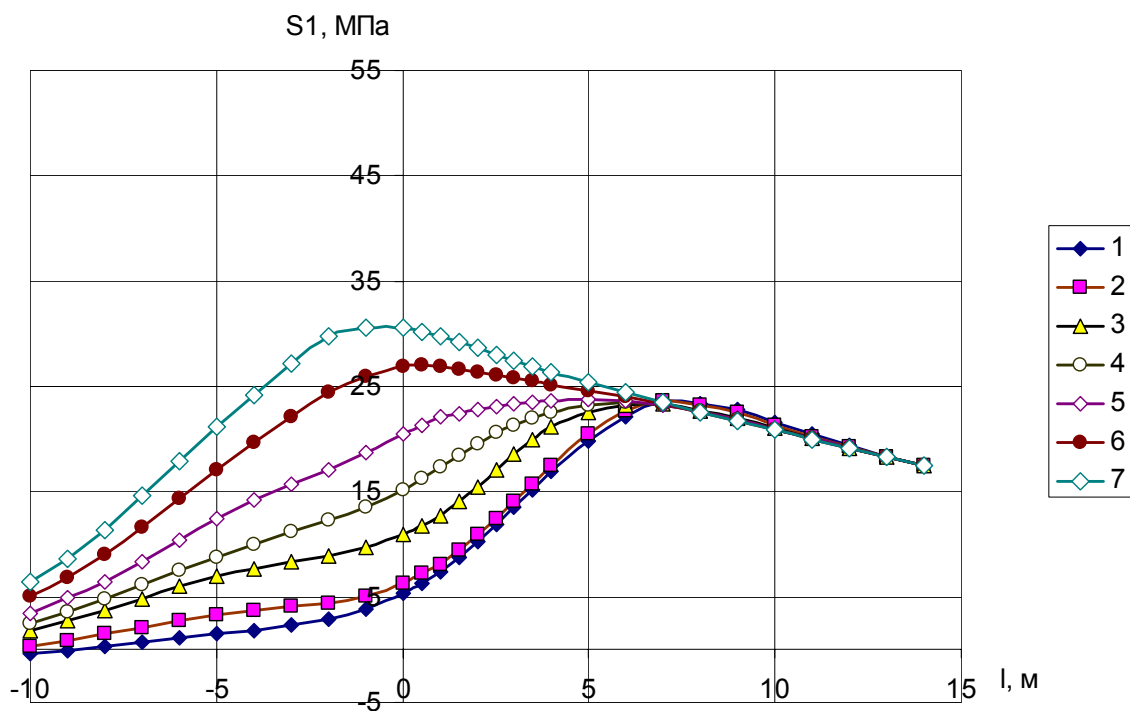


Рисунок Д14 – Расчетные напряжения $S1$ (σ_1) по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 57 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

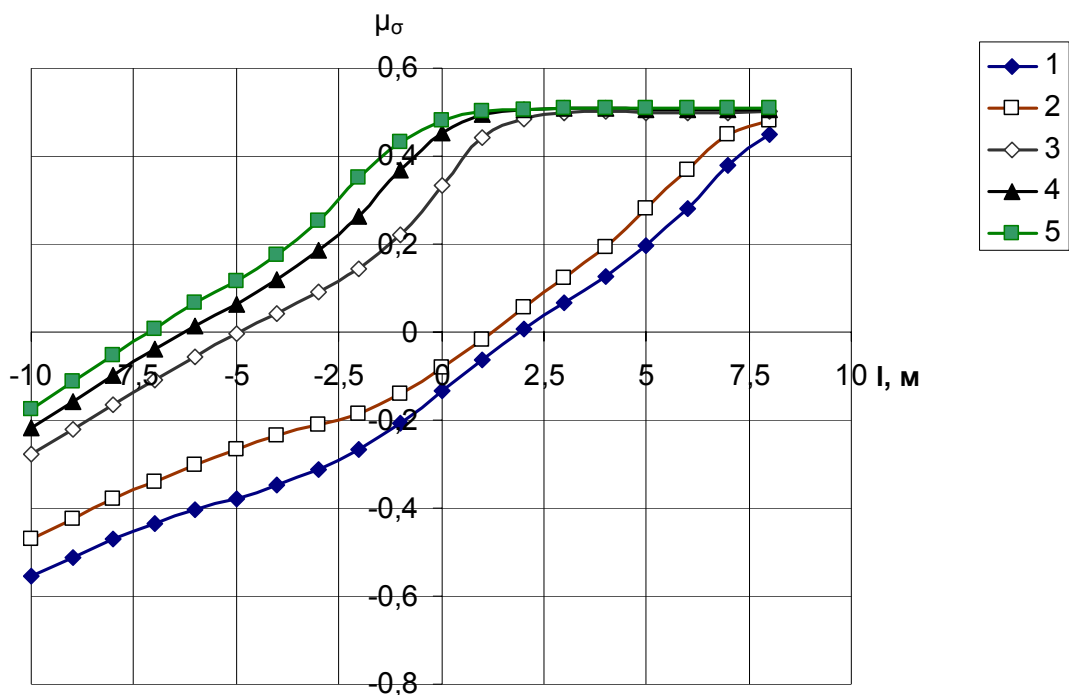


Рисунок Д15 – Зависимость вида напряженного состояния μ_σ в основной кровле по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 57 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

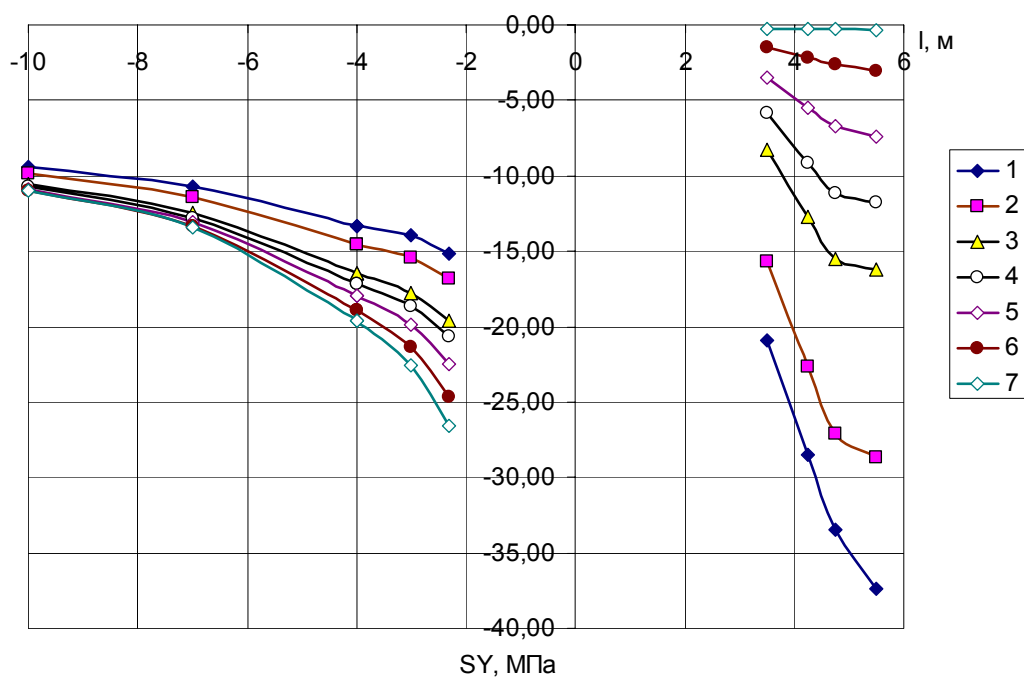


Рисунок Д16 – Расчетные напряжения S_Y по линии 2 (рис. 5.27) проведенной по верхней грани слоя угля и охранной полосы при длине консоли 57 м и жесткости полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

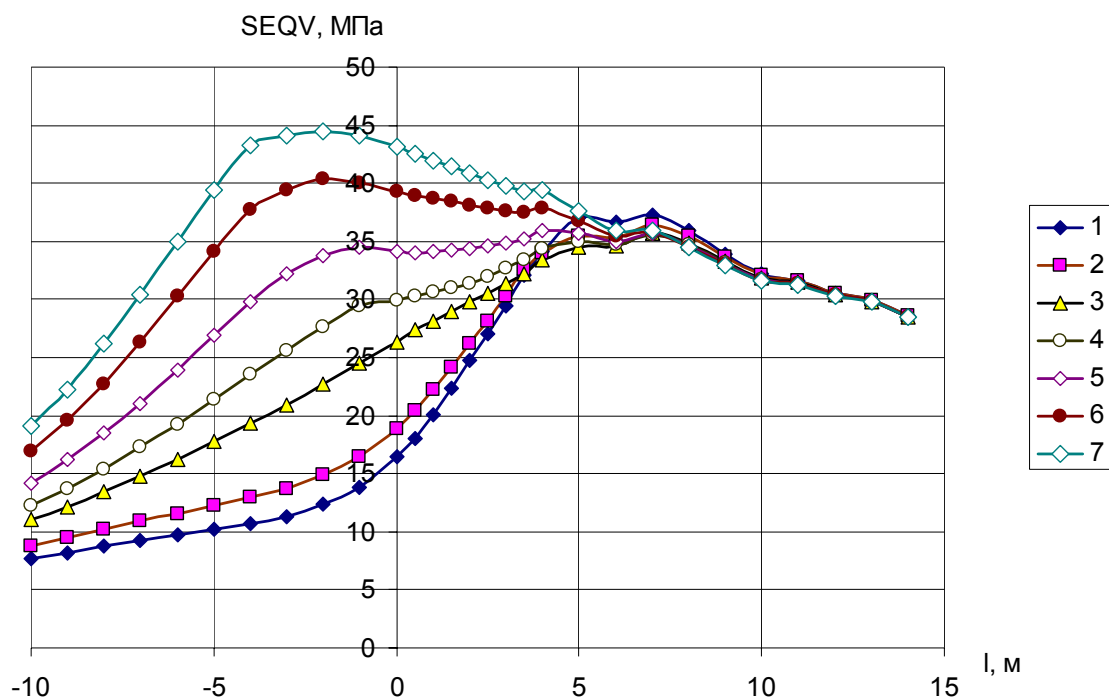


Рисунок Д17 – Расчетные напряжения $SEQV$ по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 72 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

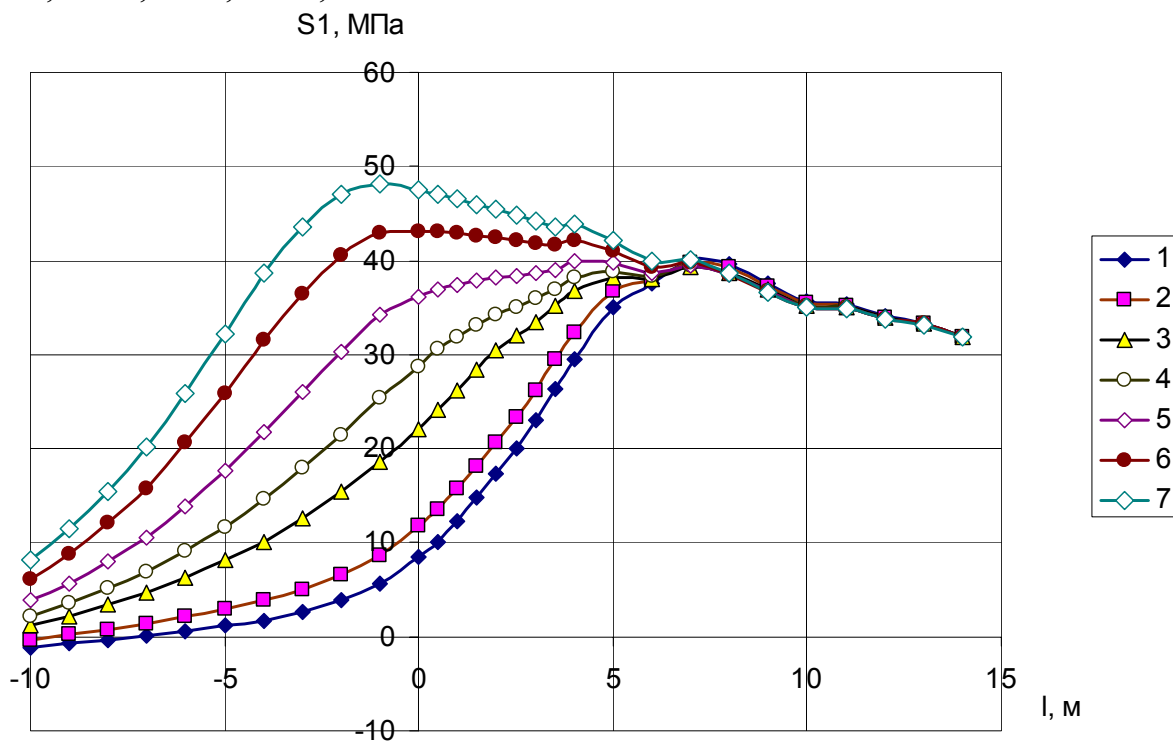


Рисунок Д18 – Расчетные напряжения $S1$ (σ_1) по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 72 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

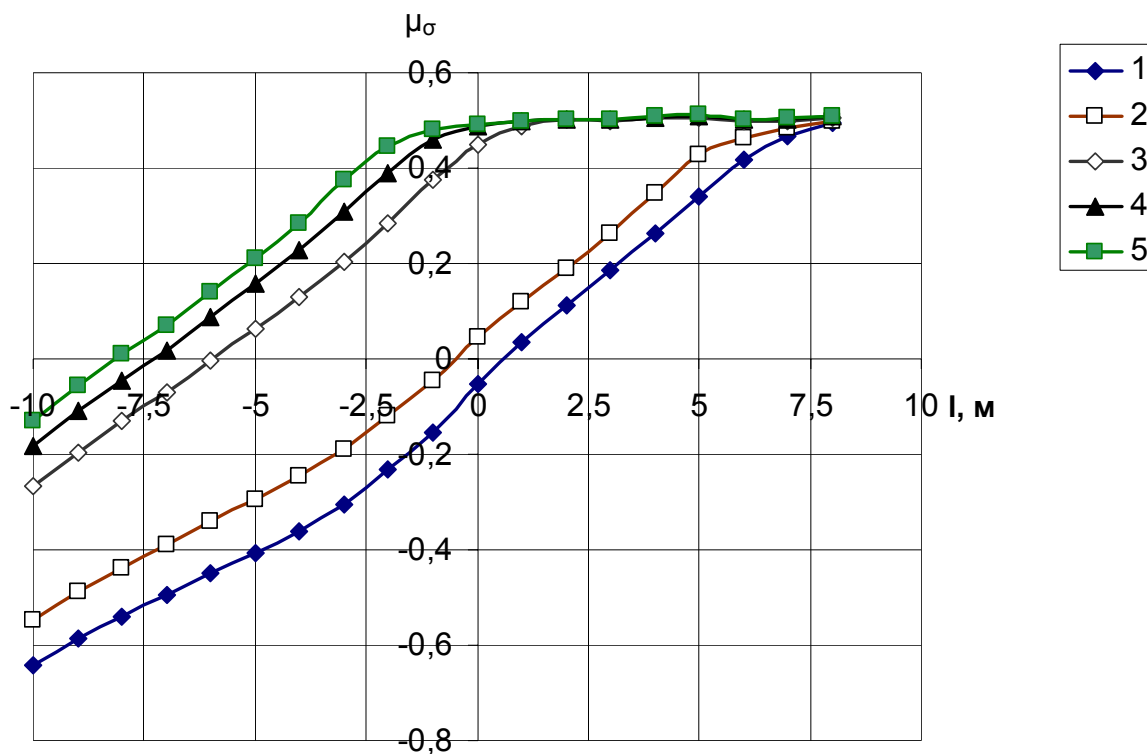


Рисунок Д19 – Зависимость вида напряженного состояния μ_σ в основной кровле по линии 1 (рис. 5.27), проведенной по верхней грани слоя основной кровли при длине консоли 72 м и жесткости охранной полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

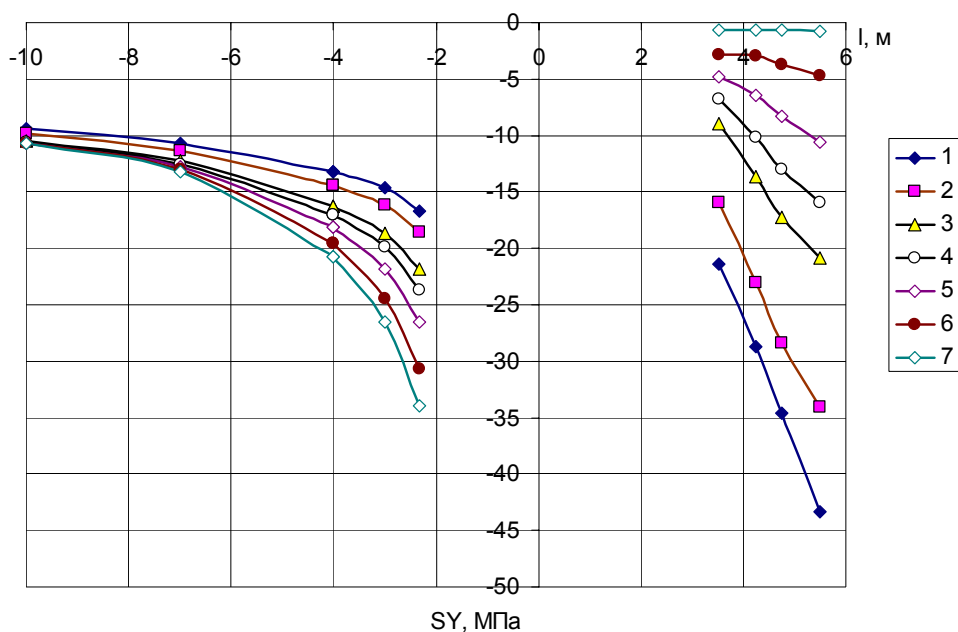


Рисунок Д20 – Расчетные напряжения S_Y по линии 2 (рис. 5.27) проведенной по верхней грани слоя угля и охранной полосы при длине консоли 72 м и жесткости полосы: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

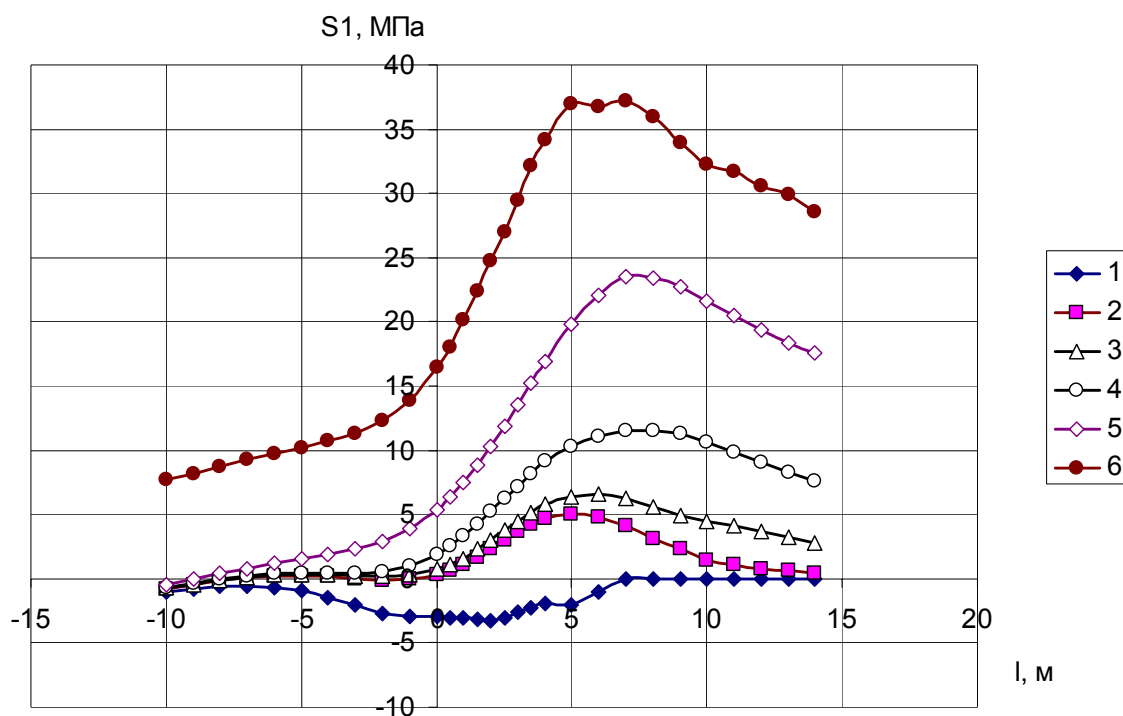


Рисунок Ж1 – Расчетные напряжения S_1 (σ_1) при жесткости охранной полосы 12 ГН рассчитанные по линии 1 (рис. 5.27) при длине консоли: 1 – 6 м, 2 – 18 м, 3 – 30 м, 4 – 42 м, 5 – 57 м, 6 – 72 м

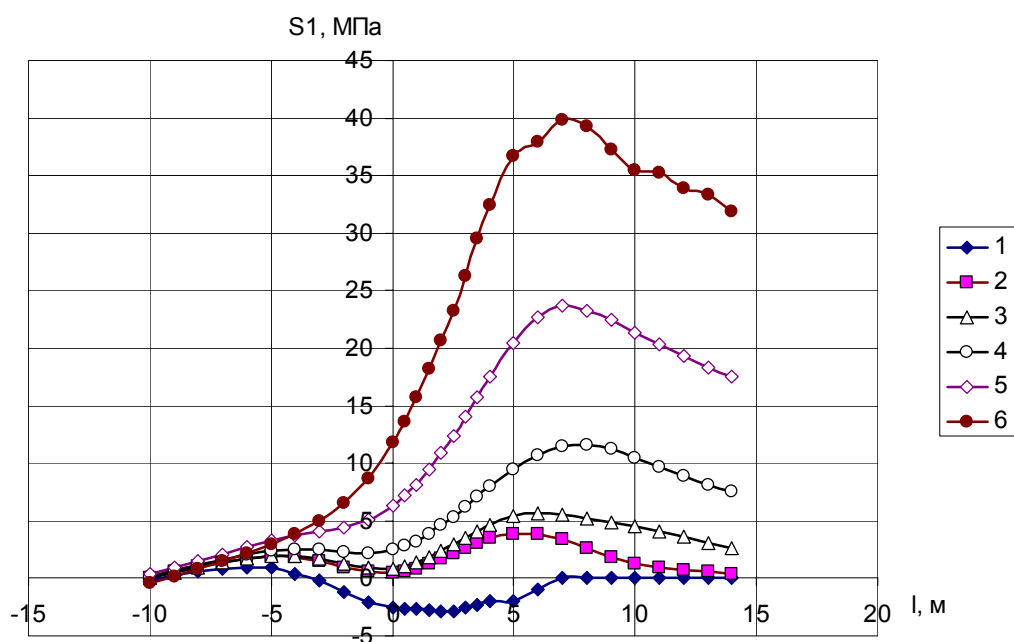


Рисунок Ж2 – Расчетные напряжения S_1 (σ_1) при жесткости охранной полосы 6 ГН рассчитанные по линии 1 (рис. 5.27) при длине консоли: 1 – 6 м, 2 – 18 м, 3 – 30 м, 4 – 42 м, 5 – 57 м, 6 – 72 м

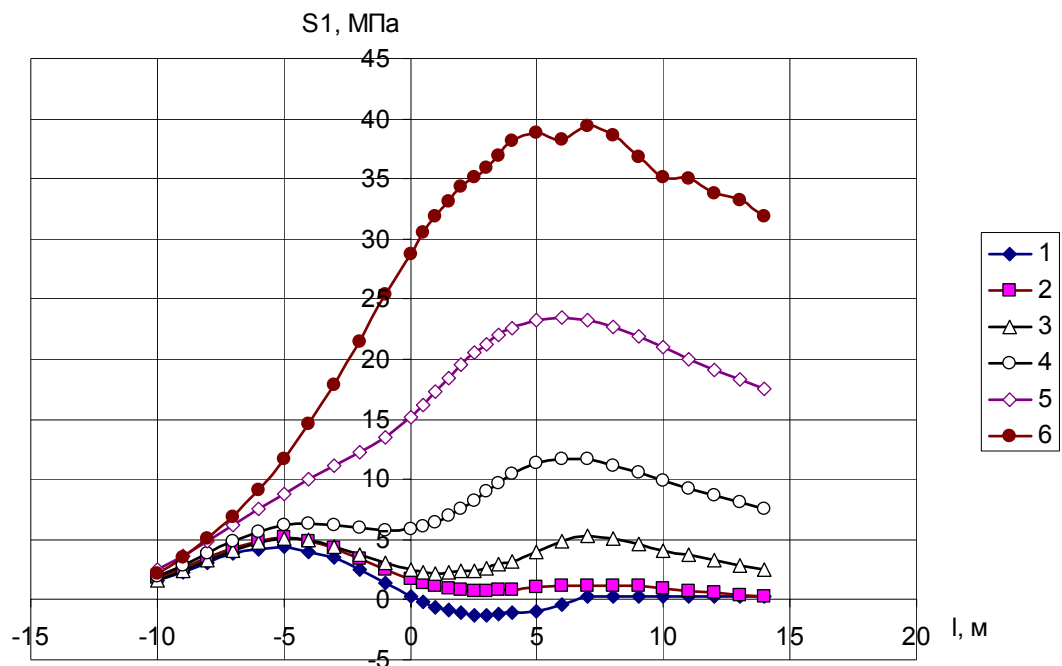


Рисунок Ж3 – Расчетные напряжения S_1 (σ_1) при жесткости охранной полосы 1,2 ГН рассчитанные по линии 1 (рис. 5.27) при длине консоли: 1 – 6 м, 2 – 18 м, 3 – 30 м, 4 – 42 м, 5 – 57 м, 6 – 72 м

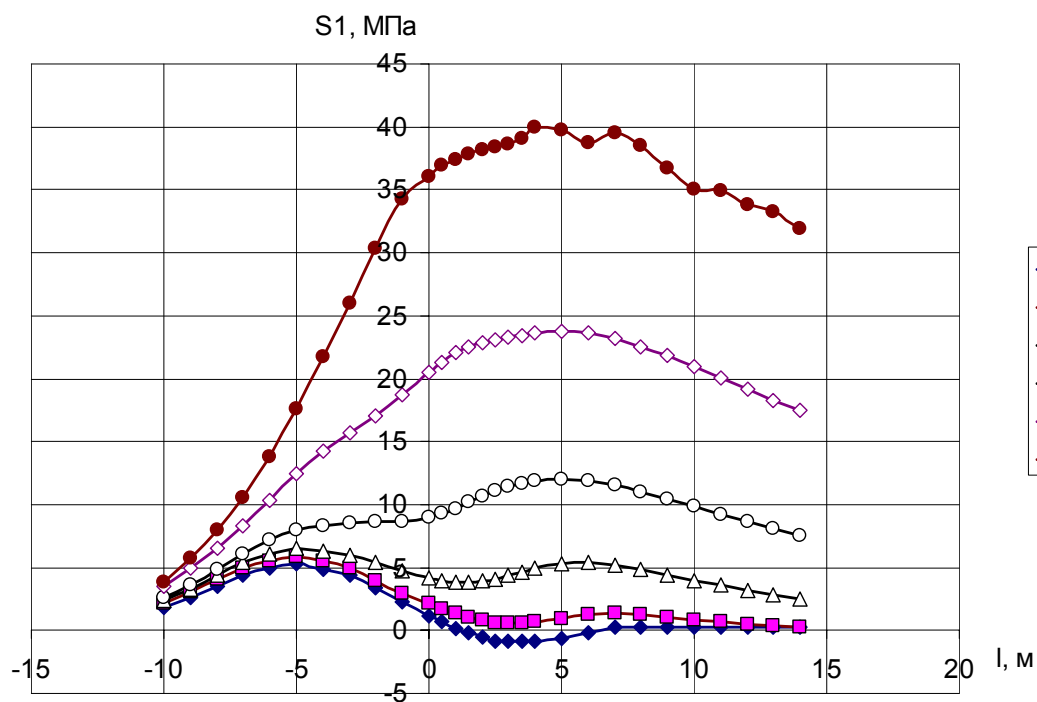


Рисунок Ж4 – Расчетные напряжения S_1 (σ_1) при жесткости охранной полосы 0,6 ГН рассчитанные по линии 1 (рис. 5.27) при длине консоли: 1 – 6 м, 2 – 18 м, 3 – 30 м, 4 – 42 м, 5 – 57 м, 6 – 72 м

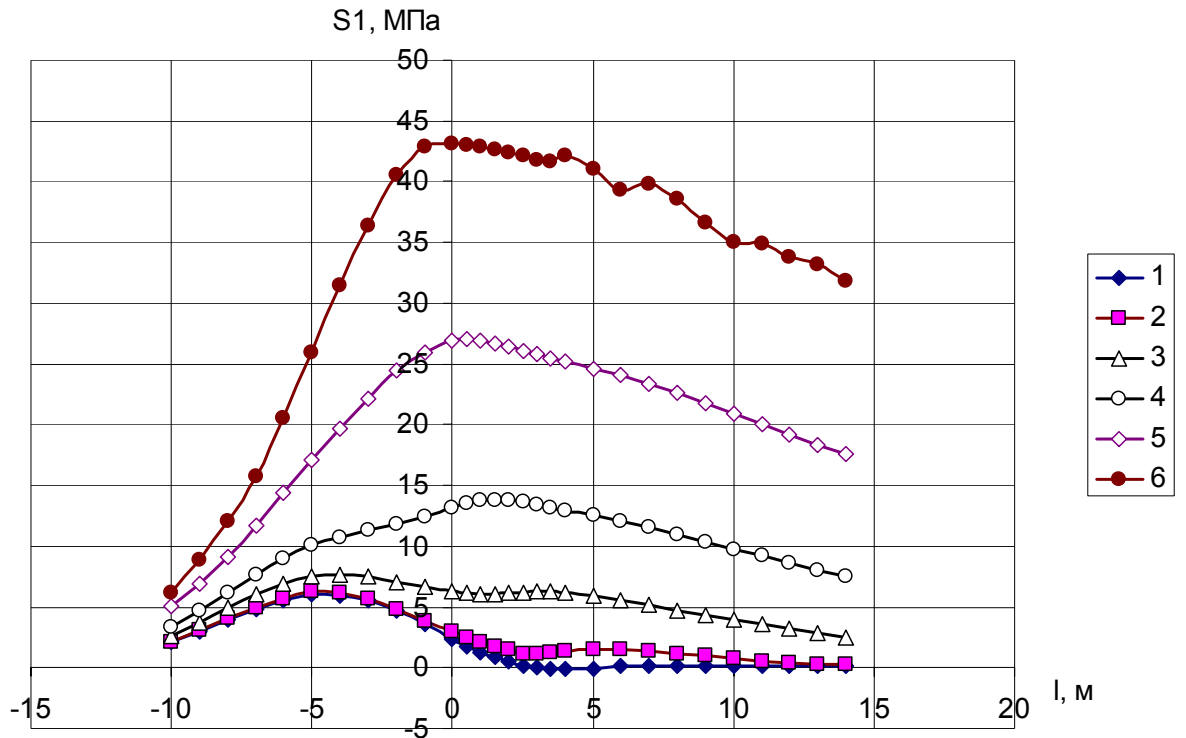


Рисунок Ж5 – Расчетные напряжения S_1 (σ_1) при жесткости охранной полосы 0,2 ГН рассчитанные по линии 1 (рис. 5.27) при длине консоли: 1 – 6 м, 2 – 18 м, 3 – 30 м, 4 – 42 м, 5 – 57 м, 6 – 72 м

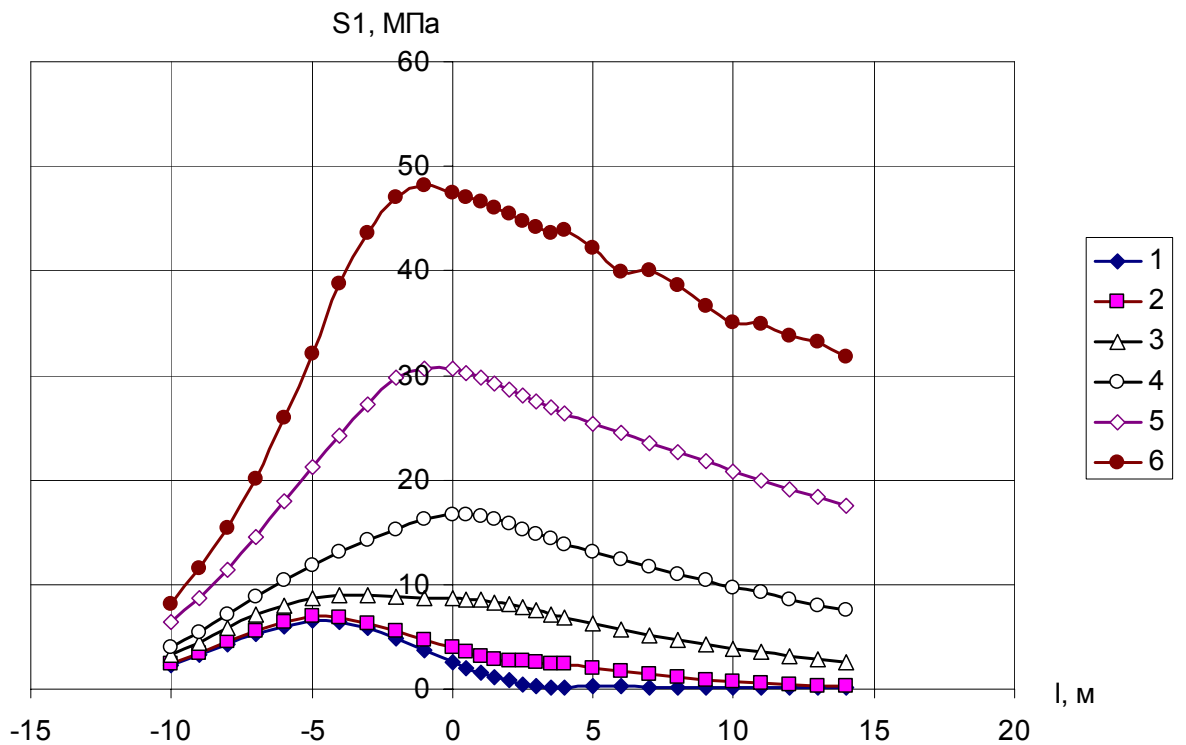


Рисунок Ж6 – Расчетные напряжения S_1 (σ_1) при жесткости охранной полосы 0,02 ГН рассчитанные по линии 1 (рис. 5.27) при длине: 1 – 6 м, 2 – 18 м, 3 – 30 м, 4 – 42 м, 5 – 57 м, 6 – 72 м

ПРИЛОЖЕНИЕ 31

УТВЕРЖДАЮ:

Директор
Хлебодаровского карьероуправления

Н. А. Мирошниченко
«26» мая 2011г.

АКТ-ВНЕДРЕНИЯ

невзрывчатых разрушающих смесей для разрушения негабаритных
блоков гранита в условиях Хлебодаровского карьероуправления

По договоренности между руководством Хлебодаровского карьероуправления и специалистами ИГГ ДонНТУ проведены промышленные испытания по разрушению негабаритных блоков гранита в температурных режимах от +25⁰С до +35⁰С. В качестве невзрывчатых разрушающих смесей использованы два состава НРС:

1. Смесь №1 - кальцинированная сода - 2,0 – 9,0 мас.%, лигносульфонат технический модифицированный - 0,40 - 2,5 мас.%, этановая кислота – 0,25 – 1,1 мас.%, оксид кальция из обожженных известняка и гипса – остальное.

2. Смесь №2 - кальцинованная сода - 3,0 - 9,0 мас.%, сульфитно-дрожжевая барда (СДБ) - 0,5 - 3,0 мас.%, гумат натрия - 1 - 6 мас.%, негашенная известь – остальное.

В период промышленных испытаний проведены следующие научно-исследовательские работы:

- в лабораторных условиях получены зависимости роста давления саморасширения НРС во времени при разных температурных режимах и соотношении входящих компонентов;

- в натуральных условиях исследована динамика роста температуры НРС при различной температуре разрушаемого объекта и окружающей среды;

- получены формулы для расчета паспорта буровых работ.

Разрушено в порядке испытаний более 70м³ негабаритов. Комиссия считает, что использование предложенных НРС для вторичного дробления гранита в температурном диапазоне от +25⁰С до +35⁰С экономично и безопасно. Кроме того улучшаются санитарно-гигиенические и экологические условия труда и окружающей среды.

Председатель комиссии:


_____ Степанов.Ю.А.

Члены комиссии


_____ Чумейко Р.Г.


_____ Касьян Н.Н.


_____ Сахно И.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 32

УТВЕРЖДАЮ:

Директор
Хлебодаровского карьероуправления

Н. А. Мирошниченко

АКТ

приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения горных пород в условиях Хлебодаровского карьероуправления

« 10 » июня 2011 г.

Комиссия в составе представителей "Хлебодаровского Карьероуправления":

Степанов.Ю.А. – начальник горного цеха;

Чумейко Р.Г. – главный маркшейдер;

представителей ИГГ ДонНТУ:

Касьян Н.Н. – зав. каф. РМПИ, докт. техн. наук, проф.;

Сахно И.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук.

На основании протокола испытаний способа невзрывного разрушения горных пород, проведенных на карьере «Хлебодаровского карьероуправления» на примере негабаритных блоков гранита, с параметрами рассчитанными по рекомендациям представителей ИГГ ДонНТУ комиссия считает данный способ прошедшим приемочные испытания и рекомендует:

- провести доработку технологии невзрывного способа разрушения в соответствии с протоколом приемочных испытаний.

Протокол приемочных испытаний от «10» июня 2011 г.

Председатель комиссии: _____ Степанов.Ю.А.

Члены комиссии _____ Чумейко Р.Г.

_____ Касьян Н.Н.

_____ Сахно И.Г.

ПРОТОКОЛ

приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения горных пород на карьере Хлебодаровского карьероуправления

« 10 » июня 2011г.

Комиссия в составе представителей "Хлебодаровского Карьероуправления":

Степанов.Ю.А– начальник горного цеха;

Чумейко Р.Г. – главный маркшейдер;

представителей ИГГ ДонНТУ:

Касьян Н.Н. – зав. каф. РМПИ, докт. техн. наук, проф.;

Сахно И.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук;

в соответствии с программой работ провела приемочные испытания способа невзрывного направленного разрушения негабаритных блоков горных пород на карьере Хлебодаровского карьероуправления.

Технология и конструкторская документация разработаны коллективом Донецкого национального технического университета в составе: заведующего кафедрой РМПИ ДонНТУ, д.т.н., профессора Касьяна Н.Н., доцента кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н. Сахно И.Г. Комиссия отмечает следующее:

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И НАМЕЧЕННАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.

1.1. Назначение и проектная область применения

Способ разрушения негабаритных блоков, при помощи невзрывчатых разрушающих составов, может применяться для разрушения любых типов пород, его рекомендуется применять для разрушения монолитных пород имеющих прочность на одноосное сжатие более 60 МПа. Негабаритные блоки на экспериментальном участке представлены гранитами с прочностью на одноосное сжатие 60-85МПа, имеют неправильную форму.

1.2. Описание технологии работ и расчет параметров разрушения

При реализации предлагаемого способа работы начинают с бурения шпуров для размещения невзрывчатого разрушающего состава (НРС), (см. рис.1), которое производят как правило, вертикально вниз. Угол наклона шпуров в вертикальной плоскости может изменяться в диапазоне 85-105 град, он определяется из соображений обеспечения минимальной полезной длины шпура 0,5м. Расчет расстояния между шпурами производится по формуле, определяющей

длину трещин (расстояния между шпурами), которая получена с использованием энергетического критерия Гриффитса:

$$a = \frac{k_p \cdot (P(t))^2 \cdot r_n^2 \cdot E_m}{2 \cdot k_c \cdot E_{HPC}} \quad (1.1)$$

где: k_p - коэффициент концентрации растягивающих напряжений на стенках шпура;

- $P(t)$ - напряжение развиваемое НРС внутри шпура, которое определяют задаваясь временем разрушения по полученной в лабораторных условиях зависимости давления саморасширения от времени, МПа;

- r_n - радиус шпура, м.

- E_m - модуль упругости разрушаемого материала, МПа;

2 – численный коэффициент преобразований энергетического критерия Гриффитса;

- k_c - коэффициент интенсивности напряжений разрушаемого материала, МПа, ($\sqrt{м}$).

- E_{HPC} - модуль упругости НРС, МПа;

Пробуренные шпуры очищаются от пыли и буровой мелочи продувкой. Материал приготавливают непосредственно в месте ведения работ по разрушению негабарита. НРС представляет собой порошкообразный материал на основе оксида кальция и обладает щелочными свойствами. Материал является пылящим, не горючим, не взрывоопасным, цвета от белого до серого с различными оттенками. Давление расширения составляет 50-80 МПа.

Рабочая смесь приготавливается путем добавления в воду сухого порошка НРС при постоянном перемешивании. Массовые доли компонентов В:НРС составляют 0,3:0,7.

Приготовленную пластическую смесь заливают в шпуры, в донную и устьевую часть которых помещают электроды, которые соединяют в электрическую цепь и соединяют с источником энергии. Подача напряжения в цепь осуществляется через трансформатор с возможностью регулирования напряжения в диапазоне 10-120В. После заливки НРС во все шпуры и монтажа электрической цепи производят принудительное воздействие на скорость гидратации невзрывчатой разрушающей смеси путем пропускания электрического тока с напряжением от 10 до 120В. Инициацию шпуров производят в соответствии с необходимым порядком разрушения.

В результате протекания реакции гидратации раствор НРС увеличивается в объеме и оказывает давление на внутренние стенки шпура, что приводит к образованию трещин и разрушению негабаритного блока по мере их раскрытия. После разрушения электроды извлекается для повторного использования.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД, ПРИ ПОМОЩИ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ

2.1. Результаты испытаний

Работы по разрушению негабаритных блоков на экспериментальном участке проводились в мае-июне 2011г. по технологии изложенной в пункте 1.2.

Пример реализации способа. Для разрушения негабаритного блока гранита по форме близкого к параллелепипеду с размерами 1800x650x550мм с пределом прочности на одноосное растяжение 8,5 МПа при температуре 31⁰С, с помощью перфоратора бурили шпуры диаметром 40мм, длиной 0,5м с шагом 0,4м вдоль наибольшей стороны негабарита. Расстояние между шпурами рассчитывали по формуле (1.1):

$$a = \frac{(1,2 \cdot (10)^2 \cdot 0,021^2 \cdot 3 \cdot 10^4)}{2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0,4 \text{ м.}$$

В качестве разрушающей смеси использовали смесь содержащую кальцинованую соду - 3,0 - 9,0 мас.%, сульфитно-дрожжевую барду (СДБ) - 0,5 - 3,0 мас.%, гумат натрия - 1 - 6 мас.%, негашенную известь – остальное. Приготовленную пластическую смесь заливали в шпуры, в донную и устьевую часть которых помещали электроды, которые соединяли в электрическую цепь и соединяли с источником энергии. Устьевая часть шпура герметизировалась деревянными клиньями. После заливки НРС во все шпуры и монтажа электрической цепи производили принудительное воздействие на скорость гидратации невзрывчатой разрушающей смеси путем пропускания электрического тока с напряжением 10-120В. Подача напряжения в цепь осуществлялась от автокрана через лабораторный трансформатор ЛАТР-2,5. Инициацию шпуров производили последовательно.

Для первой группы шпуров подавали напряжение 40В, что привело к началу образования трещин через 19 минут. Для второй группы шпуров подавали напряжение 80В, что привело к образованию трещин через 15 минут. Для третьей группы шпуров подавали напряжение 125В, что привело к непроизвольному выбросу парогазовой смеси из шпура и выталкиванию деревянного клина из шпура через 3 минуты после подачи напряжения.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что разрушение горных пород, в частности негабаритных блоков гранита, может быть обеспечено при помощи предложенного способа невзрывного разрушения, с параметрами буровых работ, приведенными в разделе 1 при принудительном ускорении реакции гидратации невзрывчатой разрушающей смеси путем пропускания через нее электрического тока.

2.2. Рекомендации

Приемочные испытания способа невзрывного разрушения горных пород в условиях Хлебодаровского карьероуправления считать законченными. Разработанный коллективом ИГГ ДонНТУ способ разрушения горных пород рекомендовать для разрушения пород с прочностью на одноосное сжатие выше 60МПа. Представителям ИГГ ДонНТУ провести доработку способа невзрывного разрушения горных пород и корректировку документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 3 настоящего протокола.

3 ВЫЯВЛЕННЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НЕДОСТАТКИ

В результате проведения испытаний выявлены следующие недостатки.

1. Большая доля ручного труда при приготовлении НРС, и заливке его в шпуры.
2. Неконтролируемый выброс паро-газо-пылевой смеси из шпуров при ускорении реакции, вследствие отсутствия надежной герметизации шпуров.

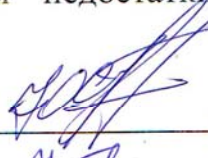
4 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании результатов приемочных испытаний описанного способа невзрывного разрушения горных пород, комиссия пришла к следующим выводам:

1. Разрушение негабаритных блоков при помощи предложенного НРС обеспечивается при применении предложенной технологии работ по разрушению и параметрах рассчитанных согласно методике ИГГ ДонНТУ.
2. Разрушение происходит через 15 и более минут после помещения НРС в шпуры в зависимости от величины подаваемого на электроды напряжения.
3. Приемочные испытания способа невзрывного разрушения горных пород на примере негабаритных блоков гранита, на карьере Хлебодаровского карьероуправления считать законченными.
4. Разработанный коллективом ИГГ ДонНТУ способ разрушения горных пород рекомендовать для разрушения прочных монолитных пород.
5. Представителям ИГГ ДонНТУ провести доработку технологии приготовления и заливки НРС, а также разработать конструкцию герметизирующего устройства, устранив таким образом недостатки, изложенные в разделе 3 настоящего протокола.

Председатель комиссии:

Члены комиссии


_____ Степанов.Ю А


_____ Чумейко.Р.Г


_____ Касьян Н.Н.


_____ Сахно И.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 33

РАСЧЕТ

экономического эффекта от внедрения НРС для разрушения негабаритных блоков гранита в условиях Хлебодаровского карьероуправления.

г. Донецк

17 июня 2013 г.

На карьере Хлебодаровского карьероуправления проводились испытания способа невзрывного разрушения негабаритных блоков горных пород при помощи невзрывчатых разрушающих смесей (Смесь №1 - кальцинированная сода - 2,0 – 9,0 мас.%, лигносульфонат технический модифицированный - 0,40 - 2,5 мас.%, этановая кислота – 0,25 – 1,1 мас.%, оксид кальция из обожженных известняка и гипса – остальное. Смесь №2 - кальцинованная сода - 3,0 - 9,0 мас.%, сульфитно-дрожжевая барда (СДБ) - 0,5 - 3,0 мас.%, гумат натрия - 1 - 6 мас.%, негашенная известь – остальное). Экономический эффект от реализации предложенного способа достигнут путем снижения затрат на разрушение негабарита.

Расчет выполнен путем сравнения статей затрат на разрушение негабаритных блоков буровзрывным способом и с помощью НРС.

Экономия затрат производства на рабочем месте, где внедряется новая технология определяется по формуле:

$$I_P = (I_B - I_H) \times Q_H, \text{ грн.}$$

где I_B , I_H - общие затраты производства на единицу продукции (объем работ) соответственно для базового и нового вариантов, грн.;

Q_H - общий объем производства при использовании новой технологии.

Сравнение проведено по двум вариантам разрушения породного блока песчаника размерами 2,0x0,5x1,0 объемом 1 м³. В сравниваемых вариантах отличается способ разрушения, и количество шпуров, что определяет объем бурения. При проведении сравнения учитываются затраты на заработную плату бурильщика 5-го разряда с тарифной ставкой 200,11 грн/смен. Затраты на заработную плату мастера взрывника на зарядание шпуров и их взрывание не учитываются, принимается, что они одинаковы по времени с операциями на приготовление и заливку в шпуры НРС.

1 Вариант 1. (Разрушение с помощью ВВ).

Затраты на заработную плату.

Объем работ по бурению шпуров.

В случае применения буровзрывного способа разрушения расстояние между шпурами составляет 0,8м. Таким образом, объем бурения составляет 2 шпура по 0,3м, общая длина бурения 0,6м.

Расценка на бурение 1 м шпура перфоратором 5,87грн.

Прямая зарплата бурильщика на бурение 0,6 погонных метров шпура.

$$C_{\sigma} = 5,87 \cdot 0,6 = 3,52 \text{ грн}$$

Затраты на материалы

Расчеты, связанные с определением стоимости материалов, расходуемых при производстве взрывных работ, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Затраты на материалы, расходуемые при взрывных работах C_m

№	Материал	Количество	Цена единицы материала, грн	Стоимость материалов, грн.
1	Аммонит БЖВ, кг	0,200*2	45	18
2	Электродетонатор, шт	2	8	16
Итого				34

2 Вариант 2. (Разрушение негабарита с помощью НРС).

Затраты на заработную плату.

Для способа с применением НРС, согласно рекомендациям ИГГ ДонНТУ расстояние между шпурами 0,4м. Таким образом, необходимо бурение 4 шпуров по 0,4м, общая длина шпуров 1,6м.

Прямая зарплата бурильщика на бурение 5 погонных метров шпура

$$C_{\sigma} = 5,87 \cdot 1,4 = 8,21 \text{ грн}$$

Затраты на материалы.

Расчеты, связанные с определением стоимости материалов, по варианту 2 сведены в табл. 2. В каждый шпур заливали раствор НРС на глубину 0,4м.

Таблица 2. Затраты на материалы, расходуемые при использовании НРС

№	Материал, кг	Количество	Цена единицы материала, грн.	Стоимость материалов, грн.
1	НРС	0,8*4	5	16

3. Общие затраты по вариантам приведены в табл. 3.

Таблица 3. Суммарные затраты по вариантам

Затраты, грн	Значение	
	Вариант 1 (ВВ)	Вариант 2 (НРС)
Материалы	34	16
Зарплата	3,52	8,21
Итого	37,52	24,21

Экономический эффект от применения способа разрушения негабаритных блоков гранита с помощью невзрывчатых разрушающих смесей на 1 м^3 породы в условиях Хлебодаровского карьероуправления составит:

$$I_P = I_B - I_H = 37,52 - 24,21 = 13,31 \text{ грн./} 1 \text{ м}^3$$

Главный инженер

Хлебодаровского карьероуправления



Н. А. Мирошниченко

проф. каф. РМПИ ГВУЗ ДонНТУ

Н.Н. Касьян

доц. каф. РМПИ ГВУЗ ДонНТУ

И.Г. Сахно

ПРИЛОЖЕНИЕ 34

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер

ПАО "Шахтоуправление "Покровское"

Е.Н. Халимендигов



приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения
негабаритных блоков горных пород в 4 южном конвейерном штреке
центральной панели бл. 8

« 26 » января 2011г.

Комиссия в составе представителей ПАО "Шахтоуправление "Покровское":

Янжула А.С. – зам. главного инженера по технологии, председатель комиссии;
Бондаренко В.Ф. – начальник участка УГМР;

представителей ИГГ ДонНТУ:


Касьян Н.Н. – зав. каф. РМПИ, докт. техн. наук, проф. ;
Сахно И.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук;
Негрей С.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук.

На основании протокола испытаний способа невзрывного разрушения негабаритных блоков горных пород в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8, с параметрами рассчитанными по рекомендациям представителей ИГГ ДонНТУ комиссия считает данный способ прошедшим приемочные испытания и рекомендует:

- провести доработку технологии невзрывного способа разрушения негабаритных блоков и корректировку методики расчета параметров в соответствии с протоколом приемочных испытаний.

Протокол приемочных испытаний от « » января 2011г.

Председатель комиссии:

 Янжула А.С.

Члены комиссии

 Бондаренко В.Ф.

 Касьян Н.Н.

 Сахно И.Г.

 Негрей С.Г.

ПРОТОКОЛ

приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения негабаритных блоков горных пород в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8

« 26 » января 2011г.

Комиссия в составе представителей ПАО "Шахтоуправление "Покровское":

Янжула А.С. – зам. главного инженера по технологии, председатель комиссии;
Бондаренко В.Ф. – начальник участка УГМР;

представителей ИГГ ДонНТУ:

Касьян Н.Н. – зав. каф. РМПИ, докт. техн. наук, проф.;
Сахно И.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук;
Негрей С.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук.

в соответствии с программой работ провела приемочные испытания способа невзрывного разрушения негабаритных блоков горных пород в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8 на участке выработки расположенном между пикетами ПК37-42.

Технология и конструкторская документация разработаны коллективом Донецкого национального технического университета в составе: заведующего кафедрой РМПИ ДонНТУ, д.т.н., профессора Касьяна Н.Н., доцента кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н. Сахно И.Г., доцента кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н. Негрей С.Г. Комиссия отмечает следующее:

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И НАМЕЧЕННАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ И МЕСТА ИСПЫТАНИЙ

1.1 Назначение и проектная область применения

Способ разрушения негабаритных блоков, при помощи невзрывчатых разрушающих веществ, может применяться для дробления любых типов пород в случае невозможности или сложности их разрушения механическим и взрывным способом, его рекомендуется применять для разрушения монолитных блоков пород, как правило имеющих прочность на одноосное сжатие более 60 МПа.

1.2. Описание технологии работ

При реализации предлагаемого способа работы начинают с бурения шпуров для размещения невзрывчатого разрушающего вещества (НРВ), (см. рис.1), которое производят со стороны наибольшей открытой поверхности объекта, как правило, вертикально вниз. Угол наклона шпуров в вертикальной плоскости может изменяться в диапазоне 65-80 град, при этом он зависит от мощности подрывки и определяется из соображений обеспечения минимальной полезной длины шпура 0,5м. Шпуры бурят рядами в плоскости предполагаемого раскола, расстояние между шпурами для условий рассматриваемой выработки составляет 0,3-0,4м. Возможный диаметр шпуров - от 20 до 50 мм, рекомендуемый 43мм. Пробуренные шпуры очищаются от пыли и буровой мелочи продувкой.

После этого в пробуренные шпуры заливают приготовленный раствор невзрывчатого разрушающего материала на глубину равную 0,9 длины шпура. Затем устьевая часть шпура герметизируется глиняной забойкой. Кроме того в качестве герметизатора устьевой части шпура устанавливаются деревянные клинья (рис. 1). В этом случае после установки клиньев, сверху на разрушаемый объект укладывается настил из досок или отрезок конвейерной ленты, для предотвращения вылета клина из шпура при некачественной его установке. Также в качестве средства распора может быть применена деревянная стойка устанавливаемая сверху на клин.

В результате протекания реакции гидратации раствор НРВ увеличивается в объеме и оказывает давление на стенки шпура, что приводит к разрушению пород по плоскости раскола созданной рядами шпуров с НРВ.

Разрушение негабарита, при применении ускорителей гидратации, разработанных коллективом ИГГ ДонНТУ [5] происходит в течение 4-6 часов. После откола блока пород плоскости его раскола смачиваются водой для предотвращения образования пылевого облака, поскольку материал является пылящим. Средства герметизации извлекаются для повторного использования.

Согласно ТУ [1] на НРВ материал приготавливают непосредственно в месте ведения работ по разрушению негабарита.

НРВ представляет собой порошкообразный материал на основе оксида кальция и обладает щелочными свойствами. Материал является пылящим, не горючим, не взрывоопасным, цвета от белого до серо-желтого с различными оттенками. Давление расширения составляет 80-120 МПа.

Рабочая смесь приготавливается путем добавления в воду сухого порошка НРВ при постоянном перемешивании с добавлением пластификатора СП-6. Массовые доли компонентов В:НРВ:СП-6 составляют 0,25:0,73:0,02. Расход материала на 1 м.п. шпура диаметром 43мм составляет около 2,2 кг. Приготовленную порцию раствора следует залить в шпуры в течение 20 мин после затворения порошка водой. В качестве ускорителя реакции гидратации при необходимости сокращения времени разрушения пород в приготавливаемый раствор может добавляться Na_2CO_3 . безводный карбонат натрия (кальцинированная сода) в соотношении 0,01-0,02 мас.

дол., при этом для стабилизации свойств и повышения пороговой температуры парообразования следует также добавить в раствор хлорид натрия 0,1-0,2 мас. дол. воды В этом случае шпурсы с залитым раствором НРВ должны быть герметизированы в течение 10 мин после приготовления состава.

Пример приготовления материала из 6 кг порошка:

В емкость 10-12 л влить 2,0 л воды, в которую добавить пластификатор СП-6 в количестве 100-240 мл, после чего полученную смесь перемешать. В готовый раствор при постоянном перемешивании малыми порциями засыпать 6 кг порошка НРВ. После чего для ускорения реакции гидратации добавить 40гр Na_2CO_3 , и 200 грамм NaCl .

При необходимости приготовления других количеств смеси, количество компонентов изменяется в соответствующей пропорции.

1.3 . Характеристика условий и места испытания

Приемочные испытания осуществлялись в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8. Экспериментальный участок был расположен между пикетами ПК37-42.

Негабаритные блоки на экспериментальном участке представлены в основном песчаниками мелкозернистыми с прочностью на одноосное сжатие 60-85МПа, имеют неправильную форму близкую к прямоугольному параллелепипеду, с толщиной 0,4-0,6м. Температура пород составляет 31,4 °С.

2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТНЫХ БЛОКОВ, ПРИ ПОМОЩИ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

2.1 Расчет расстояния между шпурами производим по формуле, определяющей длину трещин (расстояния между шпурами), которая получена с использованием энергетического критерия Гриффитса и обусловлена медленно возрастающей нагрузкой растягивающих напряжений внутри шпура под действием НРВ. Протяженность трещины зависит от диаметра шпура, модуля упругости НРВ и параметров горной породы E_m , k_{lc} , $P(t^*)$:

$$L_{mp} = \frac{P^2(t^*)r_0^2 E_m}{2(k_{lc})^2 E_{HPC}} \quad (3.1)$$

где: 2 – численный коэффициент преобразований энергетического критерия Гриффитса;

- $P(t^*)$ - напряжение устойчивого развития трещин, развиваемое НРВ внутри шпура, МПа;

- r_0^2 - радиус шпура, м.

- E_m - модуль упругости разрушаемого материала, МПа;
- $E_{НРС}$ - модуль упругости НРВ, МПа;
- k_{Ic} - коэффициент интенсивности напряжений разрушаемого материала, МПа, ($\sqrt{м}$).

Расчет расстояния между шпурами производят в следующей последовательности:

- $P(t^*)$ берется равной давлению расширения через заданное время t^* разрушения объекта (рис. 4).

- $E_{НРС}$ берется равным 10^4 МПа.

Выражение (2.1) позволяет рассчитывать расстояние между шпурами (паспорт буровых работ) для отделения породы от массива.

Разработаны методика и стенд для получения рабочих характеристик НРВ - $P(t)$. Стенд представляет собой жесткий «недеформируемый» цилиндр, в который заливают приготовленную рабочую смесь, расширение которой при затвердевании выдвигает поршень, движение которого регистрируется индикатором часового типа и динамометром. По упругой деформации и тарировочной кривой динамометра определяют усилие, развиваемое затвердевающей смесью. Стенд разработан в ДонНТУ [3, 4].

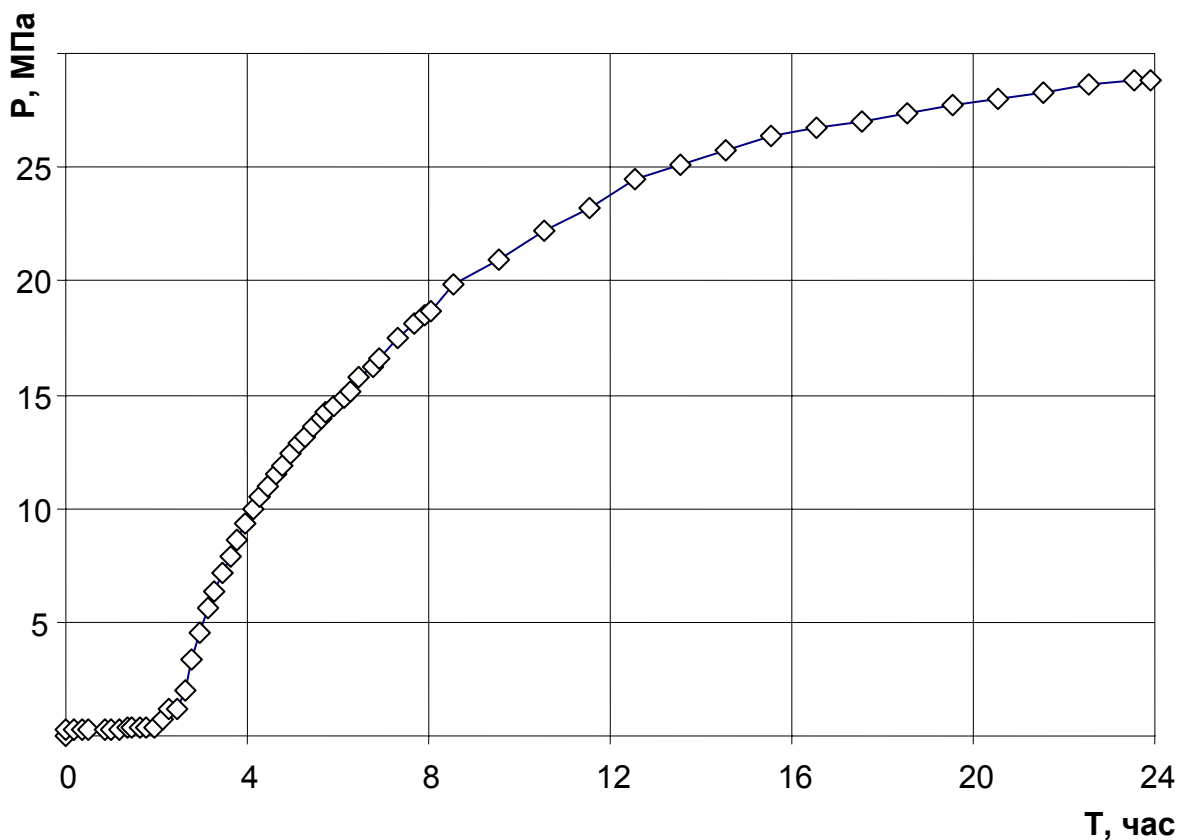


Рис. 4. График роста давления (P) саморасширения НРВ-80 во времени (T) при отсутствии предварительного нагружения

2.2 Выбор схемы расположения шпуров

Схема расположения шпуров определяется максимально возможным размером кусков разрушенного объекта. Расстояние a между шпурами в ряду образуемой плоскости разрушения определяется расчетной формулой (3.1), а расстояние между рядами шпуров b выбирается в зависимости от величины необходимого размера разрушенного блока.

2.3 Пример расчета параметров

Пользуясь формулой (3.1) и рисунком 2 рассчитаем расстояние между шпурами для следующих условий – негабаритный блок представлен мелкозернистым песчаником с пределом прочности на одноосное растяжение 8,5 МПа, диаметр шпура для заряжания НРВ - 42мм, температура объекта – 31 °С, время разрушения 4 часа.

$$L_{mp} = \frac{P^2 (t^*)^2 E_m}{2(K_{lc})^2 E_{HPC}}$$

$$L_{mp} = \left[(10^2) \cdot \frac{0.021^2 \cdot 1.8 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 1^2 \cdot 10^9} \right] = 0.397$$

Таким образом, рекомендуемое расстояние между шпурами в ряду составляет 40 см.

3. ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТНЫХ БЛОКОВ, ПРИ ПОМОЩИ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

3.1. Ход испытаний

Работы по разрушению негабаритных блоков на экспериментальном участке проводились в ноябре-декабре 2010 г. по технологии изложенной в пункте 1.2.

3.2. Результаты проведения испытаний

Внедрение результатов работы проводилось в несколько этапов. На первом этапе эксперимент был проведен на пикете 37 4 южного конвейерного штрека центральной панели бл. 8. Для разрушения был выбран негабарит по форме близкий к призме с основанием в виде трапеции с размерами большего основания и высоты соответственно 540x500мм, и высотой призмы – 400мм. В блоке был пробурен один шпур глубиной 15см и диаметром 36мм, таким образом расстояние от оси шпура до двух ближайших плоскостей свободы негабарита составило 240 и

250мм соответственно. В шпур на глубину 10 см залили приготовленный согласно п. 1.2. состав НРВ-80 без ускоряющих добавок. Устьевая часть герметизировалась деревянным клином, под который помещали слой глины.

Через 18 часов после заливки НРВ в шпур произошел раскол блока на 3 части.

После разрушения приведенного негабаритного блока первый этап промышленной апробации способа был закончен, и может считаться успешно завершенным.

На втором этапе экспериментальный участок находился на пикете 42 4 южного конвейерного штрека центральной панели бл. 8.

Для разрушения было выбрано 5 негабаритных блоков по форме близкий к параллелепипеду различных размеров, а также участок подрывки. Согласно рассчитанным параметрам в блоках были пробурены шпуры диаметром 36мм, средней длиной 40см, с углом наклона шпуров к горизонтали 65-80 градусов. На точке подрывки было пробурено 2 шпура длиной 50см с расстоянием между ними 35см, и расстоянием до свободной боковой поверхности 30см.

В пробуренные шпуры заливали приготовленный согласно п. 1.2. состав НРВ-80 с ускоряющими добавками. После заливки шпуры герметизировались клиньями.

Через 2 часа после заливки раствора в шпуры в процессе протекания активной стадии реакции гидратации НРВ клинья герметизирующие шпуры начали выдавливаться из шпуров двух негабаритных блоков, в результате чего произошло вышпуривание материала, что вызвано некачественной установкой клиньев. Через 2,5 часа после заливки раствора, по одному негабаритному блоку произошло разрушение донной части шпура, с вылетом НРВ, что было вызвано недостаточным размером породной пробки (перебуром шпура по длине). Через 4 часа после заливки шпуров начало происходить разрушение по участку подрывки, за счет прорастания магистральной трещины от шпура с НРВ к боковой границе блока. Также началось разрушение негабаритов с качественной герметизацией шпуров. В результате через 6 часов после заливки состава в шпуры было достигнуто разрушение по негабаритам и произошел откол породы на участке подрывки.

В процессе приемочных испытаний выявлены эксплуатационные и конструктивные недостатки, отмеченные в разделе 4.

3.3. Рекомендации

Приемочные испытания способа невзрывного разрушения негабаритных блоков горных пород в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8 считать законченными.

Разработанный коллективом ИГГ ДонНТУ способ разрушения негабаритных блоков рекомендовать для внедрения в условиях негабаритов представленных монолитными породами с прочностью на одноосное сжатие выше 60МПа.

Представителям ИГГ ДонНТУ провести доработку способа разрушения негабаритных блоков, при помощи невзрывчатых разрушающих веществ и

корректировку документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 4 настоящего протокола.

4 ВЫЯВЛЕННЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НЕДОСТАТКИ

Недостатками являются: длительное время разрушения негабарита, несовершенство технологии приготовления, и заливки НРВ в шпуры, несовершенство технологии герметизации шпура.

Необходимо усовершенствовать технологию инициации материала в шпуре и сократить время разрушения до 1-2 часов, механизировать процесс приготовления и размещения готового состава в шпуры, а также разработать конструкцию замка для герметизации устьев шпуров.

5 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании результатов приемочных испытаний разработанного способа разрушения негабаритных блоков, при помощи невзрывчатых разрушающих веществ, комиссия пришла к следующим выводам:

1. Разрушение негабаритных блоков горных пород обеспечивается при параметрах способа рассчитанных согласно методике ИГГ ДонНТУ.

2. Разрушение происходит в течение 4-6 часов после заливки раствора НРВ в шпуры.

3. Приемочные испытания способа невзрывного разрушения негабаритных блоков горных пород в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8, разработанного в ДонНТУ считать законченными.

4. Способ разрушения негабаритных блоков, при помощи невзрывчатых разрушающих веществ, рекомендовать для внедрения в условиях необходимости дробления негабаритов представленных монолитными породами с прочностью на одноосное сжатие выше 60МПа.

5. Представителям ИГГ ДонНТУ провести доработку технологии и корректировку документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 4 настоящего протокола.

6 ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК


1. ТУ У В.2.7-26.5-24478901-004:2007 Невибухова руйнуюча речовина. Технічні умови. – на заміну ТУ У БВ 2.7.00030937.089397. Без обмеження терміну дії. – Харьков: Госстандарт. Харьковский центр стандартизации и аэрологии, 2007-14с.
2. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1969. – 734 с.
3. Сахно И.Г. Лабораторные исследования свойств и разработка методов управления компрессионно - прочностными характеристиками


- саморасширяющихся составов/ Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. - №1. – С. 32-38.
4. Касьян Н.Н., Овчаренко Н.А., Петренко Ю.А., Сахно И.Г., Самусь О.Л. Лабораторные исследования работы невзрывчатых разрушающих веществ при упрочнении массивов разрушенных горных пород. / Науковий вісник національного гірничого університету. – 2008. – №8. – С.50-52.
 5. Касьян Н.Н., Сахно И.Г., Шуляк Я.О. Обоснование методов управления скоростью роста распорно-компрессионных характеристик невзрывчатых разрушающих веществ / Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. - №2. – С. 218-228.

Председатель комиссии:


_____ Янжула А.С.

Члены комиссии


_____ Бондаренко В.Ф.


_____ Касьян Н.Н.


_____ Сахно И.Г.


_____ Негрей С.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 35

УТВЕРЖДАЮ:

Директор
Хлебодаровского карьероуправления

Н. А. Мирошниченко

АКТ

приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения горных пород в условиях Хлебодаровского карьероуправления

« 04 » мая 2011 г.

Комиссия в составе представителей "Хлебодаровского Карьероуправления":

Степанов.Ю.А. – начальник горного цеха;
Чумейко Р.Г. – главный маркшейдер;

представителей ИГГ ДонНТУ:

Касьян Н.Н. – зав. каф. РМПИ, докт. техн. наук, проф.;
Сахно И.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук;
Шуляк Я.О. - асп. каф. РМПИ.

На основании протокола испытаний способа невзрывного разрушения горных пород, проведенных на карьере «Хлебодаровского карьероуправления» на примере негабаритных блоков гранита, с параметрами рассчитанными по рекомендациям представителей ИГГ ДонНТУ комиссия считает данный способ прошедшим приемочные испытания и рекомендует:

- провести доработку технологии невзрывного способа направленного разрушения в соответствии с протоколом приемочных испытаний.

Протокол приемочных испытаний от «04» мая 2011 г.

Председатель комиссии:

Степанов.Ю.А.

Члены комиссии

Чумейко Р.Г.

Касьян Н.Н.

Сахно И.Г.

Шуляк Я.О.

ПРОТОКОЛ

приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения горных пород на карьере
Хлебодаровского карьероуправления

« 04 » мая 2011г.

Комиссия в составе представителей "Хлебодаровского Карьероуправления":

Степанов.Ю.А– начальник горного цеха;

Чумейко Р.Г. – главный маркшейдер;

представителей ИГГ ДонНТУ:

Касьян Н.Н. – зав. каф. РМПИ, докт. техн. наук, проф.;

Сахно И.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук;

Шуляк Я.О. - асп. каф. РМПИ;

в соответствии с программой работ провела приемочные испытания способа невзрывного направленного разрушения негабаритных блоков горных пород на карьере Хлебодаровского карьероуправления.

Технология и конструкторская документация разработаны коллективом Донецкого национального технического университета в составе: заведующего кафедрой РМПИ ДонНТУ, д.т.н., профессора Касьяна Н.Н., доцента кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н. Сахно И.Г., аспиранта кафедры РМПИ ДонНТУ, Шуляка Я.О. Комиссия отмечает следующее:

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И НАМЕЧЕННАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.

1.1 Назначение и проектная область применения

Способ направленного разрушения негабаритных блоков, при помощи невзрывчатых разрушающих составов, может применяться для разрушения любых типов пород, его рекомендуется применять для разрушения монолитных блоков имеющих прочность на одноосное сжатие более 60 МПа.

Негабаритные блоки на экспериментальном участке представлены гранитами с прочностью на одноосное сжатие 60-85МПа, имеют неправильную форму.

1.2. Описание технологии работ и расчет параметров разрушения

При реализации предлагаемого способа работы начинают с бурения шпуров для размещения невзрывчатого разрушающего состава (НРС), (см. рис.1), которое производят со стороны наибольшей открытой поверхности объекта, как правило, вертикально вниз. Угол наклона шпуров в вертикальной плоскости может

изменяться в диапазоне 85-105 град, он определяется из соображений обеспечения минимальной полезной длины шпура 0,5м.

Расчет расстояния между шпурами производится по формуле, определяющей длину трещин (расстояния между шпурами), которая получена с использованием энергетического критерия Гриффитса и обусловлена медленно возрастающей нагрузкой растягивающих напряжений внутри шпура под действием НРС:

$$a = \frac{k_p \cdot (P(t))^2 \cdot r_n^2 \cdot E_m}{2 \cdot k_c \cdot E_{НРС}} \quad (1.1)$$

где: k_p - коэффициент концентрации растягивающих напряжений на стенках шпура;

- $P(t)$ - напряжение развиваемое НРС внутри шпура, которое определяют задаваясь временем разрушения по полученной в лабораторных условиях зависимости давления саморасширения от времени, МПа;

- r_n - радиус шпура, м.

- E_m - модуль упругости разрушаемого материала, МПа;

2 – численный коэффициент преобразований энергетического критерия Гриффитса;

- k_c - коэффициент интенсивности напряжений разрушаемого материала, МПа, ($\sqrt{м}$).

- $E_{НРС}$ - модуль упругости НРС, МПа;

Пробуренные шпуры очищаются от пыли и буровой мелочи продувкой. В качестве разрушающей смеси использовали смесь содержащую оксид кальция, кальцинированную соду, лигносульфонат технический модифицированный, и этановую кислоту при следующем соотношении компонентов, мас. %: кальцинированная сода - 2,0 – 9,0, лигносульфонат технический модифицированный - 0,40 - 2,5, этановая кислота – 0,25 – 1,1, оксид кальция из обожженных известняка и гипса – остальное.

Материал приготавливают непосредственно в месте ведения работ по разрушению негабарита. НРС представляет собой порошкообразный материал на основе оксида кальция и обладает щелочными свойствами. Материал является пылящим, не горючим, не взрывоопасным, цвета от белого до серо-желтого с различными оттенками. Давление расширения составляет 50-80 МПа.

Рабочая смесь приготавливается путем добавления в воду с этановой кислотой сухого порошка НРС при постоянном перемешивании. Массовые доли компонентов В:НРС составляют 0,25:0,75.

Приготовленную пластическую смесь помещали внутрь патронов. Патрон представлял собой две половины трубы полученные продольным диаметральной разрезом, каждая из которых имеет глухой торец. Половины патрона соединяли и фиксировали изоляционной лентой. Собранные таким образом патроны помещали в шпуры. При этом диаметральные разрезы ориентировали так, чтобы условная линия, проведенная через все разрезы, совпадала с необходимым направлением

разрушения. В результате протекания реакции гидратации раствор НРС увеличивается в объеме и оказывает давление на внутренние стенки патрона, что приводило к их перемещению во взаимнопротивоположные стороны и приводило к образованию магистральной трещины, в необходимом направлении разрушения. После разрушения патроны извлекаются для повторного использования.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД, ПРИ ПОМОЩИ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ

2.1. Результаты испытаний

Работы по разрушению негабаритных блоков на экспериментальном участке проводились в мае 2011г. по технологии изложенной в пункте 1.2.

Пример реализации способа. Для разрушения негабаритного блока гранита размерами 1500x750x600мм с пределом прочности на одноосное растяжение 8,5 МПа при температуре 31⁰С, с помощью перфоратора бурили шпуры диаметром 40мм, длиной 0,5м с шагом 0,4м вдоль наибольшей стороны негабарита. Расстояние между шпурами рассчитывали по формуле (1.1):

$$a = \frac{(1,2 \cdot (10)^2 \cdot 0,021^2 \cdot 3 \cdot 10^4)}{2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0,4 \text{ м.}$$

В шпуры помещали патроны с НРС приготовленные по технологии описанной в п. 1.2. Устьевая часть часть шпура не герметизировалась.

Через 5 часов после установки патронов с НРС в шпур были слышны потрескивания, и в блоке появились трещины соединяющие диаметрально прорези в патронах. в результате развития трещин произошло разрушение блока на части.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- разрушение горных пород, в частности негабаритных блоков гранита, может быть обеспечено при помощи предложенных патронов с НРС, с параметрами буровых работ приведенными в разделе 1;

- разрушение негабаритных блоков при помощи предложенных патронов с НРС, позволяет получить магистральную трещину, лежащую в плоскости направленного разрушения.

2.2. Рекомендации

Приемочные испытания способа невзрывного разрушения горных пород в условиях Хлебодаровского карьероуправления считать законченными.

Разработанный коллективом ИГГ ДонНТУ способ направленного разрушения горных пород и патроны НРС рекомендовать для разрушения

негабаритов представленных монолитными породами с прочностью на одноосное сжатие выше 60МПа.

Представителям ИГГ ДонНТУ провести доработку способа невзрывного разрушения горных пород и корректировку документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 3 настоящего протокола.

3 ВЫЯВЛЕННЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НЕДОСТАТКИ

В результате проведения испытаний выявлены следующие недостатки.

1. Большая доля ручного труда при приготовлении НРС, зарядании патронов НРС и помещении их в шпуры.
2. Длительное время разрушения горных пород.

4 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании результатов приемочных испытаний описанного способа невзрывного разрушения горных пород, комиссия пришла к следующим выводам:

1. Разрушение негабаритных блоков при помощи предложенного НРС обеспечивается при применении предложенной конструкции патрона и параметрах способа рассчитанных согласно методике ИГГ ДонНТУ.

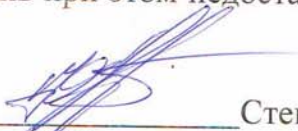
2. Разрушение происходит в течение 5-7 часов после помещения патронов НРС в шпуры.

3. Приемочные испытания способа невзрывного разрушения горных пород на примере негабаритных блоков гранита, на карьере Хлебодаровского карьероуправления считать законченными.

4. Разработанный коллективом ИГГ ДонНТУ способ направленного разрушения горных пород и патроны НРС рекомендовать для разрушения негабаритов представленных монолитными породами с прочностью на одноосное сжатие выше 60МПа.

5. Представителям ИГГ ДонНТУ провести доработку технологии и корректировку документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 3 настоящего протокола.

Председатель комиссии:


_____ Степанов.Ю.А

Члены комиссии


_____ Чумейко.Р.Г


_____ Касьян Н.Н.


_____ Сахно И.Г.


_____ Шуляк Я.О.

ПРИЛОЖЕНИЕ 36

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер

ПАО "Шахтоуправление "Покровское"

Е.Н. Халимендигов

АКТ

приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения прочных пород почвы в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8

« 26 » января 2011 г.

Комиссия в составе представителей ПАО "Шахтоуправление "Покровское":

Янжула А.С. – зам. главного инженера по технологии, председатель комиссии;
Бондаренко В.Ф. – начальник участка УГМР;

представителей ИГГ ДонНТУ:

Касьян Н.Н. – зав. каф. РМПИ, докт. техн. наук, проф.;

Сахно И.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук;

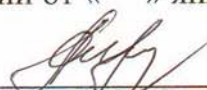
Негрей С.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук.

На основании протокола испытаний способа невзрывного разрушения прочных пород почвы в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8, с параметрами рассчитанными по рекомендациям представителей ИГГ ДонНТУ комиссия считает данный способ прошедшим приемочные испытания и рекомендует:

- провести доработку технологии невзрывного способа разрушения пород почвы и корректировку конструкторской документации в соответствии с протоколом приемочных испытаний.

Протокол приемочных испытаний от « » января 2011 г.


Председатель комиссии:

 Янжула А.С.

Члены комиссии

 Бондаренко В.Ф.

 Касьян Н.Н.

 Сахно И.Г.

 Негрей С.Г.

ПРОТОКОЛ

приемочных испытаний, способа невзрывного разрушения прочных пород почвы в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8

« 26 » января 2011г.

Комиссия в составе представителей ПАО "Шахтоуправление "Покровское":

Янжула А.С. – зам. главного инженера по технологии, председатель комиссии;
Бондаренко В.Ф. – начальник участка УГМР;

представителей ИГГ ДонНТУ:

Касьян Н.Н. – зав. каф. РМПИ, докт. техн. наук, проф.;
Сахно И.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук;
Негрей С.Г. - доц. каф. РМПИ, канд. техн. наук.

в соответствии с программой работ провела приемочные испытания способа невзрывного разрушения прочных пород почвы в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8 на участке выработки расположенном на пикете ПК42.

Технология и конструкторская документация разработаны коллективом Донецкого национального технического университета в составе: заведующего кафедрой РМПИ ДонНТУ, д.т.н., профессора Касьяна Н.Н., доцента кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н. Сахно И.Г., доцента кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н. Негрей С.Г. Комиссия отмечает следующее:

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И НАМЕЧЕННАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ И МЕСТА ИСПЫТАНИЙ

1.1 Назначение и проектная область применения

Способ разрушения прочных пород почвы, при помощи невзрывчатых разрушающих веществ, рекомендуется применять в выработках с породами почвы имеющими прочность на одноосное сжатие более 60 МПа

1.2. Описание технологии работ

При реализации предлагаемого способа работы начинают с бурения шпуров для размещения невзрывчатого разрушающего вещества (НРВ), (см. рис.1), которое производят со стороны открытой поверхности объекта, как правило, вертикально

вниз. Угол наклона шпуров в вертикальной плоскости может изменяться в диапазоне 65-80 град, при этом он зависит от мощности подрывки и определяется из соображений обеспечения минимальной полезной длины шпура 0,5м. Шпуры бурят рядами в плоскости предполагаемого раскола, расстояние между шпурами для условий рассматриваемой выработки составляет 0,3-0,4м. Возможный диаметр шпуров - от 20 до 50 мм, рекомендуемый 43мм. Пробуренные шпуры очищаются от пыли и буровой мелочи продувкой.

После этого в пробуренные шпуры заливают приготовленный раствор невзрывчатого разрушающего материала на глубину равную 0,9 длины шпура. Затем устьевая часть шпура герметизируется глиняной забойкой. Кроме того в качестве герметизатора устьевой части шпура устанавливаются деревянные клинья (рис. 1). В этом случае после установки клиньев, сверху на разрушаемый объект укладывается настил из досок или отрезок конвейерной ленты, для предотвращения вылета клина из шпура при некачественной его установке. Также в качестве средства распора может быть применена деревянная стойка устанавливаемая сверху на клин.

В результате протекания реакции гидратации раствор НРВ увеличивается в объеме и оказывает давление на стенки шпура, что приводит к разрушению пород по плоскости раскола созданной рядами шпуров с НРВ.

Откалывание пород почвы от уступа подрывки, при применении ускорителей гидратации, разработанных коллективом ИГГ ДонНТУ [5] происходит в течение 4-6 часов. После откола пород плоскости его раскола смачиваются водой для предотвращения образования пылевого облака, поскольку материал является пылящим. Средства герметизации извлекаются для повторного использования.

Согласно ТУ [1] на НРВ материал приготавливают непосредственно в месте ведения работ по разрушению негабарита.

НРВ представляет собой порошкообразный материал на основе оксида кальция и обладает щелочными свойствами. Материал является пылящим, не горючим, не взрывоопасным, цвета от белого до серо-желтого с различными оттенками. Давление расширения составляет 80-120 МПа.

Рабочая смесь приготавливается путем добавления в воду сухого порошка НРВ при постоянном перемешивании с добавлением пластификатора СП-6. Массовые доли компонентов В:НРВ:СП-6 составляют 0,25:0,73:0,02. Расход материала на 1 м.п. шпура диаметром 43мм составляет около 2,2 кг. Приготовленную порцию раствора следует залить в шпуры в течение 20 мин после затворения порошка водой. В качестве ускорителя реакции гидратации при необходимости сокращения времени разрушения пород в приготавливаемый раствор может добавляться Na_2CO_3 . безводный карбонат натрия (кальцинированная сода) в соотношении 0,01-0,02 мас. дол., при этом для стабилизации свойств и повышения пороговой температуры парообразования следует также добавить в раствор хлорид натрия 0,1-0,2 мас. дол. воды В этом случае шпуры с залитым раствором НРВ должны быть герметизированы в течение 10 мин после приготовления состава.

Пример приготовления материала из 6 кг порошка:

В емкость 10-12 л влить 2,0 л воды, в которую добавить пластификатор СП-6 в количестве 100-240 мл, после чего полученную смесь перемешать. В готовый раствор при постоянном перемешивании малыми порциями засыпать 6 кг порошка НРВ. После чего для ускорения реакции гидратации добавить 40гр Na_2CO_3 , и 200 грамм NaCl .

При необходимости приготовления других количеств смеси, количество компонентов изменяется в соответствующей пропорции.

1.4. Характеристика условий и места испытания

Приемочные испытания осуществлялись в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8. Экспериментальный участок был расположен на пикете ПК42.

Породы почвы на экспериментальном участке представлены в основном песчаниками мелкозернистыми с прочностью на одноосное сжатие 60-85МПа. Температура пород составляет 31,4 0С.

2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТНЫХ БЛОКОВ, ПРИ ПОМОЩИ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

2.1 Расчет расстояния между шпурами производим по формуле, определяющей длину трещин (расстояния между шпурами), которая получена с использованием энергетического критерия Гриффитса и обусловлена медленно возрастающей нагрузкой растягивающих напряжений внутри шпура под действием НРВ. Протяженность трещины зависит от диаметра шпура, модуля упругости НРВ и параметров горной породы E_m , k_{lc} , $P(t^*)$:

$$L_{mp} = \frac{P^2(t^*)r_0^2 E_m}{2(k_{lc})^2 E_{НРВ}} \quad (2.1)$$

где: 2 – численный коэффициент преобразований энергетического критерия Гриффитса;

- $P(t^*)$ - напряжение устойчивого развития трещин, развиваемое НРВ внутри шпура, МПа;

- r_0^2 - радиус шпура, м.

- E_m - модуль упругости разрушаемого материала, МПа;

- $E_{НРВ}$ - модуль упругости НРВ, МПа;

- k_{lc} - коэффициент интенсивности напряжений разрушаемого материала, МПа, ($\sqrt{м}$).

Расчет расстояния между шпурами производят в следующей последовательности:

- $P(t^*)$ берется равной давлению расширения через заданное время t^* разрушения объекта (рис. 4).
- $E_{НРС}$ берется равным 10^4 МПа.

Выражение (2.1) позволяет рассчитывать расстояние между шпурами (паспорт буровых работ) для отделения породы от массива.

Разработаны методика и стенд для получения рабочих характеристик НРВ - $P(t)$. Стенд представляет собой жесткий «недеформируемый» цилиндр, в который заливают приготовленную рабочую смесь, расширение которой при затвердевании выдвигает поршень, движение которого регистрируется индикатором часового типа и динамометром. По упругой деформации и тарировочной кривой динамометра определяют усилие, развиваемое затвердевающей смесью. Стенд разработан в ДонНТУ [3, 4].

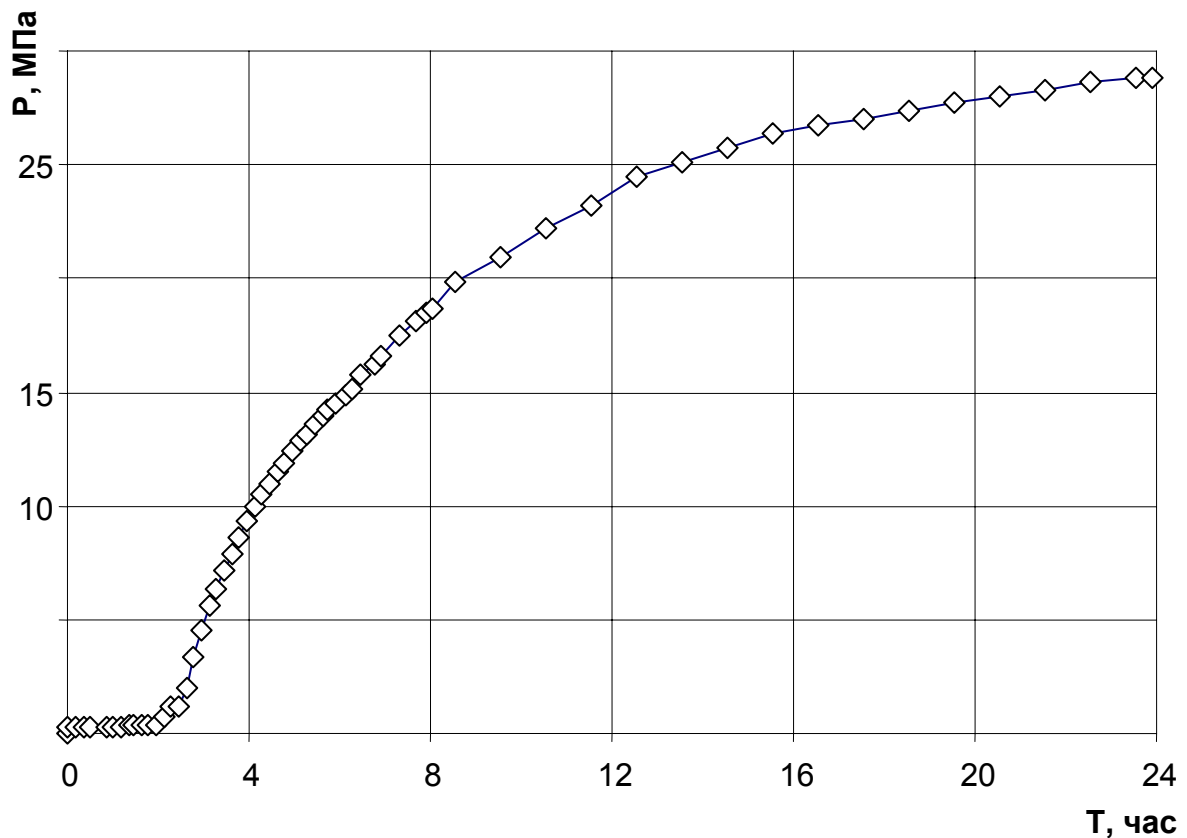


Рис. 1. График роста давления (P) саморасширения НРВ-80 во времени (T) при отсутствии предварительного нагружения

2.2 Выбор схемы расположения шпуров

Схема расположения шпуров определяется максимально возможным размером кусков разрушенного объекта. Расстояние a между шпурами в ряду образуемой плоскости разрушения определяется расчетной формулой (2.1), а

расстояние между рядами шпуров b выбирается в зависимости от величины необходимого размера разрушенного блока.

2.3 Пример расчета параметров

Пользуясь формулой (2.1) и рисунком 1 рассчитаем расстояние между шпурами для следующих условий – негабаритный блок представлен мелкозернистым песчаником с пределом прочности на одноосное растяжение 8,5 МПа, диаметр шпура для заряжения НРВ - 42мм, температура объекта – 31 °С, время разрушения 4 часа.

$$L_{mp} = \frac{P^2 (t^*) r_0^2 E_M}{2(K_{lc})^2 E_{НРС}}$$

$$L_{mp} = \left[(10^2) \cdot \frac{0.021^2 \cdot 1.8 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 1^2 \cdot 10^9} \right] = 0.397$$

Таким образом, рекомендуемое расстояние между шпурами в ряду составляет 40 см.

3. ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТНЫХ БЛОКОВ, ПРИ ПОМОЩИ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

3.1. Ход испытаний

Работы по разрушению пород почвы на экспериментальном участке проводились в декабре 2010 г. по технологии изложенной в пункте 1.2.

3.2. Результаты проведения испытаний

Внедрение результатов работы проводилось на участке подрывки на пикете 42. Согласно рассчитанным параметрам в были пробурены шпуры диаметром 36мм, средней длиной 50см, с расстоянием между ними 35см, и расстоянием до свободной боковой поверхности 30см. В пробуренные шпуры заливали приготовленный согласно п. 1.2. состав НРВ-80 с ускоряющими добавками. После заливки шпуры герметизировались клиньями.

Через 4 часа после заливки шпуров начало происходить разрушение по участку подрывки, за счет прорастания магистральной трещины от шпура с НРВ к боковой границе блока. В результате через 6 часов после заливки состава в шпуры произошел откол породы на участке подрывки.

В процессе приемочных испытаний выявлены эксплуатационные и конструктивные недостатки, отмеченные в разделе 4.

3.3. Рекомендации

Приемочные испытания способа невзрывного разрушения прочных пород почвы в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8 считать законченными.

Разработанный коллективом ИГГ ДонНТУ способ невзрывного разрушения прочных пород почвы рекомендовать для внедрения в условиях монолитных пород с прочностью на одноосное сжатие выше 60МПа.

Представителям ИГГ ДонНТУ провести доработку способа невзрывного разрушения прочных пород почвы, и корректировку документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 4 настоящего протокола.

4 ВЫЯВЛЕННЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НЕДОСТАТКИ

Недостатками являются: длительное время разрушения пород, несовершенство технологии приготовления, и заливки НРВ в шпуры, несовершенство технологии герметизации шпура.

Необходимо усовершенствовать технологию инициации материала в шпуре и сократить время разрушения до 1-2 часов, механизировать процесс приготовления и размещения готового состава в шпуры, а также разработать конструкцию замка для герметизации устьев шпуров.

5 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании результатов приемочных испытаний разработанного способа разрушения пород почвы, при помощи невзрывчатых разрушающих веществ, комиссия пришла к следующим выводам:

1. Разрушение прочных пород почвы обеспечивается при параметрах способа рассчитанных согласно методике ИГГ ДонНТУ.

2. Разрушение происходит в течение 4-6 часов после заливки раствора НРВ в шпуры.

3. Приемочные испытания способа невзрывного разрушения прочных пород почвы в 4 южном конвейерном штреке центральной панели бл. 8, разработанного в ДонНТУ считать законченными.

4. Способ разрушения прочных пород почвы, при помощи невзрывчатых разрушающих веществ, рекомендовать для внедрения в условиях монолитных пород с прочностью на одноосное сжатие выше 60МПа.

5. Представителям ИГГ ДонНТУ провести доработку технологии и корректировку документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 4 настоящего протокола.

6 ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК


1. ТУ У В.2.7-26.5-24478901-004:2007 Невибухова руйнуюча речовина. Технічні умови. – на заміну ТУ У БВ 2.7.00030937.089397. Без обмеження терміну дії. – Харьков: Госстандарт. Харьковский центр стандартизации и аэрологии, 2007-14с.
2. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1969. – 734 с.
3. Сахно И.Г. Лабораторные исследования свойств и разработка методов управления компрессионно-прочностными характеристиками саморасширяющихся составов/ Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. - №1. – С. 32-38.
4. Касьян Н.Н., Овчаренко Н.А., Петренко Ю.А., Сахно И.Г., Самусь О.Л. Лабораторные исследования работы невзрывчатых разрушающих веществ при упрочнении массивов разрушенных горных пород. / Науковий вісник національного гірничого університету. – 2008. – №8. – С.50-52.
5. Касьян Н.Н., Сахно И.Г., Шуляк Я.О. Обоснование методов управления скоростью роста распорно-компрессионных характеристик невзрывчатых разрушающих веществ / Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. - №2. – С. 218-228.

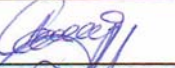
Председатель комиссии:


Янжула А.С.

Члены комиссии


Бондаренко В.Ф.


Касьян Н.Н.


Сахно И.Г.


Негрей С.Г.

УТВЕРЖДАЮ:



АКТ

приемочных испытаний, разработанного ДонНТУ способа перекрепления выработок с применением НРВ-80 в грузовом ходке уклона пл. m_4^0 гор. 450м

г. Доброполье

9 сентября 2009г.

Комиссия в составе:

председателя - заместитель главного инженера шахты «Добропольская» Гладкий С.Ю. и членов комиссии: главный маркшейдер – Сидоренко А.В., главный технолог - Каминского А.А., начальник участка РГВ – Ляш В.И., заведующего кафедрой РМПИ ДонНТУ, д.т.н., профессора Касьяна Н.Н., доцента кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н. Сахно И.Г.; аспиранта кафедры РМПИ ДонНТУ Овчаренко Н.А.

На основании протокола испытаний способа перекрепления выработок с применением НРВ-80 в грузовом ходке уклона пл. m_4^0 гор. 450м рассчитанного по рекомендациям ДонНТУ комиссия считает данный способ перекрепления прошедшим приемочные испытания и рекомендует:

- провести доработку технологии перекрепления выработок и корректировку конструкторской документации в соответствии с протоколом приемочных испытаний.

Протокол приемочных испытаний от 9 сентября 2009г.

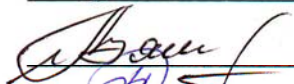
Председатель комиссии:

 Гладкий С.Ю.


Члены комиссии

 Сидоренко А.В.

 Каминский А.А.

 Ляш В.И.

 Касьян Н.Н.

 Сахно И.Г.

 Овчаренко Н.А.

ПРОТОКОЛ

приемочных испытаний, разработанного ДонНТУ способа
перекрепления выработок с применением НРВ-80 в грузовом
ходке уклона пл. m_4^0

г. Доброполье

09 сентября 2009г.

Комиссия в составе:
 председателя – заместитель главного инженера шахты
 «Добропольская» Гладкий С.Ю.
 и членов комиссии:
 главный маркшейдер шахты «Добропольская» – Сидоренко А.В.
 главный технолог шахты «Добропольская» – Каминский А.А.
 начальник участка РГВ шахты «Добропольская» – Ляш В.И.,
 заведующий кафедры РМПИ ДонНТУ, д.т.н., профессор Касьян Н.Н.
 доцент кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н., доцент Сахно И.Г.
 аспирант кафедры РМПИ ДонНТУ Овчаренко Н.А.

в соответствии с программой работ провела приемочные испытания способа перекрепления выработок с применением НРВ-80 в грузовом ходке уклона пл. m_4^0 на шахте «Добропольская» за период с июня 2009 г. по июль 2009г. на участке длиной 16м (ПК 9-10).

Технология и конструкторская документация разработаны коллективом Донецкого национального технического университета в составе: заведующего кафедрой РМПИ ДонНТУ, д.т.н., профессора Касьяна Н.Н., доцента кафедры РМПИ ДонНТУ, к.т.н. Сахно И.Г., аспиранта кафедры РМПИ ДонНТУ Овчаренко Н.А. Комиссия отмечает следующее:

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И НАМЕЧЕННАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ И МЕСТА ИСПЫТАНИЙ

1.2. Назначение и проектная область применения

Способ перекрепления горных выработок с применением НРВ-80, разработанный в ДонНТУ, рекомендуется применять в выработках с неустойчивыми породами кровли.

1.2. Описание технологии перекрепления выработки с применением НРВ-80

Грузовой ходок уклона пл. m_4^0 проведен под углом 10 град. площадью поперечного сечения 13,8 м² в свету до подрывки, шаг крепления 0,5 м. Максимальная глубина заложения выработки – 650 м. В выработке расположен один рельсовый путь на колею 900 мм. Ширина выработки до перекрепления 3000 мм, после перекрепления – 4750 мм, высота 2400 мм, 3440 мм – соответственно. Максимально допустимое обнажение породного забоя 1 метр. Работы по ремонту ведутся в направлении сверху-вниз. Подрывка пород почвы и перестилка рельсового пути не требуется. Работы выполняются бригадой горнорабочих участка РГВ.

Для установки НРВ в выработке вертикально вверх бурятся два шпура с расстоянием в поперечном сечении между ними 2 м, и с шагом 1 метр вдоль выработки. Глубина шпуров – 2,2 метра.

Согласно техпаспорта материала непосредственно в месте ведения работ по перекреплению приготавливается раствор НРВ-80.

НРВ-80 представляет собой порошкообразный материал на основе оксида кальция и обладает щелочными свойствами. Материал является пылящим, не горючим, не взрывоопасным, цвета от белого до серо-желтого с различными оттенками. Давление расширения составляет 80-120 МПа.

Приготовление рабочей смеси.

Пример приготовления из 6 кг порошка:

в ведро емкостью 10-12 л влить 1,9 – 2,0 л воды, в которую добавить тщательно перемешанный пластификатор СП-6 в количестве 100-240 мл, после чего полученную смесь перемешать. В готовый раствор при постоянном перемешивании малыми порциями засыпать 6 кг порошка НРВ – 80. Температура воды для затворения НРВ-80 должна составлять от 10°С до 20°С.

При необходимости приготовления другого состава смеси количество компонентов изменяется в соответствующей пропорции.

При помощи шприца приготовленный раствор нагнетается в ампулы гидрозабойки. В каждый шпур помещается необходимое по расчету количество ампул с фиксацией их глиняной забойкой.

Сущность предлагаемой технологии заключается в том, что с помощью невзрывчатого разрушающего вещества НРВ-80 в зоне возможного обрушения пород за пределами проектного контура ремонтируемой

выработки создается распор, который обеспечивает самоподдержание породных фрагментов за счет увеличения силы трения между ними (рис. 1). Таким образом, при выпуске породы при перекреплении выработки не происходит ее неконтролируемое обрушение, нет необходимости закладки образовавшихся пустот, что снижает трудоемкость работ по ремонту и сохраняет устойчивость вышележащих пород кровли.

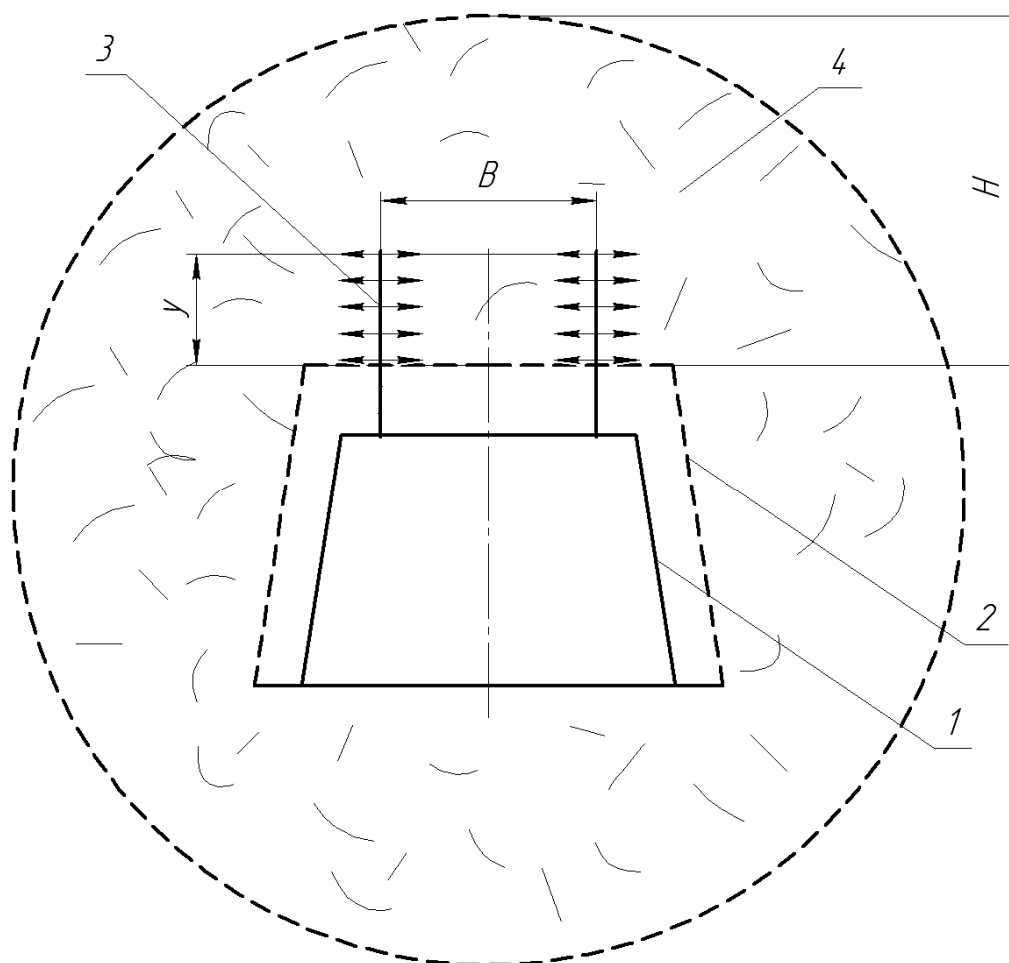


Рис. 1. Схема реализации предлагаемого способа перекрепления выработки: 1 – фактический контур выработки; 2 – проектный контур выработки; 3 – шпуровые элементы с распорными элементами; 4 – возможная область обрушения пород

1.4 . Характеристика условий и места испытания

Приемочные испытания осуществлялись в грузовом ходе уклона пл. m_4^0 ОП «Шахта «Добропольская» ГП «Добропольеуголь».

Угольный пласт m_4^0 сложного строения состоит из двух угольных

пачек разделенных прослоем алевролита 0,02м. Мощность пласта 1,15-1,20м. Уголь пласта черный, крепкий, полосчатый, трещиноватый.

Пласт не склонен к самовозгоранию не опасен по газодинамическим явлениям, не опасен по горным ударам, опасен по пыли.

Непосредственной кровлей пласта является аргиллит темно-серый, комковатый, с разноориентированными плоскостями скольжения, слабый, перемятый, разбит многочисленными трещинами, не имеющий сцеплений по наслоению, средней крепости 2,2-2,8, мощность слоя 0,8-1,4м.

Выше залегает аргиллит с мощностью 2,0-2,4м, серый, горизонтально-слоистый, с включениями обломков известняка и прослойками углей мощностью 0,07-0,15м, средней крепости $f=3$.

Основная кровля пласта представлена алевролитом мощностью 2,0-2,5м серым, горизонтально-слоистым с прослоями сидерита, средней крепости $f=3,5-3,8$.

Непосредственная почва пласта представлена алевролитом мощностью 0,8-1,2м, серым, трещиноватым, крупнозернистым, склонным к интенсивному пучению и размоканию $f=3$. Ниже залегает песчаник светло-серый, кварцевый, крепкий, слаботрещиноватый, водоносный, газоносный, $f=4-5$.

Залегание пород спокойное, моноклиналиное, слабоволнистое, угол падения колеблется в пределах 10° .

2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКРЕПЛЕНИЯ ГРУЗОВОГО ХОДКА УКЛОНА m_4^0 НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ УЧАСТКЕ (ПК 9-10)

2.1. Определение размеров зоны разрушенных пород (ЗРП) в кровле выработки (в наиболее сложном случае максимальная высота возможного вывала равна размеру ЗРП) [1]

$$\frac{r_{зрп}}{r_b} = 1 + 5,7 \left(\frac{\gamma H}{R} - 0,21 \right).$$

$$r_{зрп} = \left(1 + 5,7 \left(\frac{\gamma H}{R} - 0,21 \right) \right) \cdot r_b = \left(1 + 5,7 \left(\frac{0,025 \cdot 650}{34} - 0,21 \right) \right) \cdot 2,3 = 5,3 \text{ м.}$$

Таким образом, высота возможного вывала в кровле

$$H_b = r_{зрп} - r_b = 5,3 - 2,1 = 3,2 \text{ м.}$$

2.2 Определение фактических смещений кровли на момент перекрепления (высота подрывки кровли)

$$\Delta H_{\text{рем}} = H_{\text{проект}} - H_{\text{перекр}}, \text{ м}$$

$$\Delta H_{\text{рем}} = 3,440 - 2,400 = 1,040, \text{ м}$$

где $H_{\text{проект}}$, $H_{\text{перекр}}$ – высота выработки при проведении (по проекту) и фактическая на момент начала работ по перекреплению.

2.3. Определение длины шпуров

Расчетный размер ЗРП в кровле выработки 3,2 м. Длина шпура определяется по формуле:

$$\ell_{\text{ш}} = \Delta H_{\text{рем}} + y, \text{ м}$$

где y – длина участка за проектным сечением в кровле, на котором производится распор, м.

Принимая y равным 1,2 м, длина шпура будет равна:

$$\ell_{\text{ш}} = 1,04 + 1,2 = 2,24 \text{ м}$$

Для фиксации ампул в шпуре используется глиняная забойка. Располагаем в шпуре четыре ампулы с НРВ по 30 см каждая, и забойку – $l_{\text{заб}} = 36$ см.

2.4. Определение плотности установки (схемы расположения) шпуров

Для определения плотности шпуров используем результаты математического моделирования методом конечных элементов, проведенного с помощью программного комплекса ANSYS-LS-DYNA [2].

Согласно проведенным исследованиям необходимый распор по вертикальным площадкам составит

$$q = \frac{100G}{k} \left(0,0155k_{\text{тр}}^{-0,7} + 0,0008 \ln(n_{\text{бл}}) \right)$$

где G – вес пород в пределах возможного вывала, Н;

$$G = B \cdot H_{\text{в}} \cdot \gamma$$

где B – расстояние между шпурами в сечении выработки, м;

γ – объемный вес породы, Н/м³;

$$G = 2,0 \cdot 3,2 \cdot 0,025 = 0,16 \text{ МН.}$$

k – отношение высоты участка, на котором прилагается нагрузка, к высоте возможного вывала.

$$k = \frac{y}{H_B} = \frac{1,2}{3,2} = 0,38,$$

$n_{\text{бл}}$ – количество породных элементов на участке между шпурами B , шт.

$$q = \frac{100 \cdot 2 \cdot 3,2 \cdot 0,025}{0,38} (0,0155 \cdot 0,7^{-0,7} + 0,0008 \ln 6) = 0,88 \text{ МПа}$$

При расчетной величине равномерно распределенной нагрузки q на границе сжимаемых породных блоков по графику (рис. 2) определяем необходимую величину давления в шпуровом заряде.

Необходимое давление внутри шпурового заряда (18 МПа) обеспечивается заменой по весу 20% оксида кальция на кварцевый песок при условии, что объемная деформация породного шпура под действием НРВ составляет 10% (рис. 3).

Разработанный паспорт перекрепления грузового ходка уклона пласта m_4^0 приведен на рис. 4.

3. ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СПОСОБА ПЕРЕКРЕПЛЕНИЯ ВЫРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НРВ-80

3.1. Ход испытаний

Работы по перекреплению выработки на экспериментальном участке были начаты в июне 2009 г. и проводилось по технологии изложенной в пункте 1.2.

На контрольном и экспериментальном участках были подготовлены контурные замерные станции. Данные работы проводились сотрудниками Донецкого национального технического университета.

3.2. Результаты измерений

Измерения производились по контурным замерным станциям согласно методике ВНИМИ с помощью рулетки. Также производилась

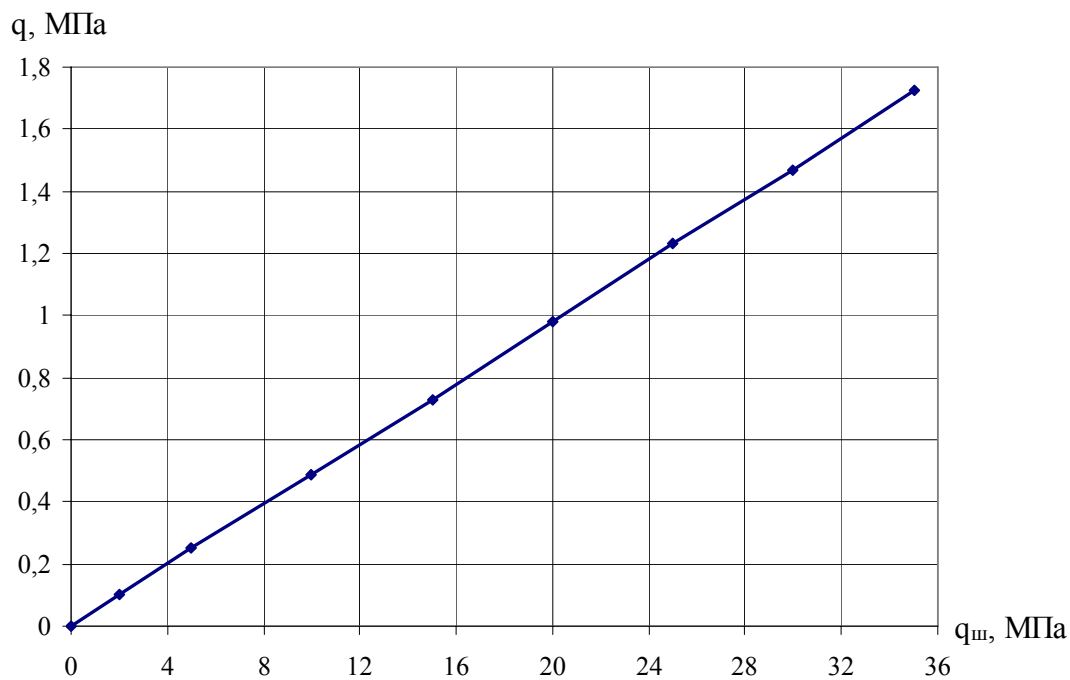


Рис. 2 – График зависимости величины равномерно распределенной нагрузки (q) на границе сжимаемых породных блоков от величины давления в шпуровом заряде ($q_{ш}$)

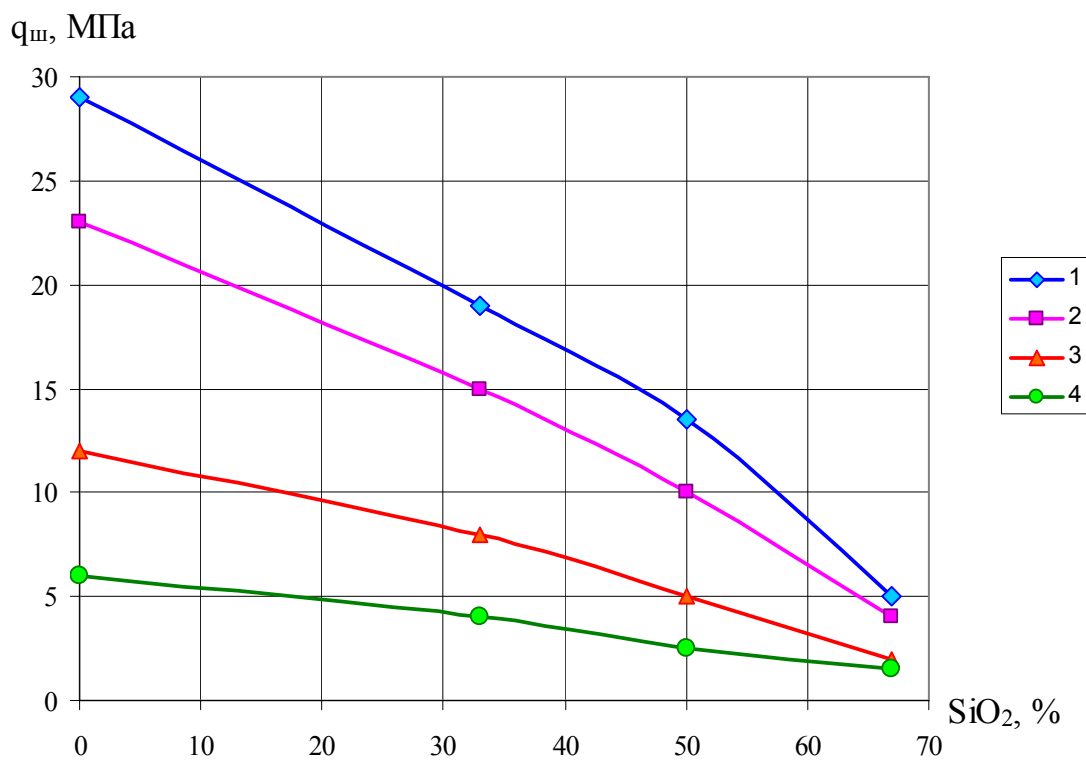


Рис. 3 – Зависимость давления, развиваемого НРВ в зависимости от процентного состава SiO_2 при ограничении возможности объемной деформации до 5; 10; 20 и 30% (соответственно кривые 1, 2, 3 и 4).

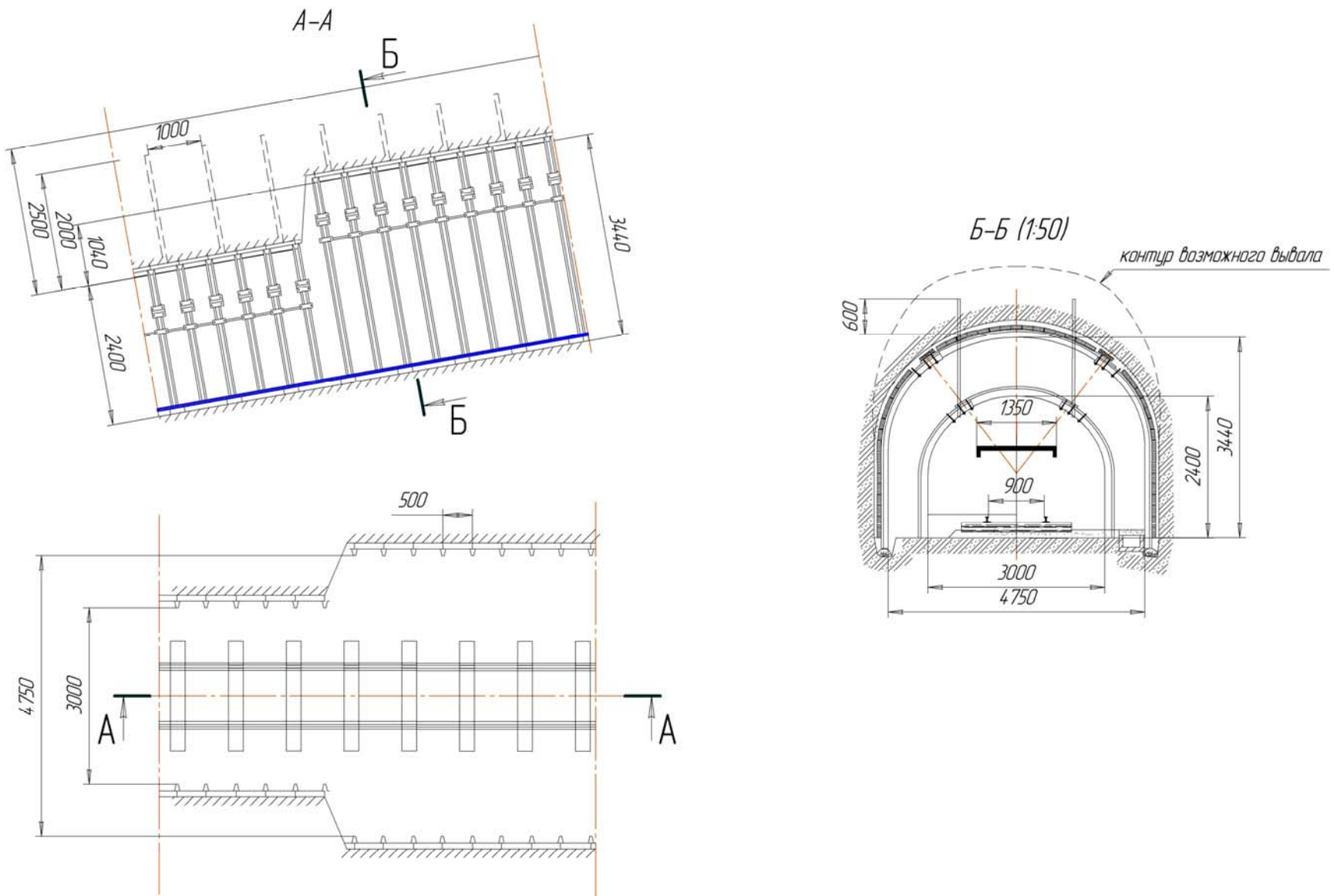


Рис. 4 – Паспорт перекрепления грузового ходка уклона пласта m_4^0

нивелировка по данным станциям с прокладкой нивелирного хода по пикетам начиная с нулевого пикета.

На контрольном участке за время наблюдения средняя скорость смещений составила 3,66 мм/сут. На экспериментальном участке средняя скорость смещений составила 1,53 мм/сут.

Таким образом, скорость смещений пород кровли при применении предлагаемого ДонНТУ способа перекрепления была в 2,4 раза меньше, чем на участке перекрепления с выпуском породы.

В процессе приемочных испытаний выявлены эксплуатационные и конструктивные недостатки, отмеченные в разделе 4.

3.3. Рекомендации

Приемочные испытания способа перекрепления выработок с применением НРВ-80 в грузовом ходке уклона пл. m_4^0 гор. 450м разработанного в ДонНТУ считать законченными.

Разработанный в ДонНТУ способ перекрепления выработок с применением НРВ-80 рекомендовать для внедрения в выработках со слабо и среднеустойчивыми кровлями.

ДонНТУ провести доработку технологии перекрепления и корректировку конструкторской документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 4 настоящего протокола.

4 ВЫЯВЛЕННЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НЕДОСТАТКИ

Недостатком является несовершенство технологии приготовления, упаковки и установки ампул с НРВ-80 в шпур. Необходимо механизировать процесс приготовления и упаковки готового состава, а также разработать конструкцию замка для фиксации ампул с НРВ-80 в шпурах.

5 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании результатов приемочных испытаний описанного способа перекрепления выработок с применением НРВ-80, комиссия пришла к следующим выводам:

1. На экспериментальном участке в процессе ведения работ по перекреплению выработки неконтролируемого выпуска пород не зафиксировано. При этом скорость смещений пород кровли на экспериментальном участке в 2,4 раза меньше, чем на контрольном.

2. Было обеспечено эксплуатационное состояние выработки в послеремонтный период на экспериментальном участке.

3. На ОП «Шахта «Добропольская» ГП «Добропольеуголь» продолжить применение разработанного в ДонНТУ способа перекрепления выработок с применением НРВ.

4. ДонНТУ продолжить оказание технической помощи шахте и наблюдения за реализацией п. 4.

5. Приемочные испытания способа перекрепления выработок с применением НРВ-80 в грузовом ходке уклона пл. m_4^0 гор. 450м разработанного в ДонНТУ считать законченными.

6. Способ перекрепления выработок с применением НРВ-80 рекомендовать для внедрения в выработках со слабо и среднеустойчивыми кровлями.

7. ДонНТУ провести доработку технологии и корректировку конструкторской документации, устранив при этом недостатки, изложенные в разделе 4 настоящего протокола.

6. ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1 Касьян Н.Н. Геомеханические основы управления зоной разрушенных пород вокруг выработок для обеспечения их устойчивости на больших глубинах: Дис...д-ра техн. наук: 05.15.02. – Донецк, 2002. – 358 с.

2. Касьян М.М., Овчаренко М.А., Сахно І.Г., Петренко Ю.А., Негрій С.Г. Обґрунтування параметрів нової технології перекріплення виробок за допомогою методу скінчених елементів / Вісті Донецького гірничого інституту. – 2008. - №2. – С. 104-109.

Председатель комиссии:

Гладкий С.Ю.

Члены комиссии

Сидоренко А.В.

Каминский А.А.

Ляш В.И.

Касьян Н.Н.

Сахно И.Г.

Овчаренко Н.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ К
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЙ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СОГЛАСОВАНО:

Письмом МакНИИ
№11/9441 от 08.11.11

УТВЕРЖДЕНО:

Директор Института горного дела
и геологии ГВУЗ «ДонНТУ»
_____ Ю.Ф. Булгаков

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ПРИМЕНЕНИЮ НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СОСТАВОВ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ ДОНБАССА

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

_____ Ю.А. Петренко – д.т.н., профессор ДонНТУ
_____ В.А. Канин – д.т.н., зав. отделом УкрНИМИ

РАЗРАБОТЧИКИ:

_____ Н.Н. Касьян – д.т.н., профессор ДонНТУ
_____ И.Г. Сахно – к.т.н., доцент ДонНТУ

РАССМОТРЕНО:

на заседании кафедры РМПИ ДонНТУ
протокол №10 от 14.06.11 г.

РАССМОТРЕНО

на заседании ученого совета Института
горного дела и геологии ДонНТУ
протокол №24 от 24.06.11 г.

УТВЕРЖДЕНО

ученым Советом ДонНТУ
протокол № 11 от 23.12.11 г.

Донецк, ДонНТУ – 2011

УДК 622.063.23 (071)

622.831 (071)

620.172(071)

Рекомендации по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно – Донецк: ДонНТУ, 2011, – 30с.

Приведены общие сведения о невзрывчатых разрушающих составах, определена область их возможного применения в условиях подземных горных выработок угольных шахт, предложены технологические решения применения невзрывчатых разрушающих составов для управления состоянием массива горных пород и приведены методики расчета их параметров.

Для инженерно-технических работников угольных предприятий, а также может быть полезна магистрам горных специальностей и аспирантам.

Авторы: Н.Н. Касьян – д.т.н., профессор ДонНТУ

И.Г. Сахно – к.т.н., доцент ДонНТУ

Рецензенты: Ю.А. Петренко – д.т.н., профессор ДонНТУ

В.А. Канин – д.т.н., зав. отделом УкрНИМИ

Ответственный за выпуск

Н.Н. Касьян – д.т.н., профессор

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Общие сведения о невзрывчатых разрушающих составах	5
2. Способы невзрывного разрушения негабаритных блоков горных пород.....	8
2.1. Разрушение негабаритных блоков горных пород в условиях протяженных горных выработок.....	8
2.2. Разрушение негабаритных блоков горных пород в условиях очистных забоев (лав).....	10
2.3. Расчет параметров буровых работ для разрушения негабаритов	12
2.4. Пример расчета параметров	13
3. Способы восстановления эксплуатационного состояния горных выработок	14
3.1. Способ подрывки пород почвы	15
3.2. Способ ремонта горных выработок.....	15
3.3. Пример расчета параметров способа ремонта горных выработок.....	20
4. Способ управления напряженно деформированным состоянием горных выработок	22
4.1. Описание способа.....	22
4.2. Пример расчета параметров способа	24
5. Способ упрочнения разрушенных горных пород	26
6 Техника безопасности при производстве работ	29
Список рекомендуемой литературы.....	30

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

МІНІСТЕРСТВО
ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ
ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ
МАКІЇВСЬКИЙ НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
з безпеки робіт у гірничій
промисловості
МакНДІ

86108, Україна, Макіївка Донецької обл.
вул. Лихачова, 60. Телефони: (062) 300-11-32;
(06232) 96-1-07. Факс (0623) 22-19-00,
e-mail: maknii@tr.dn.ua
<http://mupmaknii.se-ua.net>



МИНИСТЕРСТВО
ЭНЕРГЕТИКИ И УГОЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
по безопасности работ в горной
промышленности
МакНИИ

86108, Украина, Макеевка Донецкой обл.
ул. Лихачева, 60. Телефоны: (062) 300-11-32;
(06232) 96-1-07. Факс (0623) 22-19-00,
e-mail: maknii@tr.dn.ua
<http://mupmaknii.se-ua.net>

08. 11. 11. № 11/ 9441
на № _____ от _____

Директору інституту
гірничої справи та геології
Булгакову Ю.Ф.

вул. Артема, буд. 58, корп. 9
м. Донецьк,
83001

Повідомляємо Вас, що розглянуті „Рекомендації по примененію невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса” можливо використовувати в умовах вугільних шахт.

Заступник директора
з наукової роботи

В.П. Коптиков

ПЕРЕДМОВА

1 РОЗРОБЛЕНО:

Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпеки робіт у гірничій промисловості (МакНДІ), Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України (ІФТП НАНУ).

2 РОЗРОБНИКИ:

О.М. Брюханов, А.Д. Алексєєв, С.В. Алексєєв, Я.М. Бойко, Р.М. Богоудінов, О.К. Дунаєв, В.В. Дмитренко, В.П. Коптиков, Г.І. Колчин, О.С. Лукашов, Т.Я. Мхатварі, О.В. Никифоров, О.В. Піщєв, М.Ф. Рижков, І.Г. Сахно, Г.П. Стари́ков, Л.Г. Степанович, Е.І. Тимофєєв, А.О. Черніговцева, О.М. Цопа.

3 ЗАТВЕРДЖЕНО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ:

Наказ Міненергоугілля України від 14.11.2011 р. № 697.

4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ.

5 ТЕРМІН ПЕРЕВІРЯННЯ: 2015 р.

© Право власності на цей документ належить Міненергоугілля України. Відтворювати, тиражувати або розповсюджувати документ повністю або частково на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу Міненергоугілля заборонено. Відносно врегулювання прав власності звертатися до Міненергоугілля України.

СТАНДАРТ МІНЕНЕРГОУГІЛЛЯ УКРАЇНИ

ЗМІСТ

КОНТРОЛЬ ЗА ПРОБЕДЖЕННЯМ ЗАХОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ПІДРІЗНИМ ТИПУ АКУСТИЧНОГО СЕРІАЛЬНОГО ПІД ЧАС ПОВІДНЕННЯ СВЯТЛОМ ЛІДІЯ В СІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

1 Сфера застосування.....	1
2 Нормативні посилання.....	1
3 Терміни та визначення понять, скорочення.....	2
4 Загальні положення.....	3
5 Прогноз ГДЯ при проведенні розкривальної виробки.....	4
6 Оцінка ефективності заходів боротьби з ГДЯ.....	5
7 Контроль технологічних процесів.....	6
8 Вимоги до технічних засобів.....	7
9 Ведення технічної документації.....	7
10 Вимоги безпеки.....	8

Додаток А. Бібліографія..... 9

Цей стандарт розроблено та підготовлено за участю промислових підприємств, які беруть участь у здійсненні, проведенні, розвитку та вдосконаленні технологічних процесів у виробництві і застосуванні лінійних технологій розкривальної виробки.

Цей стандарт впроваднюється з 1 січня 2012 року. Термін впровадження лінійних технологій розкривальної виробки становить 1 рік.

2 НОРМАТИВНИЙ ПОСИЛАННЯ

У цьому стандарті зазначено наведені документи, які є обов'язковими для застосування при виконанні цього стандарту. Ці документи є обов'язковими для застосування при виконанні цього стандарту. Ці документи є обов'язковими для застосування при виконанні цього стандарту. Ці документи є обов'язковими для застосування при виконанні цього стандарту.

СОУ-П 10.1.00174088.03.1:2011. Протокол технічного комітету з питань стандартизації в енергетиці та теплоенергетиці, утвореного на виконання наказу Міненергоугілля України від 14.11.2011 р. № 697.

СТП (02070826) (33161769)

СТАНДАРТ ПІДПРИЄМСТВА

УЗГОДЖЕНО:

Заступник директора
з наукової роботи
ДП «ДонВУГІ»

 В.Б. Грядущий

Проректор з наукової роботи
ДВНЗ «ДонНТУ»

 Є.О. Башков

ЗАТВЕРДЖЕНО:

В.о. технічного директора,
перший заступник генерального
директора ДП «ДВЕК»

 В.Ф. Сарбаш

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ
ГІРСЬКИХ ПОРІД В ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ
ЗА ДОПОМОГОЮ НЕВИБУХОВИХ РУЙНУЮЧИХ
СУМІШЕЙ**

КЕРІВНИК РОЗРОБКИ:

Завідувач кафедру «Розробка родовищ
корисних копалин» ДВНЗ «ДонНТУ»

 М.М. Касьян

СТАНДАРТ ПІДПРИЄМСТВА**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ
ПОРІД В ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ ЗА ДОПОМОГОЮ
НЕВИБУХОВИХ РУЙНУЮЧИХ СУМІШЕЙ**

Передмова

1. РОЗРОБЛЕНО: Державний вищий навчальний заклад «Донецький Національний технічний університет»
РОЗРОБНИКИ: М.М. Касьян (керівник роботи), І.Г. Сахно, Ю.А. Петренко, О.О. Новіков, О.О. Ісаєнков
2. ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ від _____ № _____
3. УВЕДЕНЕ ВПЕРШЕ
4. ЗАРЕЄСТРОВАНО: Державне підприємство “Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації сертифікації і якості (ДП УкрНДНЦ) від _____ № _____

©

Право власності на цей документ належить Міністерству вугільної промисловості України. Відтворювати, тиражувати і розповсюджувати документ повністю або частково на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу Міністерства вугільної промисловості України заборонено.

Стосовно врегулювання прав власності звертатися до Міністерства вугільної промисловості України.

ВСТУП

СТП “Методика визначення параметрів руйнування гірських порід в підземних гірничих виробках за допомогою невибухових руйнуючих сумішей” є нормативним документом, який визначає параметри та область використання невибухових руйнуючих сумішей (НРС) для руйнування гірських порід у різноманітних гірничо-геологічних та гірничотехнічних умовах шахт ДП «ДВЕК».

«Методика ...» базується на нових принципах розрахунку, що враховують фізико-механічні властивості гірських порід, фізико-механічні властивості невибухових сумішей, особливості руйнування гірських порід НРС і стадійність розвитку тріщин.

Руйнування за допомогою НРС має значні переваги у порівнянні з механічним та буровибуховим способами при руйнуванні міцних порід у виробках з вихідним струменем повітря, небезпекою проявів газодинамічних явищ, високою концентрацією техніки, устаткування і обладнання. При дотриманні умов та вимог цього документу, який регламентує застосування НРС в умовах підземних гірничих виробок забезпечується:

- покращення умов та безпеки праці шахтарів;
- спрощення організації робіт по відновленню експлуатаційного стану гірничих виробок;
- нормальний експлуатаційний стан та безпечне функціонування гірничих виробок на протязі терміну їх експлуатації;
- зменшення витрат на відновлення експлуатаційного стану виробок.

Надійність та безпека у гірничих виробках при руйнуванні порід НРС забезпечується за рахунок комплексного підходу до всіх аспектів його застосування:

- вибором способів та засобів руйнування відповідно до гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов;
- використанням обладнання для буріння шпурів відповідно з вимогами існуючих нормативних документів;
- контролюванням усіх робіт, що пов'язані з бурінням шпурів, приготуванням НРС та її зарядженням, що дозволяє уникнути можливості технічних помилок та прихованих дефектів;
- моніторингом процесу.

Такий підхід до використання НРС дозволяє забезпечити у органів виконавчої влади, юридичних і фізичних осіб впевненість у тому, що руйнування гірських порід повністю відповідає вимогам нормативних актів та правил безпеки у вугільних шахтах.

ЗМІСТ

1 Сфера застосування	442
2 Нормативні посилання.....	442
3. Терміни та визначення понять.....	443
4. Загальні положення.....	443
5. Визначення параметрів руйнування за допомогою НРС.....	446
Бібліографія	449
Додаток А.....	450
Додаток Б	451
Додаток В.....	452
Додаток Г	453
Додаток Д.....	454

СТАНДАРТ ПІДПРИЄМСТВА

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД В ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕВИБУХОВИХ РУЙНУЮЧИХ СУМІШЕЙ

Чинний від _____

1 Сфера застосування

Цей стандарт встановлює методику визначення параметрів руйнування гірських порід в підземних гірничих виробках за допомогою невибухових руйнуючих сумішей.

Цей стандарт застосовують шахти ДП «ДВЕК» Мінвуглепрому України.

2 Нормативні посилання

У цьому стандарті є посилання на такі нормативні документи.

ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии

ГОСТ 21153.3-85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении

ГОСТ 21153.6-88 Породы горные. Методы определения параметров паспорта прочности

ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Методы определения показателей объемной прочности

ГОСТ 29167-91. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении

ДНАОП 1.1.30-1.01 Правила безпеки у вугільних шахтах

ДБН А.2.2-3-97 Склад, порядок розроблення, погодження та затвердження проектної документації для будівництва

Инструкция по составлению и оформлению чертежей обменной горно-геологической документации. Минуглепром СССР, 1967

ДСП 3.3.1. 095-2002 – Державні санітарні правила та норми підприємств вугільної промисловості.

СОУ 10.1-00185790-002-2005 Правила технічної експлуатації вугільних шахт

ТУ У В.2.7-26.5-24478901-004:2007 Невибухова руйнуюча речовина.

3. Терміни та визначення понять

У цьому стандарті використано такі терміни та визначення:

Невибухові руйнуючі суміші (НРС) – речовини, композиції та склади, хімічна реакція гідратації яких супроводжується виникненням механічних напруг у середовищі, що їх вміщує, без горіння і детонації внаслідок розширення продуктів гідратації.

Безпека робіт – відсутність ризику, пов'язаного з можливістю виникнення аварійних ситуацій та травм.

Вироби для реалізації невибухового руйнування

– ампули, патрони, пристрої герметизації, обладнання та оснащення для буріння шпурів.

Негабаритний блок – породний блок, розміри якого більше приймальної можливості засобів транспорту.

Ремонт гірничої виробки – комплекс заходів по забезпеченню експлуатаційного стану виробки.

4. Загальні положення

4.1. Система загальних вимог до застосування НРС в умовах підземних гірничих виробок.

4.1.1 НРС повинні виготовлятися, постачатися та використовуватися згідно із вимогами ТУ У В.2.7-26.5-24478901-004:2007 Невибухова руйнуюча речовина та ДСП 3.3.1. 095-2002.

4.1.2 Будівництво та експлуатація виробок, в яких використовують НРС, повинні виконуватися згідно із вимогами СОУ 10.1-00185790-002-2005.

4.1.3 НРС повинні використовуватись з урахуванням гірничо-геологічних умов залягання і фізико-механічних властивостей гірничих порід, які повинні встановлюватися згідно з вимогами ГОСТ 21153.2-84, ГОСТ 21153.3-85, ГОСТ 29167-91.

4.1.4 Використання НРС обмежується температурним режимом +5 - +27⁰С. При підвищенні температури більше +27⁰С слід використовувати охолодження шпурів заливкою води з послідуною продувкою стиснутим повітрям.

4.1.5 Документи про відповідність повинні оформлюватися згідно з ДБН А.2.2-3-97.

4.2 НРС можуть використовуватися:

а) для руйнування негабаритних блоків гірських порід у всіх гірничих виробках;

б) для проведення гірничих виробок за лавою;

в) для руйнування порід, що зміщені в порожнину виробки при проведенні її ремонту;

г) для руйнування порід підшви виробки при проведенні підривки.

4.3 Оцінка робочої характеристики НРС

4.3.1. Встановлення робочої характеристики НРС проводити на стенді (рис.1) в лабораторних умовах.

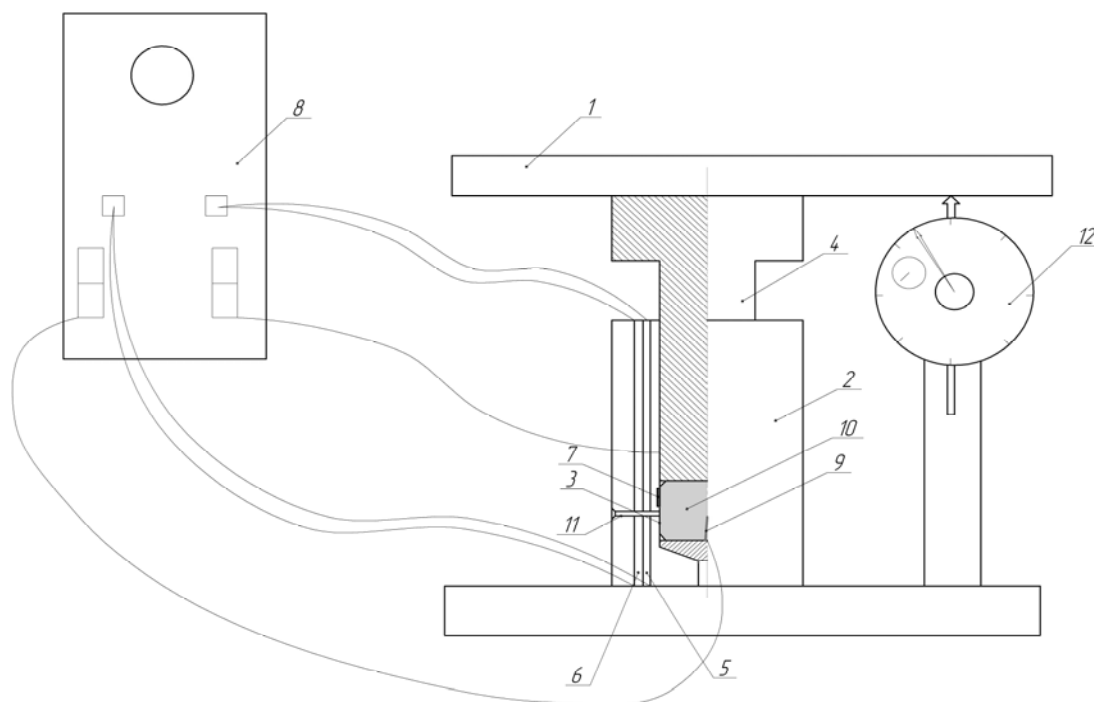


Рис. 1. Стенд для випробувань НРС

1 – джерело зовнішнього тиску; 2 – корпус; 3 – дослідна камера; 4 – поршень; 5, 6 – нагрівальні елементи; 7 – датчик температури; 8 – блок управління; 9 – датчик температури зразка НРС; 10 – зразок НРС; 11 – отвір; 12 – індикатор деформацій.

4.3.2 Порядок проведення дослідів НРС

- з кожної партії НРС відбирають пробу масою 200г і готують робочу суміш у співвідношенні В:Т=1/3, перемішують в чистому посуді на протязі 5 хвилин;

- приготовлену суміш поміщують в тонкостінну резинову оболонку, після чого встановлюють в дослідну камеру стенду;

- встановлюють поршень та розміщують корпус стенду між силовими елементами джерела зовнішнього тиску;

- знімають діаграми «час – тиск саморозширення», «час – деформація» та фіксують температуру під час експерименту;

- порівнюють отримані діаграми зі зразковими та встановлюють чи потрапляє НРС в «робочу зону», якщо ні, то НРС з досліджуваної партії не придатий для використання;

- «робоча зона» НРС визначається діапазоном не нижче 70% тиску саморозширення зразкового варіанта в заданий проміжок часу. Зразкова діаграма може бути побудована за залежністю $P^*(t_i) = 11,28 \ln(t_i) - 5,13$, яка отримана для умов: температура 23⁰С, об'ємні деформації 6,5% (в якості джерела зовнішнього тиску використано механічний прес ЗИМ-5Р);

- для надійності результатів описані дії повторюють 3 рази для кожної партії;

- середню з трьох отриманих характеристик приймають у якості еталонного зразка та використовують під час розрахунку параметрів руйнування.

4.4 Визначення тиску саморозширення НРС

- отримана в результаті стендових досліджень залежність тиску саморозширення $P^*(t_i, \Delta V^*, T^*)$ від часу t_i при об'ємних деформаціях ΔV^* і температурі T^* приймається в якості еталонної;

- проводиться корегування результатів стендових досліджень шляхом врахування впливу реальних гірничо-геологічних умов за рахунок введення коефіцієнтів впливу об'ємних деформацій $k(\Delta V)$, температури $k(T)$, попереднього стискання $k(P_0)$. Залежність для розрахунку має вигляд $P(t_i, \Delta V, T, P_0) = P^*(t_i, \Delta V^*, T^*) \cdot k(\Delta V) \cdot k(T) \cdot k(P_0)$;

- коефіцієнт впливу об'ємних деформацій розраховується як

$$k(\Delta V) = \frac{[-8,373 \ln(\Delta V) + 39,073]}{[-8,373 \ln(\Delta V^*) + 39,073]}$$

- коефіцієнт впливу температури визначається як

$$k(T) = \frac{[17,27 \ln(T) - 27,98]}{[17,27 \ln(T^*) - 27,98]}$$

- коефіцієнт впливу попереднього стискання розраховується як $k(P_0) = -0,0024P_0^2 + 0,0767P_0 + 1$

- наведені залежності можуть бути використані при діапазоні об'ємних деформацій 0,5-50%, температури – 11-36⁰С, попереднього стиску 0 –17,5МПа

- отримане значення тиску саморозширення використовується при визначенні параметрів руйнування гірських порід п. 5.

4.5 Підготовка робочої суміші, заряджання шпурів, контроль робіт

4.5.1 Суміш необхідно готувати безпосередньо на місці ведення робіт. На поверхні НРС слід розфасувати в пакети по бкг (з точністю до 1%), воду розлити в пляшки по 2л.

4.5.2 Сосуд для приготування НРС повинен мати обсяг 10-12л, стінки сосуду не повинні містити слідів нафтопродуктів, фарби та ін.

4.5.3 Робоча суміш готується шляхом додавання в воду НРС з постійним перемішуванням на протязі 10 хвилин та при необхідності додаванням пластифікатору за інструкцією НРС.

4.5.4 В залежності від орієнтації шпурів приготовлену суміш залити безпосередньо в шпури через лійку або в ампули за допомогою шприцу, після чого ампули встановити в шпури.

4.5.5 Герметизувати шпури.

4.5.6 При необхідності повторити п. 4.4.1-4.4.5.

4.5.6 Після припинення робіт вимити сосуд для приготування НРС.

4.5.7 Від моменту заряджання шпурів до моменту руйнування проводити моніторинг процесу.

4.6 Умови зберігання НРС і техніка безпеки при роботі з ним.

4.6.1 НРС необхідно зберігати в герметичному впакуванні в сухому приміщенні. Строк зберігання НРС із порушеною герметичністю впакування повинен становити не більше 2-3 діб при вологості повітря не більше 65%.

4.6.2 При проведенні робіт із НРС необхідно надягати захисні окуляри, респіратор, рукавиці, тому що приготовлений розчин має лужні властивості та є пилоподібним.

4.6.3 При влученні виготовленого розчину в очі необхідно негайно промити їх водою й звернутися до лікаря.

4.6.4 Категорично забороняється заглядати в шпури після заливання НРС, тому що при порушенні технології готування НРС можливий мимовільний викид суміші зі шпуру.

4.6.5 Сосуд у якому був приготовлений розчин НРС після закінчення робіт наповнюється водою для запобігання гідратації залишків розчину.

4.6.6 Після заливання НРС устя шпурів повинні герметизуватися.

4.7 Вимоги що до забезпечення надійності руйнування гірничих порід НРС.

Для забезпечення надійності та безпеки роботи потрібно дотримуватися наступних вимог:

1) робоча відстань між шпурами з НРС повинна бути не менш ніж 250мм та не більше 1000мм;

2) в горизонтальні та восходящі шпури НРС слід поміщати в ампулах або патронах;

3) при руйнуванні негабаритних блоків в донній частині шпуру повинна залишатися породна «пробка» не менше 10% від товщини блока;

4) довжина шпурів для розміщення НРС повинна бути не меншою 0,5м.

5) діаметр шпурів при руйнуванні за допомогою НРС повинен знаходитись в діапазоні 27-50мм, рекомендований 42мм.

6) шпури не повинні пересікати відкриті тектонічні тріщини, розломи, порожнини та мати скрізних виходів.

Породи, що руйнуються НРС, не повинні бути схильними до пластичного деформування. В них не повинно міститися вугільних прошарків і пластів. Рекомендована міцність порід на одноосьовий стиск не менше 50МПа.

Параметри руйнування гірських порід визначаються відповідно до гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов, згідно вимогам п. 5

5. Визначення параметрів руйнування за допомогою НРС

В основу методики розрахунку параметрів руйнування покладено двоетапний механізм розвитку тріщини, який характеризується першочерговим стрибкоподібним ростом початкової тріщини в результаті вивільнення накопиченої пружної потенційної енергії і переході її в поверхневу і подальшому розвитку тріщини за рахунок розширення НРС в шпурі.

Визначення параметрів руйнування здійснюють на підставі гірничо-геологічних та гірничо-технологічних умов з урахуванням вимог діючих нормативних документів.

5.1 Руйнування негабаритних блоків

Шпури бурять рядами в площині очікуваного розколу з боку найбільшої відкритої поверхні об'єкта. Переважний напрям шпурів вертикальний, при незначній товщині негабариту для підвищення корисної довжини шпуру припустимо буріння під кутом 65-80 градусів. Принципова схема руйнування негабаритів НРС приведена в додатку А.

Відстань між шпурами визначається за залежністю:

$$a \leq \frac{3P^2 \cdot \pi \cdot r_0^2 E_M}{8E_{НРС} \cdot K_I^2} (1 - 2\mu_{НРС}), \text{ м} \quad (1)$$

де P - тиск, що розвиває НРС у шпурі, визначається згідно п. 4.4, МПа;

r_0 - радіус шпура, м;

E_M - модуль пружності породи, МПа;

$E_{НРС}$ - модуль пружності НРС, може бути прийнятим 20000-30000 МПа;

K_I - коефіцієнт інтенсивності напруг, визначається згідно з ГОСТ 29167-91, МПа ($\sqrt{М}$);

$\mu_{НРС}$ - коефіцієнт Пуассона НРС, може бути прийнятим 0,235-0,255.

Відстань від шпура до свободної поверхні слід приймати рівною $\frac{a}{2}$, м.

У випадку використання патронів НРС для направленою руйнування відстань між шпурами визначається за формулою (1) у яку в якості множника введено коефіцієнт концентрації напруг

$$k_{\sigma_1} = 1,078 \left(\frac{c}{2r_0} \right)^{-0,424} \quad (2)$$

де c – зазор між силовими елементами оболонки патрона НРС, м.

Конструкція патрону НРС для направленою руйнування приведена в додатку А.

5.2 Проведення гірничих виробок слідом за лавою

Виймання вугілля відбувається в вибої лави традиційним способом. Шпури для НРС бурять рядами паралельно площині оголення, що утворилася при вийманні вугілля. Довжину шпурів приймають в діапазоні 0,5-3,0м, відповідно до необхідного просування вибою. У шпури поміщують НРС у ампулах.

Відстань між шпурами в ряду розраховують за залежністю (1). Відстань між рядами шпурів

$$a_0 \leq 2k_p \sqrt{P \frac{r_0^2}{C \cdot |\sigma_p|}}, \text{ м} \quad (3)$$

де k_p - коефіцієнт розукріплення вміщуючих порід, яке викликане розвантаженням масиву в результаті попереднього виймання корисної

копалини і враховує час, що минув між вийманням корисної копалини й заряджанням шпурів, визначається експериментально;

$|\sigma_p|$ - межа міцності вміщуючих порід на одноосьове розтягання, визначається згідно з ГОСТ 21153.3-85, МПа;

C - коефіцієнт структурного ослаблення вміщуючих порід, визначається експериментально.

Принципова схема проведення виробок слідом за лавою за допомогою НРС приведена в додатку Б.

5.3 Руйнування порід зміщених в виробки при проведенні їх ремонту

Шпури для НРС бурять по лініям еквідистантним проектному контуру виробки. Довжину шпурів приймають в діапазоні 0,5-1,6м, відповідно до відстані між рамами кріплення і необхідного просування вибою. У шпури поміщують НРС у ампулах.

Відстань між шпурами в ряду розраховують за формулою (1). Відстань між рядами шпурів, між шпуром і найближчою кліважною тріщиною, між першим рядом шпурів і площею оголення за формулою (3).

Принципова схема ремонту виробок з присічкою порід НРС приведена в додатку В

5.4 Руйнування порід підосви при проведенні підривки.

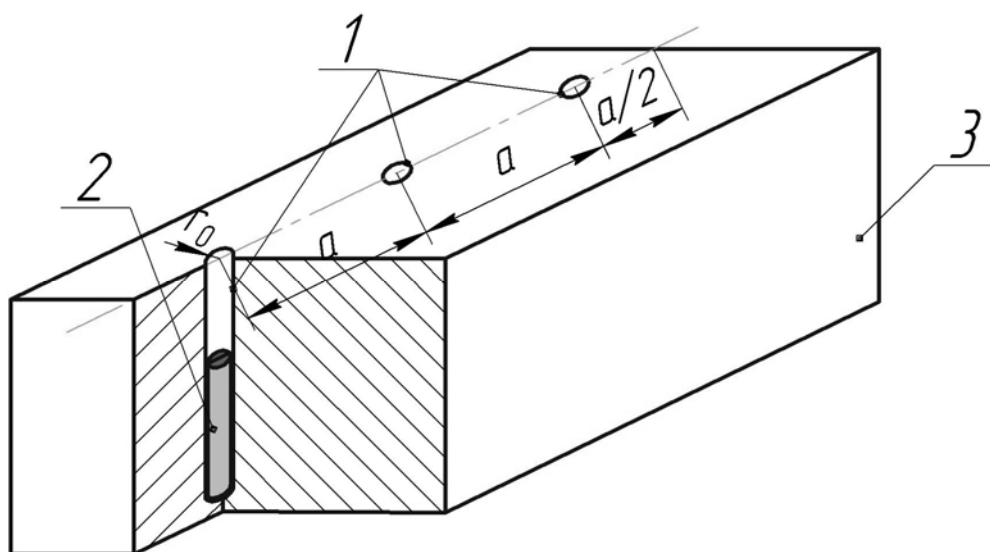
Шпури бурять переважно вертикальними, але допускається відхилення куту в межах 85-100 градусів до площини підосви, з формуванням уступу руйнування. При наявності тріщин в підосві, що поділяють її на блоки, відстань між шпурами в межах одного блока визначають за залежністю (1), а відстань між шпурами і межами блоку приймають $\frac{a}{2}$, м. Якщо тріщин в підосві немає, то відстань між шпурами визначається за залежністю (1), а відстань між рядами шпурів за залежністю (3).

Принципова схема руйнування порід підосви НРС при проведенні підривки приведена в додатку Г.

Бібліографія

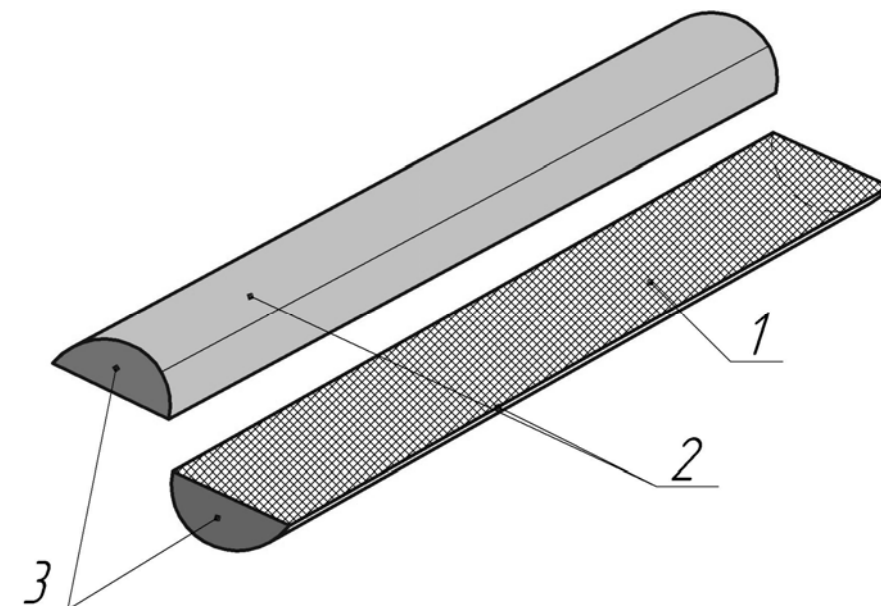
1. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии
2. ГОСТ 21153.3-85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении
3. ГОСТ 29167-91. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении
4. ДБН А.2.2-3-97 Склад, порядок розроблення, погодження та затвердження проектної документації для будівництва
5. ДНАОП 1.1.30-1.01 Правила безпеки у вугільних шахтах
6. СОУ 10.1-00185790-002-2005 Правила технічної експлуатації вугільних шахт
7. ДСП 3.3.1. 095-2002 – Державні санітарні правила та норми підприємств вугільної промисловості.
8. ТУ У В.2.7-26.5-24478901-004:2007 Невибухова руйнуюча речовина.
9. Рекомендации по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно – Донецк: ДонНТУ, 2011, – 30с.

РУЙНУВАННЯ НЕГАБАРИТНИХ БЛОКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НРС



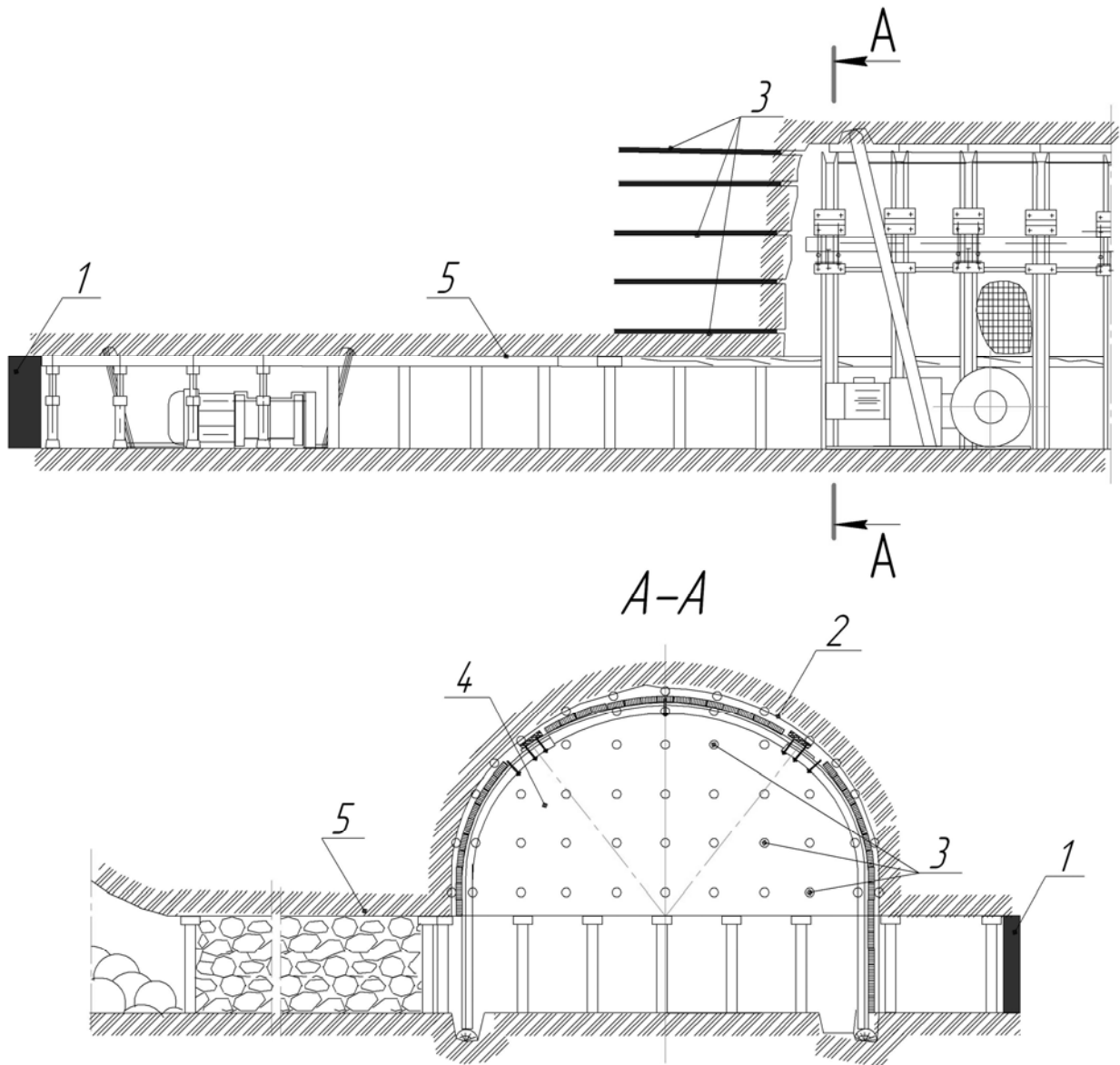
Руйнування негабаритного блоку за допомогою НРС

1 – шпури; 2 – НРС; 3 – негабаритний блок



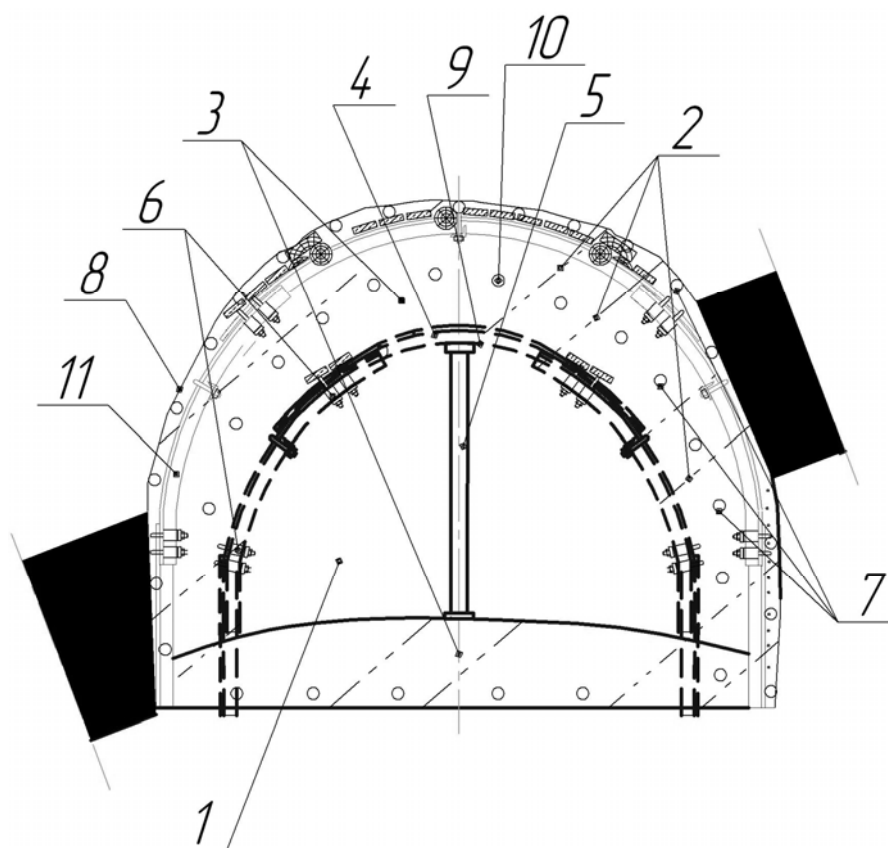
Конструкція патрона НРС для направленного руйнування гірських порід
1 – НРС; 2 – силові елементи оболонки патрона; 3 – глухий торець патрона.

ПРОВЕДЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК СЛІДОМ ЗА ЛАВОЮ



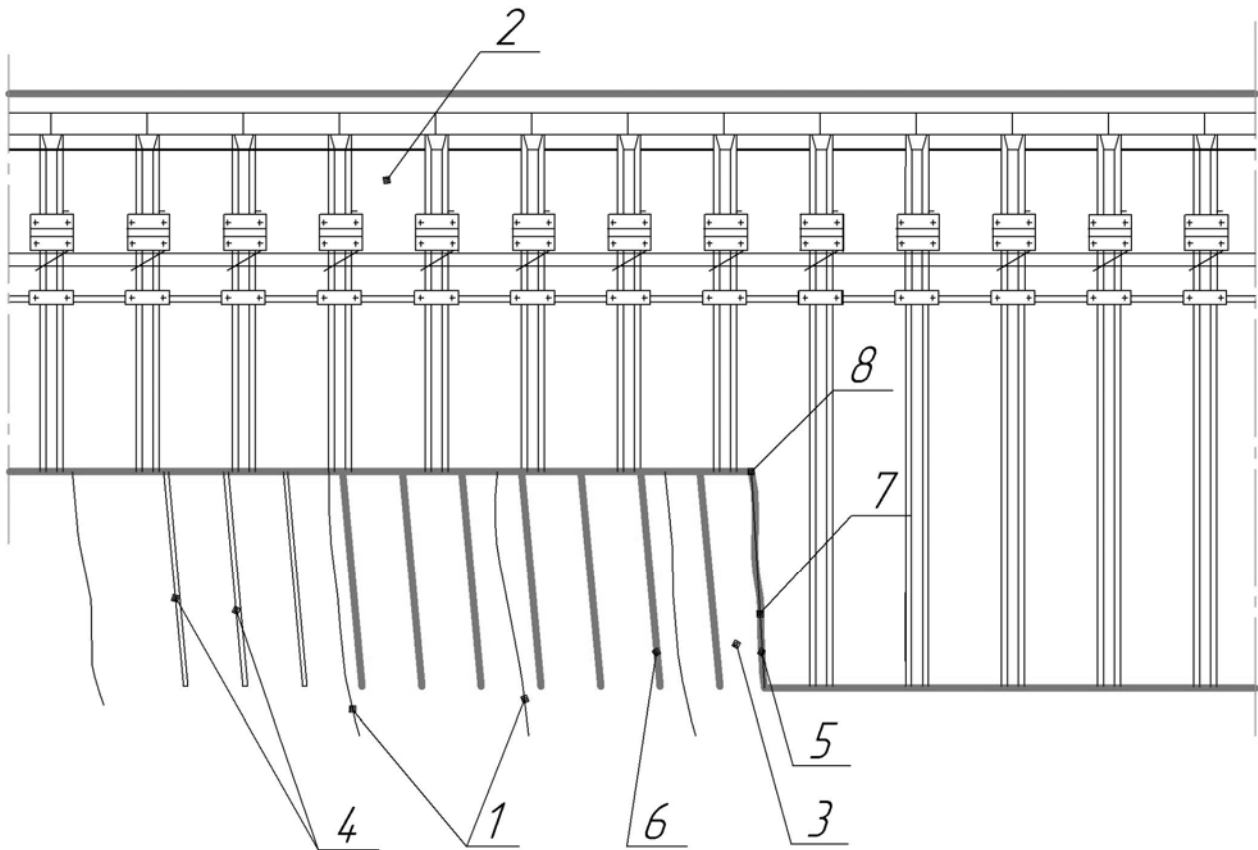
1 – вугільний пласт; 2 – підготовча виробка; 3 – шпури з НРС; 4 – вміщуючі породи; 5 – площа оголення.

РЕМОНТ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК З ПРИСІЧКОЮ ПОРІД НРС



1 – гірнича виробка, 2 – тріщини, 3 – деформовані породи, 4 – деформовані рами кріплення, 5 – кріплення посилення, 6 – замок деформованої рами кріплення, 7 – шпур, 8 – проектний контур виробки, 9 – контур зміщених в порожнину виробки порід, 10 – НРС, 11 – рама нового кріплення

ПІДРИВКА ПОРІД ПІДОШВИ



1 – тріщина в підосві, 2 – гірничя виробка, 3 – породи підосви, 4 - шпур, 5 - уступ руйнування підосви, 6 - НРС, 7 - откос уступа, 8 - бровка уступа.

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ЗА ДОПОМОГОЮ НРС

Приклад 1. Розрахунок параметрів руйнування негабаритного блоку.

Умови. Об'єкт руйнування – негабаритний блок пісковика розмірами 1500x750x600мм із межею міцності на одноосьовий стиск 85 МПа при температурі об'єкта 31⁰С. Модуль пружності пісковика 3 10⁴ МПа, коефіцієнт інтенсивності руйнуючих напруг 1, МПа (\sqrt{m}).

За результатами стендових досліджень зразка НРС з дослідної партії тиск саморозширення через 8 годин склав 22МПа при об'ємних деформаціях 5,5%, і температурі 23⁰С.

Шпури діаметром 42мм, герметизація шпурів клиновим пристроєм.

Рішення.

1. Перевіряють чи потрапляє НРС в робочу зону

$$P^*(8) = 11,28 \ln(8) - 5,13 = 18,32 \text{ МПа}$$

Оскільки тиск саморозширення вище зразкового НРС може бути використаний для руйнування порід.

2. Корегують результати стендових досліджень шляхом врахування впливу реальних гірничо-геологічних умов.

коефіцієнт впливу об'ємних деформацій:

$$k(\Delta V) = \frac{[-8,373 \ln(\Delta V) + 39,073]}{[-8,373 \ln(\Delta V^*) + 39,073]}$$

де $\Delta V^* = 5,5\%$; відносні власні пружні деформації пісковика дорівнюють 0,28% враховуючи можливі деформації НРС у бік устя шпура, при заклинюванні герметизуючого клина 0,01м та корисну довжину шпура 0,5м об'ємні деформації $\Delta V = 0,28 + \frac{0,01}{0,5} \cdot 100 = 2,28\%$

$$k(\Delta V) = \frac{[-8,373 \ln(2,28) + 39,073]}{[-8,373 \ln(5,5) + 39,073]} = 1,29$$

коефіцієнт впливу температури

$$k(T) = \frac{[17,27 \ln(T) - 27,98]}{[17,27 \ln(T^*) - 27,98]}$$

де $T^* = 23^0\text{С}$, $T = 31^0\text{С}$

$$k(T) = \frac{[17,27 \ln(31) - 27,98]}{[17,27 \ln(23) - 27,98]} = 1,19$$

$$P = P^*(t_i) \cdot k(\Delta V) \cdot k(T) = 22 \cdot 1,29 \cdot 1,19 = 33,77 \text{ МПа}$$

3. Визначають параметри руйнування

Оскільки товщина негабаритного блоку 600мм, довжина шпура складе 540мм (10% довжини шпура недобур). Корисна довжина шпура 500мм, 40мм – герметизуючий пристрій.

Відстань між шпурами

$$a \leq \frac{3P^2 \cdot \pi \cdot r_0^2 E_M}{8E_{HPC} \cdot K_I^2} (1 - 2\mu_{HPC}), \text{ м}$$

де P - тиск, що розвиває НРС у шпурі 33,77МПа;

r_0 - радіус шпура 0,021м;

E_M - модуль пружності породи 30000 МПа;

E_{HPC} - модуль пружності НРС, може бути прийнятим 25000 МПа;

K_I - коефіцієнт інтенсивності напруг, 1, МПа ($\sqrt{м}$);

μ_{HPC} - коефіцієнт Пуассона НРС, приймаємо 0,24.

$$a \leq \frac{3 \cdot 33,77^2 \cdot 3,14 \cdot 0,021^2 \cdot 30000}{8 \cdot 25000 \cdot 1^2} (1 - 2 \cdot 0,24) = 0,37 \text{ м}$$

Відстань від шпура до свободної поверхні $\frac{0,37}{2} = 0,185 \text{ м}$

Приклад 2. Розрахунок параметрів руйнування гірських порід при проведенні виробки за лавою за допомогою НРС.

Умови. Об'єкт руйнування – породи покрівлі пласта в перетині виробки арочної форми. Шаг кріплення 0,8м. Посування вибою лави за добу 2,4м. Інші умови аналогічно прикладу 1.

Рішення.

1. Перевірка НРС – див. приклад 1.

2. Корегують результати стендових досліджень шляхом врахування впливу реальних гірничо-геологічних умов.

коефіцієнт впливу об'ємних деформацій:

$$k(\Delta V) = \frac{[-8,373 \ln(\Delta V) + 39,073]}{[-8,373 \ln(\Delta V^*) + 39,073]}$$

де $\Delta V^* = 5,5\%$; відносні власні пружні деформації пісковика дорівнюють 0,28% враховуючи можливі деформації НРС у бік устя шпура, при заклинюванні герметизуючого клина 0,01м та корисну довжину шпура

2,4м, об'ємні деформації $\Delta V = 0,28 + \frac{0,01}{2,4} \cdot 100 = 0,69\%$

$$k(\Delta V) = \frac{[-8,373 \ln(0,69) + 39,073]}{[-8,373 \ln(5,5) + 39,073]} = 1,70$$

коефіцієнт впливу температури – див. приклад 1.

$$P = P^*(t_i) \cdot k(\Delta V) \cdot k(T) = 22 \cdot 1,70 \cdot 1,19 = 44,52 \text{ МПа}$$

3. Визначають параметри руйнування.

Довжину шпурів приймають 2,4м, враховуючи посування вибою лави і відстань між рамами кріплення.

Відстань між шпурами визначають аналогічно прикладу 1.

$$a \leq \frac{3 \cdot 44,52^2 \cdot 3,14 \cdot 0,021^2 \cdot 30000}{8 \cdot 25000 \cdot 1^2} (1 - 2 \cdot 0,24) = 0,64$$

Відстань між рядами шпурів

$$a_0 \leq 2k_p \sqrt{P \frac{r_0^2}{C \cdot |\sigma_p|}}, \text{ м}$$

де k_p - коефіцієнт розукріплення вміщуючих порід, яке викликане розвантаженням масиву в результаті попереднього виймання корисної копалини, який враховує час що минув між вийманням корисної копалини й зарядженням шпурів, 1,3;

$|\sigma_p|$ - межа міцності вміщуючих порід, на одноосьове розтягання, 8 МПа;

C - коефіцієнт структурного ослаблення вміщуючих порід, 0,4.

$$a_0 \leq 2 \cdot 1,3 \sqrt{44,52 \frac{0,021^2}{0,4 \cdot 8}} = 0,20 \text{ м}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ О

СПРАВКА

об использовании результатов диссертации

Основные результаты и рекомендации диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук "Научные основы управления состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями при подземной разработке месторождений" Сахно Ивана Георгиевича используются ПрАО "Донецксталь" - металлургический завод" при разработке проектной документации. Суммарный годовой эффект от внедрения рекомендаций диссертации Сахно И.Г. составляет 1,46 млн. грн.

Директор проектного и
научно-исследовательского
центра, докт. техн. наук

А.В. Агафонов

