

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ
им. Н.С. ПОЛЯКОВА**



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
И БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ**

Монография

Днепропетровск
НГУ
2015

УДК 622.831.3 : 622.86

ББК 33м

М 34

Затверджено вченою радою Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол № 11 від 29.12.2014).

Рецензенти:

А.А. Гурін, д-р техн. наук, проф. кафедри рудникової аерології та охорони праці Криворізького національного університету;

А.С. Бєліков, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри безпеки життєдіяльності Придніпровської державної академії будівництва та архітектури України.

Математическое моделирование в задачах оценки эффективности и безопасности горных работ = **Mathematical modeling in solving problems of evaluating the efficacy and safety of mining operations**: монографія / М.Ю. Иконников, Ю.Р. Иконников, Е.А. Слащева, И.Н. Слащев, А.А. Яланский ; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск: НГУ, 2015. – 215 с.

ISBN 978-966-350-532-9

Посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы повышения эффективности и безопасности горных работ в опасных по газу угольных шахтах путем разработки методов определения, оценки и учета геофизической и геомеханической информации предотвращения недопустимых по «Правилам безопасности...» всплесков концентрации газа метана, снижения потерь воздуха в шахтной вентиляционной сети за счет применения комплекса инженерно-технических методов и средств.

Результаты исследований использованы при разработке и внедрении методик мониторинга аэрогазодинамических параметров и устойчивости горных выработок, способов проветривания, отвода метана из погашаемых выработок и дегазации углепородного массива.

Книга предназначена для инженеров, научных сотрудников, аспирантов и студентов вузов горнорудной промышленности.

Ил. 40. Табл. 11. Библиогр: 136 наим.

УДК 622.831.3 : 622.86

ББК 33

© М.Ю. Иконников, Ю.Р. Иконников, О.А. Слащева,

І.М. Слащов, А.О. Яланський, 2015

© Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2015

ISBN 978-966-350-532-9

© Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ШАХТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ	8
1.1 Устойчивость обнажений массива пород и грунта в сложных горно- геологических условиях	8
1.2 Анализ основных причин возникновения аварийных ситуаций на угольных шахтах Украины по газовому фактору	11
1.3 Анализ расчетных методов оценки напряженно-деформированного состояния массива пород и грунта	16
1.4 Выводы по разделу	24
2 МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОЦЕНКИ И УЧЕТА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	26
2.1 Анализ методов геофизического контроля свойств и состояния породного массива	26
2.2 Физико-механические параметры горных пород как основа устойчивости подземных и наземных сооружений	29
2.2.1 Прочностные свойства горных пород.....	29
2.2.2 Упругие свойства горных пород	34
2.2.3 Фильтрационные свойства горных пород и грунта.....	36
2.3 Трещиноватость как определяющий фактор изменения естественных фильтрационных процессов	41
2.4 Натурные исследования геомеханических процессов по изменению электропроводящих свойств геоматериалов	43
2.4.1 Методика электрометрического контроля влагосодержащих горных пород.....	43
2.4.2 Исследование фильтрационных процессов и трещиноватости массива методами электрометрии.....	46
2.5 Выводы по разделу	52
3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПЕРСОНАЛЬНОЙ ЭВМ	54
3.1 Современные методы ввода аналоговых сигналов и средства оценки трещиноватости и анизотропных свойств горных пород на основе анализа их спектров.....	54
3.2 Разработка унифицированных расчетных схем для математического моделирования методом конечных элементов.....	58
3.3 Разработка программ автоматизированной подготовки расчетных схем с заранее выбираемыми параметрами.....	61
3.4. Автоматизированная статистическая обработка промежуточной и выходной информации в геомеханических расчетных схемах	65
3.5 Выводы по разделу	69
4 МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	71
4.1 Методические особенности реализации геомеханических задач	71
4.2 Исследование процессов трещинообразования вокруг одиночных капитальных, подготовительных и очистных выработок	75

4.3 Исследование параметров напряженно-деформированного состояния массива в условиях камерно-столбовой системы разработки в слабых горных породах и оценка их достоверности.....	84
4.4 Методические особенности учета гидрогеологических факторов при решении геомеханических задач устойчивости массива	89
4.4.1 Анализ особенностей решения фильтрационных задач аналитическими и численными методами	89
4.4.2 Исследование фильтрационных процессов на основе оценки разрыхления грунтовых и породных массивов, плотин и откосов	93
4.4.3 Разработка методики экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния геоматериалов в сложных горно-геологических условиях	96
4.5 Выводы по разделу	106
5 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВОГО РЕЖИМА И ПЕРЕХОДНЫХ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ДОБЫЧНЫХ УЧАСТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ	108
5.1 Геомеханические и фильтрационные процессы в породном массиве как основа формирования газового режима добычных участков.....	108
5.2 Источники формирования и причины неустойчивости газового режима добычных участков угольных шахт	113
5.3 Разработка методики оценки условий и природы накопления газа метана в угольном забое и сопряженных горных выработках на основе метода радиационного контроля газа радона и продуктов его распада	120
5.4 Выводы по разделу	134
6 ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ ДОБЫЧНОГО УЧАСТКА.....	135
6.1 Переходные аэрогазодинамические процессы и управление проветриванием в вентиляционных сетях угольных шахт	135
6.2 Математическое моделирование переходных аэрогазодинамических процессов в шахтных вентиляционных сетях	141
6.3 Экспериментальное исследование переходных аэродинамических процессов на выемочных участках.....	157
6.4 Разработка математической модели управления проветриванием добычного участка угольной шахты	163
6.5 Выводы по разделу	169
7 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОЧИСНЫХ РАБОТ	170
7.1 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния слоистого породного массива с учетом разрушения.....	170
7.2. Разработка алгоритма и программного обеспечения работы системы автоматического управления проветриванием добычного участка.....	187
7.3. Разработка способа проветривания и отвода метана из погашаемой выработки на выемочном участке угольной шахты.	191
7.4 Выводы по разделу	200
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	202
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	207
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	213
Приложение А. Сводные таблицы физико-механических свойств пород	213

ВВЕДЕНИЕ

Украина владеет значительной сырьевой базой твердых полезных ископаемых (запасы марганца составляют 43 % мировых, железной руды, титана, урана – 18 %, запасы каменного и бурого угля – 95 % от всех запасов органического топлива Украины, его достаточно на 450 лет интенсивной добычи), что является основой энергетического комплекса страны, металлургической и химической промышленности.

Добыча полезных ископаемых, строительство подземных и наземных сооружений разного назначения сопровождается формированием новых природотехногенных систем. При этом непрерывно возрастает антропогенное влияние на литологическую среду, которое приводит к значительным изменениям ее физического состояния, а иногда и к аварийным ситуациям при эксплуатации таких систем. Важным естественным фактором, отрицательно влияющим на состояние пород и грунта вокруг геотехнических объектов, является водонасыщение или газонасыщение массивов, которое имеет место при строительстве, эксплуатации и ликвидации угольных и рудных шахт, карьеров и углубленных сооружений.

Технические возможности современной техники и технологии добычи угля в 3-5 раз превышают достигнутый уровень нагрузки на лаву. Вместе с тем, интенсификация и концентрация процессов угле- и газодобычи, переход на большие глубины сопровождаются значительным ростом и неравномерностью газовыделения в горные выработки, поскольку существующие способы и средства проветривания подготовительных и очистных выработок, а также дегазации породного массива, чаще всего, даже в совокупности, не позволяют полностью использовать потенциальные возможности техники из-за возникающего так называемого «газового барьера».

В настоящее время разработаны алгоритмы адаптационной оптимизации вентиляционного режима угольных шахт по газовому фактору, автоматически учитывающие изменения аэрогазодинамических параметров, топологию и взаимосвязанность ветвей сети, которые позволяют определить параметры регулирования расхода воздуха в вентиляционной системе произвольной сложности. Созданы исполнительные устройства регуляторов расхода воздуха во взрывозащищенном исполнении, пригодные для опасных по газу или пыли угольных шахт, а также

аппаратура управления ими. Однако, существующие методы управления проветриванием выемочных участков по газовому фактору малоэффективны, они не учитывают реальное геомеханическое состояние пород, их метаноносность и трещиноватость, опасность внезапного метановыделения из выработанного пространства лавы, подготовительных выработок и их сопряжений. Требуется доработка технических средств оперативного контроля и управления проветриванием выемочных участков, алгоритмов заблаговременного снижения газообильности прилегающего пространства с целью обеспечения безопасного и технологически допустимого повышения нагрузки на забой. Существенное практическое значение для определения и взаимного согласования алгоритмов управления режимами проветривания и безопасной технологии проведения выемочных работ имеет качественная и количественная предварительная оценка напряженно-деформированного состояния породного массива.

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния вокруг капитальных и подготовительных выработок (одиночных, сближенных), очистных забоев угольных и рудных шахт, элементов камерно-столбовой системы разработки, залегающих в слабых водонасыщенных горных породах, при различных величинах заданных напряжений и прочностных параметров, изменяющихся аналогично реальным слоистым структурам. Ужесточением условий нагружения и снижением прочностных показателей математическая модель исследуемых конструкций доводилась до полного разрушения, что позволяет заблаговременно дать прогноз развития зоны неупругих деформаций во времени в зависимости от фактического развития начальных физических процессов.

Наиболее остро стоит вопрос оценки геомеханического состояния подрабатываемого породного массива, в частности, при разработке угольных и гипсовых месторождений. Несмотря на высокий уровень выполненных исследований в этом направлении, целый ряд вопросов требует дальнейшей углубленной разработки. Во-первых, необходимо установить причинно-следственные связи между показателями изменения свойств массива под влиянием разных факторов и характеристиками его разрушения, которые в зависимости от нагрузки, безусловно, отличаются стадиями деформирования. Во-вторых, требует дальнейшего

совершенствования методическая база оценки в режиме реального времени напряженно-деформированного состояния геоматериалов в обнажениях при изменении их свойств. И, в-третьих, необходимо обосновать подходы для обеспечения надежности расчета напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг геотехнических объектов.

Таким образом, при решении задач устойчивости и безопасности геотехнических систем необходимо учитывать взаимодействие литолого-геологических, гидрогеомеханических и горнотехнологических составляющих, что в настоящее время возможно только с помощью применения методов математического моделирования нестационарных геомеханических процессов с учетом разрушения породного массива. При этом необходимо: использовать обширный банк данных или создать такой банк по определению физико-механических свойств пород в аналогичных горно-геологических условиях; дополнительно привлечь методы математической статистики и компьютерной обработки результатов вычислений для повышения достоверности математического моделирования; провести теоретические и экспериментальные исследования физических процессов, происходящих при разрушении породных обнажений, а для фактического определения состояния по результатам умышленного виртуального разрушения модели выполнить геофизическую оценку реальной стадии разрушения массива горных пород и объекта в целом.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ШАХТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ

1.1 Устойчивость обнажений массива пород и грунта в сложных горно-геологических условиях

Устойчивое состояние подземных выработок, обеспечивающее безопасность проведения горных работ и безаварийное выполнение всего технологического цикла добычи полезных ископаемых, определяется соотношением напряжений, действующих в породном массиве, и прочности пород. Геомеханические процессы в выработках – результат влияния двух полей напряжений: естественного и техногенного, создаваемого инженерной деятельностью человека [16, 43, 49, 111, 113, 121, 129].

Поле естественных напряжений в верхних слоях земной коры формируется действием гравитационных и тектонических сил. Гравитационное силовое поле определяется глубиной залегания пород, их плотностью, и действует в вертикальном направлении, а тектоническое (чаще всего) – геодинамическим взаимодействием плит и блоков и действует в горизонтальном направлении [41, 48, 111, 113].

В пределах разрабатываемых месторождений поле напряжений весьма неоднородно, напряжения в массиве описываются тензором. Следуя теории упругости, в каждой из точек существует три взаимно ортогональных направления, в которых все касательные компоненты тензора напряжений равны нулю [64]. Наиболее общее выражение для тензора напряжений предложено И.А. Турчаниновым [111, 113]:

$$T = T_z + T_m = \begin{vmatrix} \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H & 0 \\ 0 & 0 & \gamma H \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} T_0 + \Delta \sigma_m H & 0 & 0 \\ 0 & \psi(T_0 + \Delta \sigma_m H) & 0 \\ 0 & 0 & \chi(T_0 + \Delta \sigma_m H) \end{vmatrix}, \quad (1.1)$$

где T_z и T_m – гравитационная и тектоническая составляющие силового поля, ν – коэффициент Пуассона, γ – объемный вес; H –

глубина разработки; T_0 - значение горизонтальных тектонических напряжений на уровне дневной поверхности или другой плоскости отсчета глубины; $\Delta\sigma_m$ - вертикальный градиент тектонических сил (в общем случае переменная величина, зависящая от строения массива и рельефа земной поверхности); ψ, χ - коэффициенты горизонтального и вертикального распора в поле тектонических сил.

Направление тектонических напряжений связано с движениями плит земной коры и определяется методами геодинамики по рельефу, кливажу, разрывам, трещиноватости, качеству полезного ископаемого, а также полевыми геофизическими и шахтными натурными исследованиями. Влияние тектонических сил изменяется с увеличением глубины разработки месторождений. В результате проведенных измерений ИГД СО АН России, ВНИМИ, ИГТМ НАНУ, НГУ и др. методами разгрузки, локального гидроразрыва и буровых скважин установлено, что на больших глубинах тектонические напряжения часто превышают по величине гравитационную составляющую тензора напряжений в 2-3 и более раз и направлены в сторону максимального сжатия на границах взаимодействия плит [3, 8, 24, 49, 59, 65, 74, 90, 92, 111, 132].

В общем случае поле напряжений вокруг выработок зависит от совокупного действия многих взаимосвязанных факторов, которые можно подразделить на несколько групп. Первая группа факторов охватывает особенности начального поля напряжений в массиве. Вторую группу составляют пространственно-геометрические параметры рассматриваемых выработок, прежде всего форма и размеры поперечного сечения, соотношение длины, ширины и высоты выработки, близость соседних параллельных и наличие пересекающихся выработок, естественных аномальных зон и водоносных горизонтов. К третьей группе относятся физико-механические характеристики пород, которые непосредственно окружают выработку, поскольку именно эта часть массива воспринимает дополнительные нагрузки при их образовании. Наконец, четвертую, динамическую группу факторов, составляют условия воздействия на породы вокруг выработки в процессе ее проходки и дальнейшей эксплуатации [18, 40, 48, 78, 107].

Наиболее полно, в плане устойчивости сооружений, учитывают факторы первой, второй и третьей групп, поскольку разработаны аналитические (на базе методов механики сплошной среды),

расчетные (на базе теории сопротивления материалов, гибкой нити, методов потенциала, конечных и граничных элементов, компьютерного моделирования) и экспериментальные методы определения компонент напряжений и деформаций вокруг выработок различных конфигураций при любых статических нагрузках [3, 6, 12, 50, 62, 65, 66, 71, 101, 109, 111, 116, 119, 123, 124].

В геомеханике понятия о потере устойчивости породного или грунтового массива и его разрушении (потери прочности) - эквивалентны. Каждый элементарный объем горных пород чаще всего имеет трещиноватую структуру, которая определяется действием поверхностных и объемных сил [19]. При разработке угольных пластов длинными забоями (лавами) в массиве в окрестности очистных выработок появляется множество систем эксплуатационных трещин. Они определяют устойчивость кровли, смещение пород, характер обрушения и являются важнейшим фактором, от которого зависят условия выемки угля и в конечном итоге технико-экономические показатели работы очистных забоев.

Наибольшее значение среди факторов четвертой группы имеют изменения прочностных и деформационных свойств пород под влиянием процессов выветривания, движения воды, газа и воздуха, изменения температурного режима, статических и динамических нагрузок при проведении подготовительных, очистных и взрывных работ [40].

С увеличением площади обнажений, размеров горных выработок, глубины карьеров и крутизны склонов существенно повышается роль подземных вод как силового фактора, влияющего на устойчивость. Фильтрационные расчеты необходимы для: 1) установления скоростей и величин гидравлических уклонов (градиентов) фильтрационного потока; 2) определения положения депрессионной поверхности и величины фильтрационного расхода; 3) оценки фильтрационного давления на подземные сооружения. Величины скоростей и градиентов фильтрационного потока требуются для определения фильтрационной устойчивости грунта (выпор и суффозия). Расчеты фильтрационных давлений на сооружения наряду с другими факторами позволяют установить устойчивость этих сооружений, а также наметить необходимые мероприятия по снижению фильтрационного давления (установка шпунтовых стенок, завес, понуров, экранов, зубьев, образование щелей, дренажа и прочее). Дренажи в основании плотин являются

наиболее эффективным мероприятием, обеспечивающим почти полное снятие фильтрационного давления на подошву сооружения. Понуры, шпунты или завесы обеспечивают фильтрационную устойчивость грунта, увеличивая пути фильтрации, а горизонтальные или вертикальные скважины - это наиболее рациональные и дешевые дренажные средства нетронутых массивов пород и грунта [50, 108].

Гидрогеологические наблюдения обычно предусматривают регулярные гидрогеологические съемки в паводковый период, замеры уровня грунтовых вод по скважинам различных сетей. Часть гидрогеологических скважин целесообразно оборудовать датчиками гидростатического давления, позволяющими оценить распределение напоров в разрезе изучаемого массива [4, 25, 31, 50, 73, 76, 84, 86, 97, 108, 127, 131].

1.2 Анализ основных причин возникновения аварийных ситуаций на угольных шахтах Украины по газовому фактору

Увеличение глубины добычи угля (средняя глубина превышает 700 м, а более 30 шахт отрабатывают пласты на глубинах 1000-1400 м) существенно усложняет горно-геологические условия, в результате чего увеличивается вероятность горных ударов, глобальных и локальных обрушений пород, завалов выработок, выбросов пород, угля и газа, взрывов газа и пыли, что в совокупности предопределяет значительную аварийность горных работ, высокий уровень травматизма (каждый пятый украинец, который погиб на рабочем месте, – шахтер) и профзаболеваний в угледобывающей отрасли, существенно снижает экономические показатели работы угольных шахт в целом [24, 106].

Из 190 действующих шахт в Украине 90 % являются опасными по газу метану, а 60 % по взрывам угольной пыли. Только за 10 лет в подземных выработках угольных шахт произошло 38 взрывов газа и пыли и 78 случаев воспламенения метана. Наибольшее число взрывов произошло на шахтах ГХК “Донецкуголь” и “Краснодонуголь”. Наиболее тяжелыми по последствиям были взрывы на шахтах им. А.Ф. Засядько (2007 г., погибло 106 чел., 2001 г. – 56 чел., 1999 г. – 39 чел), им. Баракова (2000 г. – 80 чел.), им. А.А. Скочинского (1998 г. – 64 чел.), им. XIX Партсъезда (1998 г. – 24 чел.). Доля пожаров в общей аварийности на угольных шахтах достигает до 58 %

[29, 89]. Несмотря на сравнительно небольшую долю взрывов в общей аварийности, ущерб от них весьма значителен и сопоставим с последствиями от наиболее распространенных видов аварий.

Основная причина внезапных взрывов пылегазовых смесей – это накопление недопустимых концентраций газа метана или угольной пыли, которых можно избежать, если заранее выполнять профилактические работы или временно приостанавливать добычу, что и проводится в высокоразвитых странах мира. Непосредственный повод для взрыва – искра или высокая температура, она может быть и естественного происхождения, но часто возникает из-за грубого пренебрежения правилами безопасности. Взрывы пылегазовых смесей в принципе невозможны, если нет газа или угольной пыли в больших объемах [24, 29, 89, 106]. В шахтных условиях причинами появления искры или высокой температуры могут служить неисправности электрооборудования или его эксплуатация в условиях, не отвечающих техническим условиям их работы, ведение взрывных работ, искры, возникающие от трения режущего инструмента, возгорание транспортной ленты, появление открытого огня (курение, сварка, пожар) и др.

Кроме аварий на угольных шахтах часто возникают аварийные ситуации, которые при определенных условиях могут перерасти в аварии с тяжелыми последствиями. Так, с 1996 по 2001 г. на угольных шахтах возникло 312 аварийных ситуаций, к ликвидации которых привлекались подразделения ГВГСС [29]. Основная часть их связана с загазированием горных выработок и возникновением опасности взрыва образовавшейся метановоздушной смеси, а также с наличием источника высокой температуры в шахте, способного воспламенить горючее вещество.

Увеличение метанообильности шахт, связанное с ростом глубины, концентрация и интенсификация горных работ привели к тому, что средствами вентиляции уже не удастся снизить содержание метана в рудничной атмосфере до норм, установленных «Правилами безопасности...» [85]. Это сдерживает дальнейшее увеличение темпов ведения горных работ и повышение производительности добычных участков. Широкое применение разработанных в нашей стране способов и средств дегазации угольных пластов [15, 54], а также прогрессивных схем проветривания [21] расширило диапазон использования высокопроизводительной техники, позволило освоить тысячный рубеж суточной добычи с одной лавы. Вместе с тем, даже

комплексное применение нескольких способов и средств борьбы с метаном во многих случаях оказывается недостаточным, что вызывает необходимость дальнейшего совершенствования существующих, изыскания и разработки новых способов борьбы с газом в угольных шахтах [9,15].

В США до начала выполнения шахтных горных работ проводят предварительную дегазацию угольных пластов до установленной допустимой нормы непосредственно с поверхности через буровые скважины, при этом добытый метан используется как дополнительное сырье или энергоноситель. Стоимость добычи такого метана значительно выше традиционной, поэтому для внедрения такой технологии необходимо экономическое содействие на законодательном уровне. Дегазация – это длительный процесс, который требует значительных предварительных капиталовложений, однако она кардинально решает проблему безопасности, связанную с газом метаном. Для ее освоения как технически, так и технологически необходимо не менее 10 лет [15, 54]. В нашей стране ранее были проведены эксперименты по дегазации угольных пластов с поверхности с помощью гидроразрыва, однако из-за ограничения технических возможностей результаты оказались весьма скромными.

Важным направлением борьбы с газом метаном на добычных участках угольных шахт является его частичная утилизация вакуумным способом, в частности, с помощью «газового горизонта», откачки метана восходящими скважинами из зоны выработанного пространства, проведением дополнительной вентиляционной выработки, вентиляционного ствола или шурфа для подсыхания воздушной струи или вентиляции выработанного пространства [15, 42].

Проблема частичной дегазации теснейшим образом связана с геомеханикой и газодинамикой угленосного массива, подверженного процессам сдвижения угленосной толщи [14, 42, 43, 91, 107]. Особенно сложна эта проблема, когда выемочные столбы имеют мелкоамплитудную асимметричную пликтивную складчатость или дизъюнктивную нарушенность. Необходимость решения указанной проблемы диктуется постоянным увеличением газообильности угольных шахт и несоответствием показателей работы добычных участков в сложных горно-геологических условиях возможностям современной высокопроизводительной техники.

Поиск путей преодоления «газового барьера» требует разработки новых способов повышения эффективности вентиляции, одним из которых является создание систем оперативного автоматизированного управления проветриванием шахт. Большие успехи достигнуты в области создания средств автоматического контроля параметров рудничной атмосферы, которые могут быть использованы при разработке таких систем. Ведутся работы по созданию технических средств для дистанционного перераспределения воздуха в сети горных выработок [21, 29].

Усилиями ряда академических, проектно-конструкторских и учебных учреждений (ИГТМ НАНУ, ДонУГИ, МакНИИ, НГУ, МГГУ, КНИУИ и др.) создана подсистема диспетчерского контроля и управления проветриванием угольных шахт „АТМОС”, которая позволяет производить перераспределение воздуха по горным выработкам в зависимости от газовой обстановки на добычных участках. Однако возможности работы этой подсистемы на самом участке по снижению «газового барьера» весьма ограничены, поскольку она не учитывает возможности опасного накопления газа метана в подготовительных выработках и на сопряжениях, в выработанном пространстве, в прилегающем и в массиве обрушенных пород, в особенности в пористом и газонасыщенном песчанике, а также изменение газопроницаемости породного массива за счет изменения скорости подвигания лавы, условий отработки предыдущих угольных столбов или цикличности посадки кровли в лаве [21, 29, 34].

При ведении очистных работ в горном массиве происходят тесно взаимосвязанные геомеханические и газодинамические процессы сдвижения, расслоения, деформирования и трещинообразования, а также процессы интенсивной газоотдачи в основном сближенных пластов и пород, которые в сумме имеют большую мощность и могут интенсивно расслаиваться, а, конечном счете, обрушаться даже без принудительной посадки кровли. Характер протекания указанных процессов обуславливает сложную газодинамическую обстановку добычного участка, темпы и безопасность ведения горных работ [29, 34].

Одним из важных естественных факторов, который увеличивает метановыделение из завалов обрушенных пород вокруг отрабатываемых выемочных столбов, является водонасыщение массивов, которое имеет место при эксплуатации и ликвидации шахт,

а также при отработке угольных целиков, которые использовались ранее для охраны горных выработок [85].

Весьма существенную роль в решении проблемы безопасности играет «человеческий фактор». «Правила безопасности в угольных шахтах» по образному выражению самих горняков «написаны кровью», однако в силу экономических причин или простой недисциплинированности не всегда выполняются, что приводит до трагических последствий. Возможно традиционно, а возможно и через менталитет шахтеров на многих угольных, рудных и нерудных шахтах при молчаливом согласии, а иногда и по приказу руководителей предприятий осуществляются нарушения «Правил безопасности...». Поэтому даже самые совершенные «Правила безопасности...» не смогут предотвратить аварии, пока владельцы шахт и их руководители не будут нести личную ответственность за последствия аварий. Устранить организационные причины аварий, обусловленные наличием, как принято говорить, человеческого фактора, весьма трудно. В самом деле, как бы ни были хорошо и рационально организованы системы вентиляции и противоаварийной защиты, невозможно в полной мере предусмотреть нарушения технологического процесса, спровоцированные плохим самочувствием, невнимательностью или недостаточной грамотностью работника при осуществлении технологических операций, поэтому необходима разработка автоматических систем обеспечения безопасности.

Реструктуризация угольной промышленности привела к закрытию убыточных предприятий и к попыткам повысить рентабельность оставшихся как путем изменения цен и экономии средств, так и на основе повышения эффективности производства. Внедрение передовых технологий добычи, организации основного производства и вспомогательных систем жизнеобеспечения встречает определенные технические и социальные трудности, связанные со спецификой эксплуатируемых месторождений, а также желанием владельцев в короткие сроки получить максимум прибыли.

Ставшее типичным объяснение данной ситуации сложными горно-геологическими условиями добычи угля в Украине, отчасти справедливое при сравнении с США, не может быть признано объективным при сравнении показателей при добыче угля в Германии и в Польше. На угольных шахтах этих стран средний уровень суточной добычи из очистного забоя в 5-10 раз выше, а

аварийность и травматизм в 5-10 раз ниже, чем на украинских, при тех же способах добычи угля, проходки выработок и доставки полезного ископаемого.

Изменения геомеханических, газодинамических и гидродинамических процессов в горном массиве при увеличении скорости подвигания забоев и глубин разработки влечет за собой трансформирование физической обстановки в выработках добычных участков, а проблема нестабильности газового режима добычных участков вновь становится актуальной, определяющей эффективность и безопасность схем ведения горных работ в новых условиях.

1.3 Анализ расчетных методов оценки напряженно-деформированного состояния массива пород и грунта

Традиционная геомеханика делит геомеханические задачи на две группы: предельного состояния и деформационные. В первую группу попали задачи определения несущей способности подземных выработок, камер, стволов шахт и рудников, устойчивости карьеров, откосов, насыпей, плотин, фундаментов, давления на подпорные стенки. Ко второй группе относят задачи расчета осадок грунтовых оснований под нагрузками от зданий и других сооружений, в том числе с учетом фильтрационной консолидации, контактные задачи взаимодействия сооружений с грунтами, прогноза устойчивости подземных выработок путем сопоставления напряжений с прочностными свойствами пород [6, 119].

Теоретическая основа задач первой группы заложена Ш. Кулоном и заключается в решении предельных задач на основе уравнений равновесия в плоскости или в пространстве. Решение задач второй группы базируется на предположении наличия линейной связи напряжений и деформаций в грунте, что позволяет использовать методы теории упругости [119].

Для описания процесса поведения геоматериалов при решении краевых задач теории упругости сложно применять классические аналитические методы, а зачастую практически просто невозможно. Поэтому широко применяют численные методы: метод конечных разностей, вариационно-разностный, методы конечных и граничных элементов.

Все методы базируются на общих принципах механики сплошных сред и их объединяет необходимость построения дискретных математических моделей рассчитываемых объектов. При этом напряженно-деформированное состояние объектов описывают системой алгебраических уравнений, решение которой дает дискретное множество значений в заранее намеченных точках (узлах) области, однако процесс получения уравнений равновесия каждым методом имеет некоторые различия, что в значительной степени определяет область их приложения. При использовании метода конечных разностей сеточные уравнения составляются непосредственно из дифференциальных уравнений заменой производных конечными разностями, но метод не использует вариационных принципов, что может привести к нарушению системы алгебраических уравнений и к дополнительным трудностям при формулировке граничных условий [98].

В основе вариационно-разностного метода лежит минимизация полной энергии Π системы, под которой понимают разность между энергией деформирования W и работой объемных и поверхностных сил A [123]

$$\Pi = W - A, \quad (1.2)$$

где в условиях плоской задачи:

$$W = \frac{1}{2} \iint_S (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \varepsilon_{xy}) ds;$$

$$A = \iint_S (X \delta_x + Y \delta_y) ds + \int_l (\bar{X} \delta_x + \bar{Y} \delta_y) dl;$$

$\sigma_x, \varepsilon_x, \sigma_y, \varepsilon_y, \tau_{xy}, \varepsilon_{xy}$ - компоненты тензоров напряжений и деформаций, которые связаны между собой соотношениями:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\}; \quad (1.3)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{\delta\}; \quad (1.4)$$

$\{\sigma\}, \{\varepsilon\}, \{\delta\}$ - векторы напряжений, деформаций и перемещений; $[D]$ - матрица, зависящая от физических свойств массива; $[B]$ - матрица, зависящая от координат вершин элементов, матрица формы;

\bar{X}, \bar{Y}, X, Y - соответственно компоненты поверхностных и объемных сил; δ_x, δ_y - компоненты вектора смещений по осям x и y .

На основе этих соотношений, минимизируя уравнение (1.2) по перемещениям и заменяя частные производные их разностными аналогами, а интегрирование – суммированием, получают основное уравнение метода для решения задачи в перемещениях, которое в матричной форме записывается в виде:

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{F\}, \quad (1.5)$$

где $[K]$ - матрица жесткости системы; $\{F\}$ - вектор объемных и поверхностных сил.

Чтобы решить задачу, необходимо составить матрицы $[K]$ и $\{F\}$, а затем определить вектор $\{\delta\}$ из системы алгебраических уравнений. Самым сложным является построение матрицы жесткости, которая составляется на основании матриц жесткости отдельных элементов, отражающих деформационные свойства материала, и координат вершин элементов. Вектор сил находится суммированием объемных и поверхностных сил в соответствующих узлах. Для плоской задачи объемные силы рассчитываются по формуле [123]:

$$Y_i = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^m \gamma_k S_k, \quad (1.6)$$

где i - номер узла; m - количество элементов, примыкающих к узлу; γ_k - объемный вес элемента; S_k - площадь элемента. Для учета веса среды к вертикальной составляющей поверхностных сил прибавляется соответствующая составляющая веса. Распределенная нагрузка заменяется сосредоточенной и рассчитывается по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_i &= \sigma_x \frac{l_1 + l_2}{2} \cos \alpha \\ \bar{Y}_i &= \sigma_y \frac{l_1 + l_2}{2} \sin \alpha \end{aligned} \right\}, \quad (1.7)$$

где l_1, l_2 - длины сторон, совпадающие с границей в треугольных элементах, примыкающих к данному узлу; α - угол между

направлением силы и оси Ox . Главные напряжения определяют в центрах элементов по формулам:

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}; \quad (1.8)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}; \quad \operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}.$$

Для реализации вариационно-разностного метода составлена программа STRESS (возможности программы – до 1000 узлов и 2000 элементов) [123].

Наиболее распространенным приближенным методом, который отличается своей универсальностью и наглядностью, является метод конечных элементов (МКЭ). В МКЭ переход к дискретной расчетной схеме осуществляется, в отличие от предыдущих методов, из соображений механики. Исследуемая область разбивается на элементы, чаще всего треугольной либо четырехугольной формы. Наметились три подхода в решении задач: на основе перемещений (задаются функции, которые аппроксимируют перемещения внутри элемента); на основе сил (задаются функции, которые аппроксимируют напряжения внутри элемента); на смешанных условиях (задаются функции, аппроксимирующие на одной части элемента перемещения, а на другой – напряжения). Механические свойства (параметры функции) каждого элемента, а следовательно, всей системы, задаются на основе вводимых механических гипотез, а искомые усилия (перемещения) – из условия кинематической (статической) совместимости системы. Это позволяет естественно формулировать граничные условия, рационально располагать расчетные узлы сеточной области, свободно сгущая ее в местах возможного большего градиента разрешающей функции, более эффективно применять метод к исследованию комбинированных систем, сопрягаемых из фрагментов различной конфигурации. Параллельно с первоначально возникшими исследованиями двумерных объектов МКЭ успешно используется и для решения трехмерных задач [98].

Прикладные аспекты метода описаны в литературе и раскрывают свои возможности при решении сложных нелинейных задач. Он позволяет учесть естественные поля напряжений и гидрогеологические особенности, наиболее полно реализовать

решения сложных и уникальных задач по многообразию механических свойств и условий нагружения горных пород. Фактически МКЭ не просто метод расчета определенных параметров породного массива и материалов конструкций, а унифицированный аппарат математического моделирования большинства физических процессов, происходящих в массиве горных пород или грунте [6, 17, 18, 44, 47, 62, 97, 98, 113, 119].

Процедура решения МКЭ предусматривает два основных принципа. При бесконечно малом перемещении узловых точек работа узловых сил равна работе внутренних напряжений, а дополнительная работа на контуре области равна дополнительной работе в пределах исследуемой области, т.е. соблюдается принцип возможных перемещений. Второй принцип состоит в том, что для обеспечения условия сохранения сплошности системы силовые взаимодействия между элементами осуществляются только в узловых точках, а элементы при деформировании не теряют контакта друг с другом. Таким образом, полностью и однозначно определяются теоретические главные напряжения, которые будет иметь элемент среды при заданных деформациях. Деформации и узловые перемещения связаны соотношениями (1.3-1.6). Из реально заданных сосредоточенных или распределенных нагрузок формируется вектор известных узловых сил, при этом вес каждого элемента распределяется между его тремя узлами. Вычисляется матрица жесткости системы. По известным напряжениям рассчитывается сумма силовых вкладов, воспринимаемых связью от всех элементов, примыкающих к рассматриваемому узлу с заданным перемещением. МКЭ обеспечивает сведение задачи интегрирования бигармонического дифференциального уравнения к решению системы линейных уравнений, в которой в качестве неизвестных участвуют значения неизвестных узловых перемещений. В результате решения определяются неизвестные узловые перемещения по известным узловым силам для каждого элемента геомеханической системы [6, 119].

Представления о деформационной теории пластичности сформулировал Генки. Компоненты упругопластической матрицы $[D]$ являются функциями деформаций (или напряжений), в общем случае матрица несимметрична относительно главной диагонали. Процесс пластического деформирования за пределом прочности имеет другие уравнения связи, предполагается, что деформирование является

непрерывным сжатием в направлении σ_1 и расширением в направлении σ_3 [119]:

$$\varepsilon_3 = -\operatorname{ctg}(\beta) \cdot \varepsilon_1, \quad (1.9)$$

где ε_1 и ε_3 - соответственно деформации в направлении сжатия и растяжения; при равнообъемном течении $\beta = \pi/4$.

Трещиноватость оценивается по результатам натуральных испытаний образцов путем введения коэффициентов ослабления в прочностные характеристики породы [119].

Таким образом, например, можно привести следующую последовательность проведения исследований по методу конечных элементов: 1) формирование расчетных узлов, в которых определяются величины разрешающей функции и расчленение исследуемого объекта на конечные элементы желаемой формы; 2) установление зависимостей между усилиями и перемещениями в «контактных» узлах элемента, т. е. построение матрицы жесткости (задание закона перемещений по области конечного элемента и их выражение через систему независимых параметров в соответствии с принятым законом, выражение компонент деформаций и напряжений через неизвестные параметры, определение жесткостных характеристик элементов на основе вариационных принципов); 3) составление системы алгебраических уравнений, выражающих кинематическую (статическую) совместимость деформаций исследуемого объекта, их решение и вычисление значений разрешающей функции в расчетных узлах; 4) определение компонент напряженно-деформированного состояния рассчитываемой системы на основе найденных значений разрешающей функции. Наиболее важными являются первые два пункта, определяющие количество и расположение расчетных узлов, форму конечных элементов и гипотезы о распределении перемещений или напряжений в области каждого элемента. От рационального решения этих вопросов в первую очередь зависит успех решения задачи в целом, они же являются наиболее трудоемкими [98].

В методах граничных элементов (МГЭ) на элементы разбивается только граница области, а численное решение строится на основе полученных предварительно аналитических решений для простых

сингулярных задач таким образом, чтобы приближенно удовлетворить заданным граничным условиям на каждом элементе контура [61, 71]. Методы по своей популярности соизмеримы с методами конечных элементов, чему способствуют следующие их преимущества: уменьшение объема вычислений, особенно в трехмерных задачах; упрощение разбивки на элементы и решения задач для бесконечных областей; сокращение времени на подготовку входной информации; естественность решения разнообразных контактных задач. В работе [61] приведены вычислительные программы для двумерного метода фиктивных нагрузок (TWOFS), двумерного метода разрывных смещений (TWODD) и двумерного прямого метода граничных интегралов (TWOBI). Однако не следует думать, что МГЭ полностью вытеснит МКЭ с арены расчетов. МКЭ в свою очередь имеют очень важные достоинства: разреженность и симметричность матрицы; естественный охват задач с непрерывными или частыми изменениями свойств среды; большой набор средств для учета нелинейных эффектов в элементах объема среды, что связано не только с возможностью использования метода последовательных приближений (такая возможность есть и при использовании МГЭ), но и с перестройкой локальных матриц жесткости. Основное преимущество МКЭ - легкость восприятия инженерами, их привычность, высокий уровень численного развития и относительно удовлетворительная оснащенность программами [119].

В 1982 г. по инициативе НАСА был разработан проект создания глобальной системы программ для решения линейных и нелинейных упругопластических задач статики и динамики, которая основана на методе граничных элементов и сопоставима по своим возможностям с конечно-элементной системой NASTRAN [133]. Разработка данной системы (BEST-Boundary Element Solution Technique) потребовала затрат труда в 42 человеко-года и все еще продолжается. Таким образом, ориентировка на постановку и решение все новых и новых задач в постоянно изменяющихся горно-геологических условиях, тем более в «режиме реального времени», для горняков – слишком расточительная задача, необходимы новые нетрадиционные подходы.

Отсюда следует, что разумным направлением в развитии всех численных методов должно быть не их противопоставление, а использование достоинств каждого из них. Это можно сделать, выбирая из арсенала имеющихся программ МКЭ и МГЭ ту или те, которые лучше соответствуют особенностям конкретной проблемы,

или, применяя их в комбинациях, рассмотреть конкретную задачу с разных аспектов и в разных масштабах. Перспективный способ в объединении достоинств МКЭ и МГЭ заключается в создании специальных гибридных алгоритмов, совмещающих их идеи. Так появляются «суперэлементы», которые можно рассматривать как объединения граничных элементов или разновидности конечных элементов [61]. На наш взгляд, для промышленного внедрения наиболее важным является унификация задач, доведение их сначала до простых схем с четкими инструкциями по их заполнению, а затем – до полной автоматизации, как процесса обработки, так и введения информации.

Применение расчетных методов к естественным оползневым склонам не обеспечивает необходимой надежности из-за: 1) несовершенства расчетных методов и их несоответствия механизму оползня; 2) невозможности учета в расчете всего сложного комплекса природных условий; 3) неполного соответствия расчетных показателей, определенных на образцах, свойствам пород в массиве [50]. По наблюдениям геологов, сползающий массив сохраняет в основном свое первоначальное строение, а подстилающий остается неподвижным. Поэтому слой разрушения теоретически считают в пределе бесконечно тонкой поверхностью скольжения, по которой осуществляется сдвиг откоса. Чаще всего поверхность скольжения представляет собой перевернутую циклоиду с выполаживающейся нижней частью, но для практических расчетов ее принимают в однородном грунте круглоцилиндрической поверхностью, а в неоднородном – составленной из круглоцилиндрических и плоских участков, сопрягающихся в соответствии с геологическим строением откосного массива. Основываясь на понятии предельного локального равновесия, в строительной механике развиты инженерные методы расчета устойчивости обнажений, среди которых наиболее полно учитывает горно-геологические условия среды так называемый способ отсеков, его разновидности предложены В. Феллениусом, К. Терцаги, А. Бишопом, М.Н. Гольдштейном [19]. Однако, на наш взгляд, преимущество расчетных методов заключается в том, что они позволяют не субъективно, а объективно определять в зависимости от нагрузок и прочности пород возможные линии скольжения, а затем уже произвести аналитические расчеты.

1.4 Выводы по разделу

Строительство и эксплуатация шахт, карьеров и других подземных сооружений в сложных гидрогеологических условиях формирует новый техногенный режим подземных вод, который оказывает существенное влияние на ведение горных работ и способствует разрушению массива пород, поэтому учет гидрогеологических факторов весьма важен при прогнозе устойчивости выработок.

Анализ основных причин возникновения аварийных ситуаций на угольных шахтах Украины по газовому фактору показал, что существующие методы управления проветриванием выемочных участков недостаточно эффективны, они не учитывают реальную геомеханическую обстановку вмещающих пород участка, их метаноносность и трещиноватость, опасность внезапного метановыделения из выработанного пространства лавы, подготовительных выработок и их сопряжений. Поэтому требуется доработка существующих и создание новых технических средств оперативного контроля и управления проветриванием выемочных участков, пригодных для газовых шахт, алгоритмов заблаговременного снижения метанообильности прилегающего пространства в ремонтную смену с целью обеспечения безопасного и технологически допустимого повышения нагрузки на забой. Повышение безопасности работ при изменении режимов проветривания добычных участков, опасных по газу, определяется совокупностью решения перечисленных задач. Качественная и количественная предварительная математическая оценка напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг очистного забоя имеет большое практическое значение для определения и взаимоувязки алгоритмов режимов дегазации, проветривания и безопасной технологии проведения добычных работ.

В таких условиях расчеты напряженно-деформированного состояния производятся путем решения сложных нелинейных задач теории упругости. Для этого наиболее приемлемым является применение метода конечных элементов (МКЭ), совмещенного с методом начальных напряжений и позволяющего описать трансверсально-изотропную область любого очертания, при этом сохраняется соответствие модели физическим процессам, реально происходящим в массиве. Современные программы МКЭ позволяют

сопоставить напряжения с прочностными свойствами пород, исследовать условия равновесия системы и обеспечить ее устойчивость. Если ранее на вычисление достаточно простой геомеханической задачи уходило несколько часов машинного времени, то быстроедействие, память и другие сервисные возможности современных персональных ЭВМ позволяют решать их буквально за считанные секунды, поэтому, учитывая время протекания геомеханических процессов, такие расчеты можно условно принять за расчеты в «режиме реального времени».

Однако подготовка исходной информации достаточно трудоемкий процесс, требующий проведения множества простых вычислений, построений и проверок. Каждая конкретная геомеханическая задача требует построения новой схемы (модели), поскольку в настоящее время отсутствуют простые унифицированные конечно-элементные схемы, позволяющие решать широкий класс горных задач оценки состояния выработок с возможностью изменения их исходных горно-геологических условий и режимов нагружения. Кроме этого, в построение математической модели вносятся элементы субъективности и случайности при ее разбиении, исходные параметры прочностных свойств пород часто не отражают реально существующий объект, а зачастую попросту отсутствуют, что, в конечном итоге, сказывается на результатах вычислений и их достоверности.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОЦЕНКИ И УЧЕТА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.1 Анализ методов геофизического контроля свойств и состояния породного массива

При разведке месторождений твердых полезных ископаемых применяют в отдельности или в определенных комплексах различные геофизические (методы полевой геофизики) и механические методы контроля скважин: электроразведку (оценивают КС - кажущееся сопротивление пород, ПС - потенциал естественного электрического поля, используют ВЭЗ и ТК - вертикальное электрическое зондирование и токовый каротаж, реже ВП - метод вызванных потенциалов и так далее); радиоактивный каротаж (ГК - гамма-каротаж, ГГК - гамма-гамма каротаж, НК и ННК - нейтронный и, реже, нейтрон-нейтронный каротаж); метод акустического каротажа, сейсмические и сейсмоакустические методы; геотермические исследования, кавернометрию и газовый каротаж [73, 115].

Геофизические методы позволяют, во-первых, изучить геологическую структуру выделенных породных массивов, а во-вторых, оценить их инженерно-геологические свойства. При этом, естественно, не существует четкой границы между указанными задачами, так как особенности геологического строения выявляют на основании различия свойств пород, а свойства пород, в свою очередь, зависят от геологического и тектонического строения. К типовым задачам первой группы относятся: определение глубины залегания кровли коренных (скальных) пород; глубинное расчленение пород по их инженерно-геологическим и физико-механическим свойствам; выделение тектонических нарушений и зон ослабленных пород; определение зоны выветривания. К типовым задачам второй группы относятся: определение прочностных, упругих и деформационных свойств горных пород; оценка степени ослабления пород массива; выявление основных закономерностей в распределении различных свойств пород в массиве, особенно зон концентрации напряжений [11, 20, 25, 26, 27, 30-32, 37, 60, 80, 92, 96, 110, 125, 128]. Сбору также подлежат материалы исследований, характеризующие состояние пород, физические процессы горного производства [7, 16, 27, 31, 72, 73, 79, 90, 95, 99].

Систематизация и обобщение материалов электроразведки, акустического каротажа скважин, сейсморазведки и других методов геофизического контроля сводится к следующему [25, 72, 73, 90, 95, 115, 118, 132]: 1) определение однотипных горно-геологических комплексов пород и площади их распространения; 2) построение геологических разрезов для каждого выделенного геологического комплекса пород; 3) выделение в пределах каждого породного комплекса водоносных горизонтов, местных водоупоров; 4) выявление стратиграфических несогласований и разрывных нарушений, в том числе малоамплитудных; 5) выявление условий водного питания водопритоков, болот; 6) выявление закономерностей изменения геофизических параметров отдельных слоев или комплексов, обусловленных изменениями состава или состояния слагающих их пород; 7) выявление корреляционных связей между геофизическими и физико-механическими параметрами, а также гидрогеологическими характеристиками пород; 8) сопоставление исходных геофизических параметров пород, полученных при изысканиях, с результатами натуральных наблюдений на действующих шахтах, водозаборах подземных вод и гидротехнических сооружениях; 9) выделение площадей развития физико-геологических процессов и явлений.

Как известно, основными факторами, определяющими удельное электрическое сопротивление пород, являются их минералогический состав, пористость, трещиноватость и минерализация вод, заполняющих эти поры или трещины. Большой объем экспериментальных работ и созданные на их основе приемы измерения основных параметров, характеризующих поляризацию осадочных пород, позволяют уже в настоящее время широко использовать сейсмoeлектрические методы, метод вызванной поляризации (ВП) для изучения разрезов, сложенных песчано-глинистыми породами. Исследования также показали, что в чистых глинах и чистых песках потенциалы вызванной поляризации практически отсутствуют [25, 100].

Обработка электроразведочных материалов начинается в полевых условиях по мере поступления информации и заключается в вычислениях измеряемых параметров, проверке полевых журналов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), ВЭЗ ВП и электропрофилирования, построения графиков кажущихся сопротивлений, кривых ВЭЗ и ВЭЗ ВП, каротажных диаграмм.

Качественная интерпретация предшествует количественной и сводится к построению карт и графиков для различных разностей по данным электропрофилеирования и ВЭЗ, разрезов кажущихся сопротивлений по профилям ВЭЗ, полярных диаграмм круговых вертикальных зондирований (КВЗ), диаграмм эквипотенциальных линий по данным метода заряженного тела (МЗТ) [25].

В основу метода акустического каротажа положено изучение различия упругих свойств пород, слагающих разрезы скважин. Основными типами волн при каротаже скважин являются продольные $P_0P_1P_0$, поперечные $P_0S_1P_0$ и поверхностные P_0RP_0 [115]. Как правило, принимаемая поперечная волна имеет амплитуду колебаний в несколько раз большую, чем у продольной волны, в то же время она обладает более низкой частотой. Прямая гидроволна P_0 , наоборот, более высокочастотная. Отличие волн по частоте и амплитуде обусловлено различным поглощением их неоднородной и трещиноватой средой; как известно, колебания высоких частот затухают быстрее, и отфильтровываются более низкочастотные составляющие спектра. Таким образом, по кинематическим и динамическим характеристикам упругих волн определяют как скорости продольных и поперечных волн в породах, так и участки повышенной трещиноватости массива. По скоростям рассчитывают модули, характеризующие упругие свойства пород [20].

С увеличением глубины разработки месторождений полезных ископаемых резко ухудшаются горно-геологические и горнотехнические условия, которые обуславливают повышение многообразия форм проявления горного давления. Считается, что в перспективе основными способами добычи будут буровзрывная выемка на базе самоходного оборудования и технология без присутствия людей в забое с применением высокопроизводительных машин с дистанционным управлением, поэтому неотъемлемой частью технологии станет контроль геомеханической обстановки. Проведение горных выработок любого сечения, шпуров и скважин связано с образованием вокруг них различных волнообразных зон опорного давления, трещиноватости, повышенной газоносности или увлажнения. Учитывая многообразие горно-геологических условий и горнотехнических задач контроля механических свойств, состояния и устойчивости породного массива, контроль горных объектов чрезвычайно сложный и трудоемкий процесс, он требует

статистической оценки результатов измерений и комплексного учета особенностей процессов самоорганизации породного массива. Немаловажную роль в формировании свойств и состояния пород в массиве играют технологические особенности проведения выработок, а именно: способы и средства проходки, вид и тип крепи, цикличность и повторяемость ее элементов, условия и средства забутовки закрепного пространства [5, 14, 23, 39, 59, 66, 68, 69, 70, 75, 78, 82, 106, 119, 124, 129].

Среди методов шахтного геоконтроля наиболее экономичными и информативными являются также геофизические, которые выделены в отдельное направление – методы горной геофизики. Их можно разделить на методы и средства диагностики и контроля, позволяющие вести дискретные измерения или непрерывные наблюдения [7, 11, 20, 24, 27, 31, 72, 90, 95, 110].

Гидрогеологические процессы постоянно медленно или быстро изменяются, обладают определенной внезапностью и, в то же время, трудно поддаются локальному контролю, поэтому предпочтение следует отдавать расчетным методам прогноза водопритоков с уточнением исходных гидрогеологических условий и характера последствий на основе методов оперативного геофизического экспресс-контроля.

2.2 Физико-механические параметры горных пород как основа устойчивости подземных и наземных сооружений

2.2.1 Прочностные свойства горных пород

Основными показателями физико-механических свойств, определяемыми по кернам геологоразведочных скважин и непосредственно в массиве, являются: плотность, пористость, прочность на сжатие, прочность на разрыв вдоль и поперек слоистости, статические модули упругости, скорости упругих волн, влажность, размокаемость, электрические, электромагнитные, реологические и теплофизические свойства.

В настоящее время прочностные свойства вмещающих горных пород изучены уже в значительных объемах как на стадии разведки месторождений, так и при их доразведке и эксплуатации. Отбор проб в кровле и почве угольных пластов осуществляют в пределах от 0 до 20 м, при этом общая длина керна по каждой пробе в зависимости от

условий отбора изменяется от 0,1 до 1 м. Кроме кровли и почвы, по отдельным участкам скважин, например в зонах дизъюнктивных тектонических нарушений, отбирают все породные слои, однако получаемая информация не всегда удовлетворяет проектировщиков ни по объему, ни по качеству [73].

При бурении керна и резке образцов наиболее слабые породы частично или полностью разрушаются, поэтому избирательность лабораторных испытаний пород приводит к завышению показаний о величине их прочности [27]. Процесс бурения, температурный режим, условия хранения и транспортирования могут изменяться в значительных пределах, что дает дополнительные погрешности при определении всех без исключения параметров физико-механических свойств. Кроме того, в связи с существующими экономическими трудностями геологи не всегда имеют возможность произвести отбор проб или образцов для проведения испытаний или осуществляют такой отбор в самом минимальном количестве. В этой связи, по публикациям, архивным данным ДонУГИ, ИГТМ НАН Украины и других организаций проведен анализ и обобщение основных прочностных параметров для различных горных пород, преимущественно осадочных, которые наиболее подвержены влиянию гидрогеологических факторов, в частности размоканию.

Осадочные горные породы обладают слоистостью и анизотропией прочностных свойств. Общей закономерностью всех свойств является зависимость их от степени метаморфизма, поэтому они изменяются с глубиной, наиболее заметные изменения наблюдаются на ранних стадиях метаморфизма. С ростом глубины залегания пород от 200 до 1200 м их прочность увеличивается в 1,5 раза для газовой стадии метаморфизма и на 5-8 % для антрацитов. Предел прочности пород на одноосное сжатие изменяется в широком диапазоне, например, по данным ПО «Артемгеология» прочность песчаников 18-212 МПа, песчаных сланцев 15-182 МПа и глинистых сланцев 8-98 МПа, а по данным ПО «Луганскгеология» соответственно 34-110, 28-62 и 18-40 МПа. Отмечается большее упрочнение с глубиной песчаника по сравнению с глинистыми породами [115]. Иные авторы приводят в своих работах еще более широкий диапазон изменения свойств пород, табл. 2.1 [113]. Для конкретных условий величину разброса прочностных свойств характеризует коэффициент вариации, табл. 2.2.

Таблица 2.1 – Свойства горных пород основных месторождений полезных ископаемых Украины

Руды и породы	Плотность, т/м ³	Пористость, %	Коэффициент поперечных деформаций	Модуль упругости, E ×10 ⁻¹⁰ , Па	Предел прочности, ×10 ⁻⁵ , Па	
					При сжатии σ _{сж}	При растяжении, σ _р
Донецкий бассейн						
Алевролиты	2,58-2,89	4,0-20,0	0,16-0,34	1,5-8,2	250-2125	50-180
Песчаники	2,53-2,80	4,0-30,0	0,13-0,50	3,0-8,0	800-3100	100-400
Сланцы глинистые	2,58-2,82	-	0,15-0,27	1,6-4,5	560-1500	10-170
Аргиллиты	2,45-2,83	5,0-30,0	0,20-0,25	0,6-1,4	70-700	10-70
Криворожский бассейн						
Кварциты железистые	3,10-3,30	2-24	0,12 – 0,37 * 0,18 – 0,29	5,8 – 19,0 7,0 – 17,0	850 – 4000 960 – 4900	175 – 950 –
Кварциты мартитовые	3,37-4,46	0,5-24	0,13 – 0,30 0,20 – 0,41	3,7 – 19,0 3,5 – 11,0	100 – 3700 120 – 3100	10 – 615 –
Кварциты слюдястые тремолитовые	2,30-2,50	2-10	0,15-0,18	0,7-1,0	300-800	-
Амфиболиты	2,60-3,10	6-8	0,20-0,29	2,5-5,5	300-1200	100
Гнейсы амфиболо-биотитовые	2,40-2,90	1-20	0,21-0,26	0,8-2,0	500-900	-
Сланцы слюдясто-хлоритовые	2,70-3,10	1-14	0,13 – 0,37 0,13 – 0,47	3,6 – 7,5 4,6 – 11,0	600 – 1400 350 – 1400	110-255

* В числителе результаты испытаний перпендикулярно слоистости; в знаменателе – параллельно слоистости пород (по И.А. Турчанинову)

Таблица 2.2 – Сводная таблица прочностных и упругих характеристик горных пород Донбасса

Марка углей	Средняя глубина отбора проб, м	Прочность на сжатие, $\sigma_{сж} \times 10^{-5}$, Па	$K_{вар}$, %	Прочность на разрыв вдоль слоя, $\sigma_{р } \times 10^{-5}$, Па	Прочность на разрыв поперек слоя, $\sigma_{р\perp} \times 10^{-5}$, Па	$K_{вар}$, %	Скорости продольных волн		Модуль упругости	
							$v_{ }$	v_{\perp}	$E_{ }$	E_{\perp}
Аргиллиты										
Д	430	280	20	49	26	34	3,42	2,91	1,9	1,3
Г	467	350	21	59	29	42	3,77	3,10	2,4	1,5
Ж	547	430	24	74	31	32	4,24	3,65	3,3	2,2
К	562	410	22	61	30	42	4,47	3,65	3,8	2,2
ОС, Т	722	490	20	82	38	39	4,59	3,64	4,1	2,2
ПА, А	774	550	38	93	37	42	4,84	4,11	4,8	3,0
Алевриты										
Д	560	440	20	72	36	31	3,42	3,09	1,9	1,5
Г	544	530	24	80	38	37	3,86	3,20	2,6	1,6
Ж	657	620	17	94	46	30	4,24	3,65	3,3	2,2
К	563	560	17	92	46	34	4,55	3,67	4,0	2,3
ОС, Т	651	640	20	103	51	28	4,57	3,75	4,0	2,1
ПА, А	737	770	24	130	63	36	4,83	4,14	4,8	3,1
Песчанники										
Д	468	430	41	64	38	45	3,00	2,70	1,4	1,1
Г	531	540	26	78	47	50	3,37	2,96	1,8	1,3
Ж	708	840	20	108	71	39	3,92	3,50	2,7	2,0
К	653	1010	25	137	97	32	4,09	3,83	3,0	2,5
ОС, Т	742	960	23	145	102	31	4,26	3,92	3,3	2,7
ПА, А	830	1310	26	194	143	37	4,82	4,51	4,7	3,9

Примечание: свойства пород по данным Б.П. Овчаренко

Сопротивление сдвигу твердых пород достаточно надежно описывается формулой теории Кулона-Мора, которая отражает линейную зависимость предельного сопротивления сдвигу по поверхности скольжения от нормального давления и аппроксимируется отрезком прямой [119]:

$$\tau = C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.1)$$

где τ - предельное касательное напряжение; C - сцепление; σ_n - нормальное напряжение; φ - угол внутреннего трения. Сцепление для пород Западного Донбасса изменяется от 4 до 10 МПа, среднее значение φ - от 27 до 40°. В общем случае угол внутреннего трения песчаников несколько выше, чем алевролитов и аргиллитов. Эмпирические распределения этих показателей более точно описываются кривой нормального распределения, чем прочностных, по которым они рассчитаны, поэтому можно предположить, что и их коэффициенты вариации находятся в тех же пределах [56]. Поэтому для расчетов параметров устойчивости горных выработок и проведения математического моделирования целесообразно предложить использование усредненных показателей, так как разброс данных при проведении испытаний на прочность часто достигает значений 30 % и более, а влияние трещиноватости или вообще не учитывается, поскольку образцы раскалываются по трещинам при их отборе, или учитывается опосредовано путем снижения прочности трещиноватого прослоя. При этом необходимо учитывать глубину и горно-геологические условия залегания пород, стадию их метаморфизма, а самое главное коэффициент вариации определения того или иного параметра, который характеризует усредненный разброс данных искомого параметра. Коэффициент вариации можно учесть методикой расчета, которая должна предусматривать расчет нагруженности модели при критических параметрах.

Предварительный расчет устойчивости геомеханического объекта на основе обобщенных данных с учетом коэффициентов вариации по всем исходным параметрам обладает даже некоторыми преимуществами, поскольку он позволяет произвести расчеты с заведомо худшими, но не экстремальными условиями по максимальным или минимальным значениям параметров, при этом, не надеясь на высокую представительность отобранных проб, в

особенности в сложных горно-геологических условиях, где диапазон случайного их разброса может быть весьма широким.

При необходимости, для большей достоверности результатов расчетов можно произвести привязку к конкретным горно-геологическим условиям на основе испытаний минимального количества проб либо ограниченного объема геофизических измерений.

2.2.2 Упругие свойства горных пород

Весьма ценные сведения для математического моделирования процесса нагружения породного массива, в частности для обоснования и правильного применения метода итераций, можно получить на основе анализа работ Г.Т. Кирничанского, в которых статистически обработаны результаты испытаний 3120 проб горных пород Западного Донбасса, отличающихся еще и разнообразием по свойствам [56]. Можно считать, что эти данные достаточно объективны, поскольку сам автор измерений не занимался приближенными численными методами.

С увеличением глубины залегания от 100 до 1000 м средняя плотность пород увеличивается от 2020 до 2530 кг/м³, в разрезе и по площади слабых пород локально размещены отдельные слои весьма крепких пород (до 40-60 МПа). При нагрузках менее $(0,7-0,9)\sigma_{сж}$ (предела прочности на одноосное сжатие) у 50 % всех испытанных проб песчаников, 30-35 % алевролитов Западного Донбасса наблюдается линейная зависимость между напряжениями и деформациями. У большинства образцов после первого нагружения фиксируются значительные остаточные деформации, достигающие 30 % и более от суммарных. Угол наклона кривых нагружения для каждого последующего цикла увеличивается по сравнению с предыдущим. Угол наклона аппроксимирующих прямых, соединяющих начало и конец ветвей разгрузки, остается приблизительно постоянным, что свидетельствует о неизменной величине модулей упругости E при последующих циклах нагружения и увеличении напряжений, а степень выпуклости кривых разгрузки характеризует упругое последствие. Примерно 35-45% песчаников, 50-60 % алевролитов и 55-65 % аргиллитов деформируются с мягким отклонением от линейности уже при напряжениях $(0,3-0,4)\sigma_{сж}$. Эти пробы характеризуются большими остаточными деформациями,

которые менее заметно убывают при последующих циклах нагружения. Сравнительно редко встречаются пробы горных пород (2-4 % от всех испытанных), которые деформируются с незначительным упрочнением [56].

Таким образом, в первом приближении при решении упругопластических задач методом последовательных итераций для горных пород Западного Донбасса возможно использование постоянного модуля Юнга, при этом остаточные деформации можно учесть за счет заранее заданных перемещений.

Статические и динамические модули упругости горных пород распределены с большими положительными асимметриями. Следует обратить внимание на большие значения и практическое равенство коэффициентов вариации для модулей Юнга, определенных динамическим и статическим методами (для $E_d - 62\%$ и $E_{cm} - 63\%$) [56]. Очевидно, для пород Западного Донбасса значительный разброс данных объясняется, прежде всего, большой их неоднородностью и в меньшей степени неравноточностью методов испытаний, что с одной стороны является предпосылкой для взаимозамены методов, а с другой стороны однозначно подтверждает необходимость учета коэффициентов вариации. Аномальность распределений объясняется тем, что среди преобладающего количества слабых аргиллитов, алевролитов и песчаников присутствуют, как отмечалось ранее, слои достаточно крепких пород тех же литологических разностей, поэтому необходим и перспективен высокопроизводительный ультразвуковой контроль, который позволяет исследовать практически все слои литологического разреза.

Для определения упругих свойств горных пород применяют статические и динамические методы (ГОСТ 24941-81, ГОСТ 24452-80, ГОСТ 25-156-82). Существенным недостатком статических методов является невозможность их применения для экспресс-определений, так как они требуют тщательной подготовки образцов правильной формы. Динамические методы (ударные, акустические, ультразвуковые) основаны на измерении скоростей упругих волн, по которым (при известной или табличной плотности ρ) вычисляют параметры упругости [20]:

$$\nu = \frac{1 - 2\left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2}; \quad (2.2)$$

$$G = \rho v_s^2; \quad (2.3)$$

$$E = 2G(1 + \nu), \quad (2.4)$$

где v_s и v_p - скорости поперечных и продольных волн; ν , E , G - коэффициент Пуассона, динамические модули Юнга и сдвига.

Когда скорости сдвиговых волн из-за отсутствия аппаратуры или физических и методических сложностей их выделения на фоне продольных волн не определяются, модуль Юнга рассчитывают по формуле [56]:

$$E = \rho v_p^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}, \quad (2.5)$$

при этом для ν принимают табличные значения.

Для изверженных пород скорость упругих волн составляет 3,5-7,0 км/с, осадочных – 1,5-4,5 км/с, в плотных известняках – 6-7 км/с. С ростом сжимающих нагрузок скорости упругих волн растут. Скорость распространения упругих колебаний зависит от пористости и трещиноватости пород, причем как удельные электрические сопротивления, так и скорости распространения упругих колебаний с увеличением пористости и трещиноватости уменьшаются (за исключением случая, когда трещины заполнены воздухом, что приводит к увеличению сопротивления). Соответствующие корреляционные зависимости между искомыми и акустическими параметрами представлены в прил. А.2 [56].

2.2.3 Фильтрационные свойства горных пород и грунта

Даже если основные механические характеристики образцов горных пород, слагающие массивы различных типов, близки между собой, устойчивость породного массива может быть различной. На нее влияет слоистость, последовательность напластования, анизотропия, трещиноватость, гидрогеология и другие факторы. Породы нижних слоев осадочных толщ могут быть подвержены процессам окаменения за счет их уплотнения, обезвоживания и цементации. Изменчивые формы и невыдержанные чередования

пород с различными свойствами обуславливают неравномерность распределения напряжений, резко усиливающуюся при проведении выработок.

Фильтрация – движение жидкости (воды, нефти) или газа (воздуха, природного газа) сквозь пористую среду [105]. По своей физической сути она адекватна понятию просачивания грунтовых вод, т.е. их медленному движению в пористой среде. Грунт рассматривают как единую систему, состоящую из минеральных и коллоидных частиц, которые содержат воду с растворенными солями, и структуры газообразной фазы (воздух, пары воды). Свойства обычных грунтов являются промежуточными между свойствами песков и глин. Грунты, у которых содержание глинистых частиц превышает 60 % (по объему) от общего количества частиц, называют тяжелыми глинами, если количество глинистых частиц колеблется между 30 и 60 % - называют глинами. Суглинки (тяжелые, средние и легкие) содержат от 10 до 30 % глинистых частиц, супеси (тяжелые и легкие) – от 3 до 10 % и пески – до 3 % глинистых частиц [84]. Сыпучие горные породы имеют низкую влагоемкость и высокую проницаемость, следовательно, имеют склонность к проявлению плавунных свойств и фильтрационных деформаций.

В строительной механике грунты классифицируют по размерам частиц. Каменистую часть почвы составляют частицы более 3 мм; частицы от 0,01 до 3 мм называют «физическим» песком, частицы от 0,0001 до 0,001 – илом, мельче 0,0001 мм – коллоидными частицами. Различают следующие формы воды в грунтах: 1) водяной пар; 2) гигроскопическую воду; 3) пленочную воду; 4) гравитационную воду; 5) воду в твердом состоянии; 6) кристаллическую воду и 7) химически связанную воду [84].

Пластические (глинистые) горные породы в процессе нагружения могут приобретать любую физически возможную плотность, переходя от текучего в пластичное и твердое состояние. Зависимость деформаций от напряжений носит резко выраженный нелинейный характер уже в небольших диапазонах нагружения. Деформации глинистых пород обычно необратимы. Для них характерны низкая прочность, высокая сжимаемость, низкая проницаемость и большая влагоемкость. Наличие в глинистых породах свободной воды влечет за собой существенное изменение их механических свойств и оказывает решающее влияние на характер сжимаемости. Водонасыщенная горная порода может сжиматься

лишь при оттоке воды из пор и, таким образом, избыточное поровое давление компенсирует часть сжимающей нагрузки, поэтому в них могут возникать весьма высокие напряжения. Это предположение подтверждается расчетами, которые выполнены в данной работе (раздел 4.2) методом конечных элементов, произвести экспериментальные измерения напряжений в таких породах в условиях полного водонасыщения практически не представляется возможным.

Для грунтов (пески, глины, торфяные грунты, мелкотрещиноватые горные породы, в том числе скальные) имеет место линейная зависимость скорости фильтрации от пьезометрического уклона (закон Дарси) [84]:

$$v_{\phi} = K_{\phi} J, \quad (2.6)$$

где K_{ϕ} - коэффициент фильтрации; J - градиент напора:

$$J = -\frac{dh}{ds}. \quad (2.7)$$

Для простейших схем фильтрации градиент напора (гидравлический уклон) равен отношению разности напоров H к длине пути фильтрации S :

$$v_{\phi} = K_{\phi} \frac{H}{S}. \quad (2.8)$$

Механические свойства мягких глинистых пород существенно зависят от их слоистости, которая предопределяет анизотропию этих свойств. В практике горного дела приходится сталкиваться с переуплотненными глинистыми породами (аргиллиты, алевролиты). Прочность переуплотненных пластических горных пород имеет значительный разброс. Поэтому при решении задач устойчивости необходимо учитывать не пиковую, а остаточную прочность.

В плотных глинах и тяжелых суглинках вода содержится в молекулярно связанном виде, а явление фильтрации возникает лишь тогда, когда величина градиента напора превышает некоторое значение I_0 , называемое начальным градиентом [84]:

$$v_{\phi} = -K_{\phi} \left(\frac{dh}{ds} + I_0 \right) = K_{\phi} (J - I_0). \quad (2.9)$$

Для очень плотных глин I_0 может достигать значений, равных 20-30.

Основные факторы, влияющие на изменение устойчивости массива, его прочностных и деформационных свойств: величина и направление воздействующей нагрузки, вид и длительность нагружения, влажность и температура среды, размокаемость пород. Они оказывают влияние в зависимости от типа цемента на механические характеристики горных пород (пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение, сцепление, модули упругости и деформации, скорости распространения волн, параметры ползучести, разрыхляемость, трещиноватость), плотностные (удельный и объемный вес, плотность, пористость), тепловые (теплопроводность, теплоемкость), электромагнитные (удельное электросопротивление, диэлектрическую проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь) и другие. В зависимости от интенсивности внешнего воздействия различные физические свойства изменяются в большей или меньшей степени. Так как при водонасыщении произвести учет всех факторов невозможно, то очевидно, что необходима оценка и определение наиболее влияющих параметров.

Наличие воды в порах горных пород в количестве, близком к водонасыщению, кардинально меняет ее поведение. Влияние водонасыщения сказывается на изменении характера связи между частицами пород, при этом у твердых рассыпчатых пород при насыщении водой силы сцепления резко снижаются или исчезают, а у скальных, полускальных или осадочных цельных пород снижаются силы сцепления между блоками.

Водонасыщенные породы представляют собой дисперсные тела, физико-механические характеристики которых при решении задач геомеханики необходимо учитывать в отдельности, с достаточной для расчетов точностью. Однако при этом установлены и общие закономерности как в чисто физическом, так и в методическом направлениях. Горные породы, которые сформированы на глинистом цементе, в воде размокают полностью за 20 суток и менее, песчаники снижают свою прочность примерно в 1,5 раза.

Скорость и форму размокания пород в воде определяют путем помещения образцов в дистиллированную воду и характеризуют временем, в течение которого разрушаются образцы. Следуя А.П. Максимову и О.С. Алферову, приняты следующие пять форм размокания пород [68]:

1. Образцы не разрушаются, их прочность снижается незначительно, породы характеризуются большой начальной прочностью, крупнослоистой текстурой.

2. Образцы не разрушаются, но при приложении незначительной нагрузки, часто от собственного веса, распадаются по плоскостям напластований, в направлении, перпендикулярном слоистости, сохраняют высокую прочность. Породы этого типа характеризуются слоистой текстурой.

3. Образцы расслаиваются на отдельные толщины 1-2 см, при приложении нагрузки разделяются на более тонкие, перпендикулярно наслоению также значительно теряют прочность.

4. Образцы расслаиваются на отдельные до 1 см как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Поверхность потери прочности прогрессирует с течением времени.

5. Образцы разрушаются совершенно, превращаясь в мелкочешуйчатую или бесформенную массу.

Изучение образцов горных пород при их увлажнении проводилось с применением дистиллированной воды, поскольку «шахтная вода», взятая в разных выработках даже одних и тех же шахт, имеет резко отличную минерализацию. Кроме того, в ней резко изменяется содержание растворенных кислот и щелочей, поэтому ее применение допустимо только при анализе результатов для решения конкретных задач в пределах одной выработки, горизонта, реже шахты. Снижение прочности водонасыщенных пород в зависимости от изначальной прочности пород в их естественном состоянии для прочных песчаников и известняков происходит по корреляционной зависимости:

$$\sigma_{сжс}^w = 1,924 + 0,67\sigma_{сжс}, \text{ (МПа)}, \quad (2.10)$$

при коэффициенте корреляции $R = 0,61$; погрешности $SR = 37,5$ МПа.

Глинистые породы размокают полностью. Если принять для области сжатия (замкнутого объема породного массива в зоне влияния выработки) остаточную прочность водонасыщенных глинистых пород равной аналогично разрушенным породам $\sigma_{сжс}/3$, то обобщенная корреляционная зависимость примет вид:

$$\sigma_{сжс}^w = -2,49 + 0,785\sigma_{сжс}, \text{ (МПа)}, \quad (2.11)$$

при коэффициенте корреляции $R=0,76$; погрешности $SR=30,4$ МПа.

2.3 Трещиноватость как определяющий фактор изменения естественных фильтрационных процессов

Горные породы представляют собой многокомпонентные системы, включающие твердую, жидкую и газообразную фазы, которые по прочностным и деформационным свойствам разделяются на твердые, сыпучие и пластические в зависимости от породообразующих минералов.

Способность горных пород деформироваться во времени при неизменной внешней нагрузке проявляется в виде ползучести, релаксации напряжений и характеризуется величиной длительной прочности. При одномерном сжатии (компрессии) пород ползучесть всегда носит неустановившийся затухающий характер. Хрупкие контакты скелета необратимо нарушаются при малых деформациях. Одновременно начинается нарушение вязких контактов, при этом порода проходит две стадии деформирования: стадию неустановившейся ползучести, на которой заканчивается переориентация частиц и полностью разрушаются хрупкие контакты, а суммарная прочность новых контактов возрастает; стадию установившейся ползучести, на которой скорость деформации почти постоянна [119].

Увеличение нагрузки выше предельных напряжений приводит к прорастанию внутренних дефектов (трещиноватости) и при нарушении сцепления деформирование приобретает ярко выраженный нелинейный характер. В запредельной области происходит разрушение образцов со стабилизацией сопротивляемости на уровне остаточной прочности. Деформации несвязных пород протекают мгновенно, они почти всегда частично необратимы и связь их с нагрузками оказывается линейной в значительно более узких интервалах нагружения. Деформации раздельно-зернистых пород возрастают при динамическом нагружении и полностью определяются нагрузкой, так как они сложены химически прочными минералами. При первичном гидростатическом сжатии накапливаются пластические деформации уплотнения, при этом коэффициент пористости изменяется незначительно. Характерным свойством этих пород является разрыхляемость даже при небольшом сдвиге. В этой связи для горных пород в областях сжатия предпочтение отдается теории Кулона-Мора, а в областях растяжения (провисающих обнаженных

массивов) – теории растягивающих напряжений, т.е. прочности на разрыв (см. раздел 4.1).

Трещиноватый массив горных пород можно рассматривать как некогда монолитный и подвергнутый до определенной степени запредельному деформированию, график которого находится в промежутке между предельной и остаточной прочностью. На глубине в породном массиве трещины могут быть плотно сомкнуты и в их плоскостях может сохраняться значительное сцепление – до 20-30% от величины сцепления в сплошном теле [113]. Трещиноватость вызывает общее снижение прочности и рост проницаемости, а также усиливает механическую и фильтрационную анизотропию горного массива. Твердые горные породы достаточно устойчивы к действию подземных вод, если в них отсутствуют растворимые минералы, однако глинистые трещиноватые породы в воде размокают полностью.

Трещиноватость горного массива позволяет представить его строение в виде блочной структуры. Механизм деформирования массива заключается в деформировании самих блоков и, кроме того, в их взаимном скольжении и вращении. Оценка трещиноватости производится визуальными способами с замером расстояний между параллельными системами трещин и определением частоты их расположения. В практике используются коэффициенты структурного ослабления, характеризующие степень снижения показателей соответствующих механических свойств. Для мелкоблоковой трещиноватости этот коэффициент составляет 0,1 – 0,2, для нарушенных пород - 0,01 – 0,02, для микротрещин - близок к 0,9 [119].

Для учета трещиноватости в приближенных расчетных методах теории упругости нагружение математических моделей необходимо производить вплоть до разрушения элементов, фактически до начала зарождения трещин, и этим приемом уже частично учитывается трещиноватость, будут установлены области зарождения первичных техногенных трещин. Второй путь учета трещиноватости - заложение в модель параметров остаточной прочности, определенной расчетным путем по коэффициентам структурного ослабления или экспериментально в режиме запредельного деформирования на жестких испытательных системах [57].

2.4 Натурные исследования геомеханических процессов по изменению электропроводящих свойств геоматериалов

2.4.1 Методика электрометрического контроля влагосодержащих горных пород

Электрическое сопротивление минералов, из которых состоит грунт или порода, значительно выше, чем сопротивление рассолов, поэтому общее сопротивление определяется, в первую очередь, степенью влагонасыщения. Электрометрические измерения в массиве базируются на методах полевой геофизики, которые позволяют учесть влияние приэлектродных сопротивлений и определить изменение кажущегося сопротивления по глубине (геоэлектрический разрез). Элементы методики электрометрического метода контроля влагосодержащих пород отрабатывались при комплексном геофизическом изучении деформационных и геофильтрационных процессов вокруг вертикальных стволов, подготовительных и очистных выработок в различных районах Донбасса, на рудниках ПО «Полиминерал», а также при контроле гидротехнических сооружений, в частности, на Ивановском групповом водопроводе, отличающемся особым разнообразием условий и, в то же время, доступностью для проведения измерений, мостовых опор, плотин [95, 127]. Шахтные экспериментальные измерения выполнены сотрудниками отдела механики горных пород ИГТМ НАН Украины.

Из электрометрических методов в работе используются варианты продольного симметричного профилирования и вертикального электрического зондирования на переменном токе низкой частоты, а также профилирования с помощью шпуров и скважин. Схемы расположения электродов четырехэлектродной установки представлены на рисунке 2.1. Ток в питающей линии – порядка 0,1; 1; 10 мА. База AB – от 0,6 до 60 м; база MN – от 0,2 до 20 м. Кажущееся сопротивление R_k рассчитывают по формуле [72]:

$$\Delta R_k = \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}, \quad (2.12)$$

где ΔU_{MN} - падение напряжения на электродах MN , I_{AB} - ток в цепи AB . Кажущееся удельное сопротивление грунта или породы на отрезке MN при представлении грунтовой толщи в виде бесконечного

однородного полупространства для симметричной и несимметричной установок определяется из выражений [72]:

$$\rho_k = \frac{\Delta R_k \pi \cdot AM(AM + MN)}{MN} C; \quad (2.13)$$

$$\rho_k = \frac{\Delta R_k 2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AM + MN} - \frac{1}{MN + NB} + \frac{1}{NB}} C. \quad (2.14)$$

Для выполнения электрометрии была применена портативная аппаратура ШИИС-3М1 [95]. Рабочая частота составляет 22,5 Гц, приведенная приборная погрешность не превышает 2%. Опыт диагностики показывает, что влагонасыщенным следует считать участок грунта, на котором удельное кажущееся сопротивление не превышает 10 Ом×м. Величину коэффициента C в выражениях 2.13, 2.14 для определения значения кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k выбирают, исходя из данных таблицы 4.1 руководства [95]. При шпуровом зондировании $C=2$, при симметричном профилировании почвы выработок $C=1$.

Наиболее информативным вариантом электрометрии, позволяющим оценить напряженно-деформированное состояние в приконтурной зоне породного массива, является шпуровое зондирование. Диаметр шпура в зависимости от бурового оборудования выбирается в пределах от 42 до 59 мм, длина шпура - от 2 до 20 м. Разнос питающих электродов при профилировании порядка 0,5 м. Его увеличение повышает глубину зондирования массива в окрестности шпура, однако одновременно увеличивает размер неконтролируемых зон возле устья и забоя шпура [95].

Подготовка проведения экспериментальных работ включает: выбор исследуемого сечения в средней части литологически однородного породного слоя и определение высотной отметки; разметку точек бурения шпуров в направлении сторон горизонта; бурение шпуров с последующей продувкой сжатым воздухом. С целью повышения достоверности измерения проводятся дважды: при перемещении зонда к забою шпура, а затем при обратном ходе. Шаг профиля выбирают равным 0,1 м, часто равным разнесу приемных электродов. После выполнения цикла измерений по шпуру непосредственно на месте сравнивают значения измеряемого параметра при прямом и обратном ходе для каждой из точек профиля. При разнице значений, заведомо превышающей погрешность

измерений, измерения проводят повторно [95]. Характерные схемы измерений представлены на рис. 2.1.

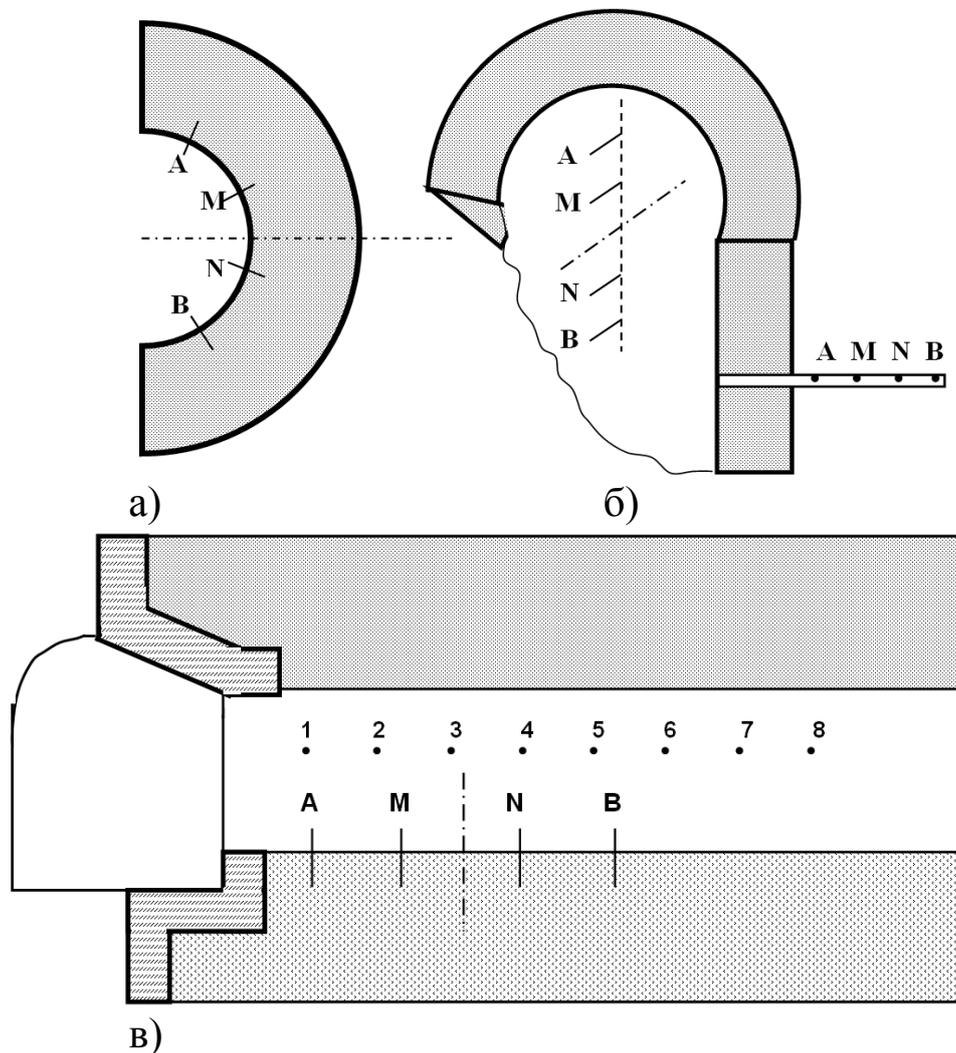


Рисунок 2.1 – Схемы проведения электрометрических измерений:

а) в горизонтальной плоскости по контуру ствола; б) в вертикальной плоскости по контуру ствола и с помощью профилирования шпуров; в) профилирование и зондирование вдоль выработки без бурения шпуров и контроль с помощью шпуров (1, 2, 3 и т. д.)

Без проведения буровых работ измерения проводят на незакрепленных участках породного массива: в призабойной части горной выработки или ствола, в почве выработки для ориентировочной оценки зональности и асимметрии свойств породного массива; в примыкающих к стволу выработках для оценки зоны влияния ствола. Длину АВ питающей линии для различных схем установки электродов в стволах удобно выбрать равной от 1,5 м до 6 м, в выработках – рациональный размер питающей линии составляет от 6 м до 12 м.

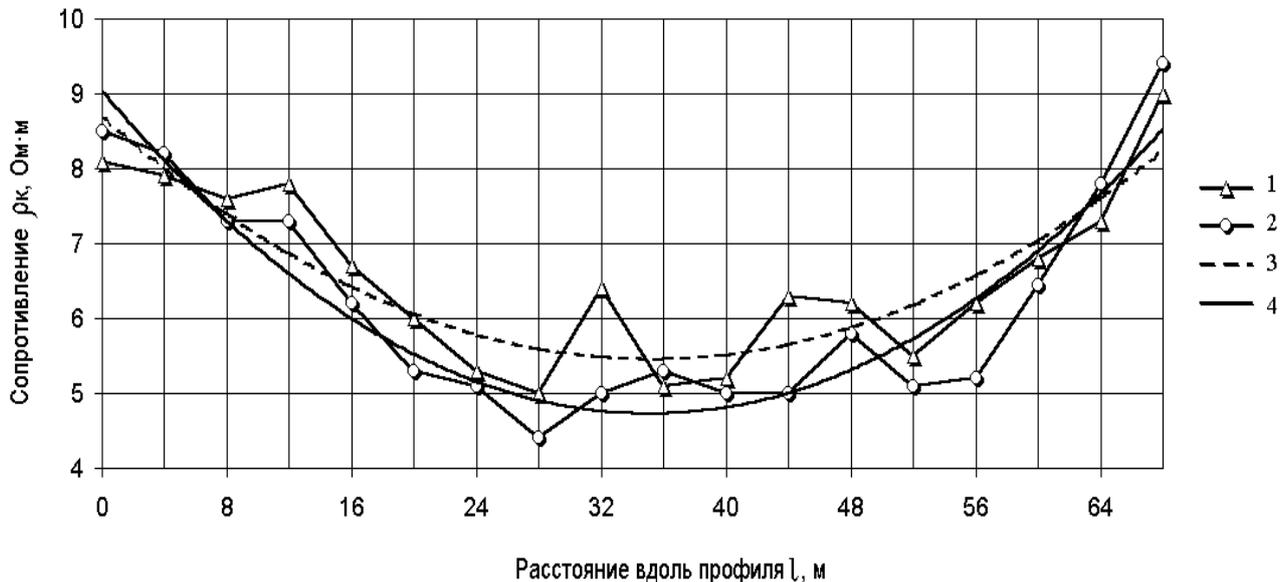
При наличии технической возможности, с целью повышения информативности измерений, их следует проводить по одному и тому же профилю с использованием линий различных геометрических размеров. В пределах исследуемого профиля геометрические характеристики (кривизна поверхности, поперечное сечение примыкающей выработки и т.п.) должны быть примерно одинаковыми. С целью максимального уменьшения влияния заземленных металлоконструкций профиль проводят на наибольшем удалении от них. Находящиеся поблизости электроустановки по возможности необходимо обесточить на период измерений, а проходческое оборудование следует удалить. По результатам электрометрической диагностики готовят обобщающую текстовую записку, которая является составной частью материалов работы комплексной комиссии [95].

2.4.2 Исследование фильтрационных процессов и трещиноватости массива методами электрометрии

Как известно, основными факторами, определяющими величину электросопротивления пород, являются: сопротивление непосредственно грунта, пород или искусственных слагающих материалов; сопротивление насыщающих грунтовых вод; пористость, трещиноватость или разрыхленность массива. При этом влажность грунта и его трещиноватость чаще всего изменяют сопротивление пород в противоположных направлениях: влажность снижает сопротивление, а трещиноватость его повышает. Поскольку уровень воды в грунте или породе определяется депрессионной кривой, которая характеризуется непрерывностью и плавными переходами, то и на кривых электропрофилирования или вертикального электрического зондирования влияние изменения уровня грунтовых вод более плавное, чем резкие изменения электросопротивления при наличии трещин в породе или металла в грунте (рис. 2.2).

Результаты измерений электрического сопротивления по профилям на Ивановском групповом водопроводе, частично представленные на рис. 2.2 и отражающие изменение влагонасыщения грунта, позволили выявить значительно увлажненные участки вблизи водосодержащих отстойников, зоны фильтрации воды в различных направлениях, расширение зоны

увлажнения, и, в конечном итоге, локализовать и устранить скрытые прорывы воды в отстойнике.

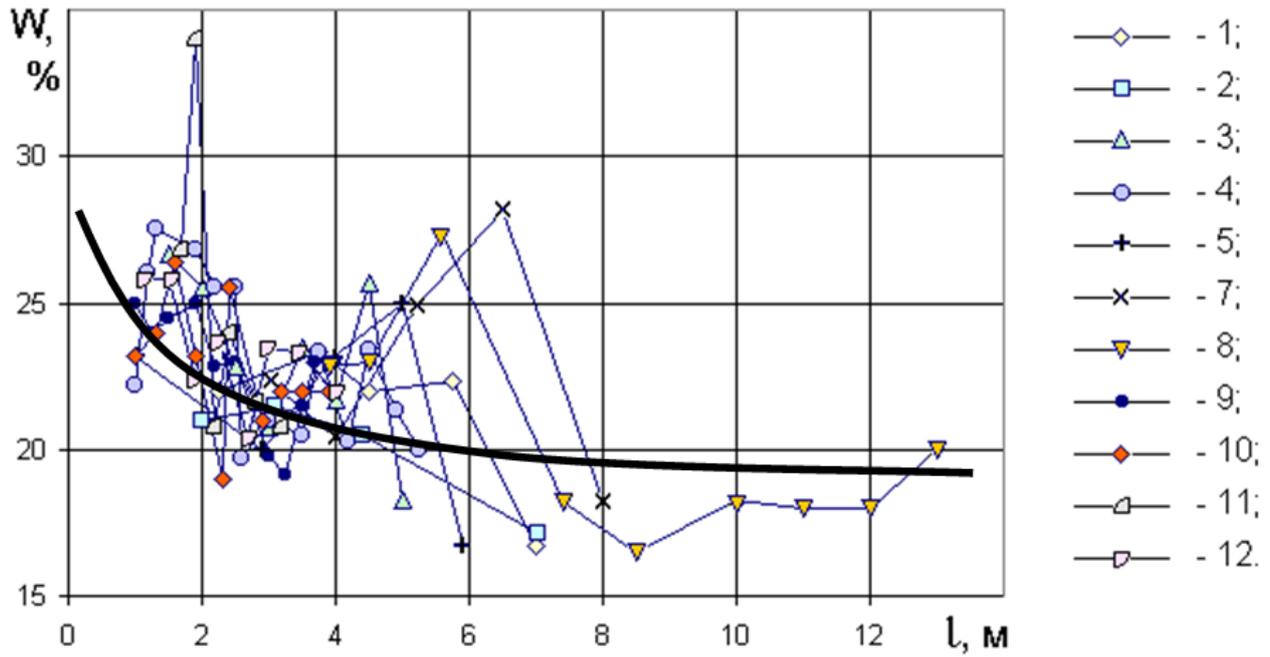


1 – до наполнения водой; 2 – после наполнения водой; 3 – параболическая модель для графика 1; ($\rho_k = 0,003l^2 - 0,18l + 8,7$); 4 – параболическая модель для графика 2 ($\rho_k = 0,004l^2 - 0,25l + 9,0$)

Рисунок 2.2 – Зависимость изменения электросопротивления ρ_k под воздействием водонасыщения при длительном подтоплении

Эти результаты объяснили изменения уровня грунтовых вод, влажности и плотности грунта, рис. 2.3 и 2.4. Установлено, что влагонасыщение грунта в зависимости от глубины происходит по гиперболической закономерности, тогда как плотность сначала увеличивается, а затем снижается по параболической зависимости, что связано с просадочными явлениями в грунте и его уплотнении в верхнем влагосодержащем слое.

При измерениях следует также учитывать возможность наличия массивных металлических предметов в грунтовой толще, которые по своему воздействию на результаты измерения могут быть адекватными зонам увлажнения, погрешность в пределах 20 % вносят и погодные условия. При интерпретации имеет значение не только абсолютное значение информативного параметра в той или иной точке, но и общий характер его изменения в соседних точках, а также на соседних профилях (рис. 2.5).



1, 2, ..., 12 – номера измерительных скважин

Рисунок 2.3 – Зависимость изменения влажности W от глубины при длительных подтоплениях ($W=20,1+6,5/l$)

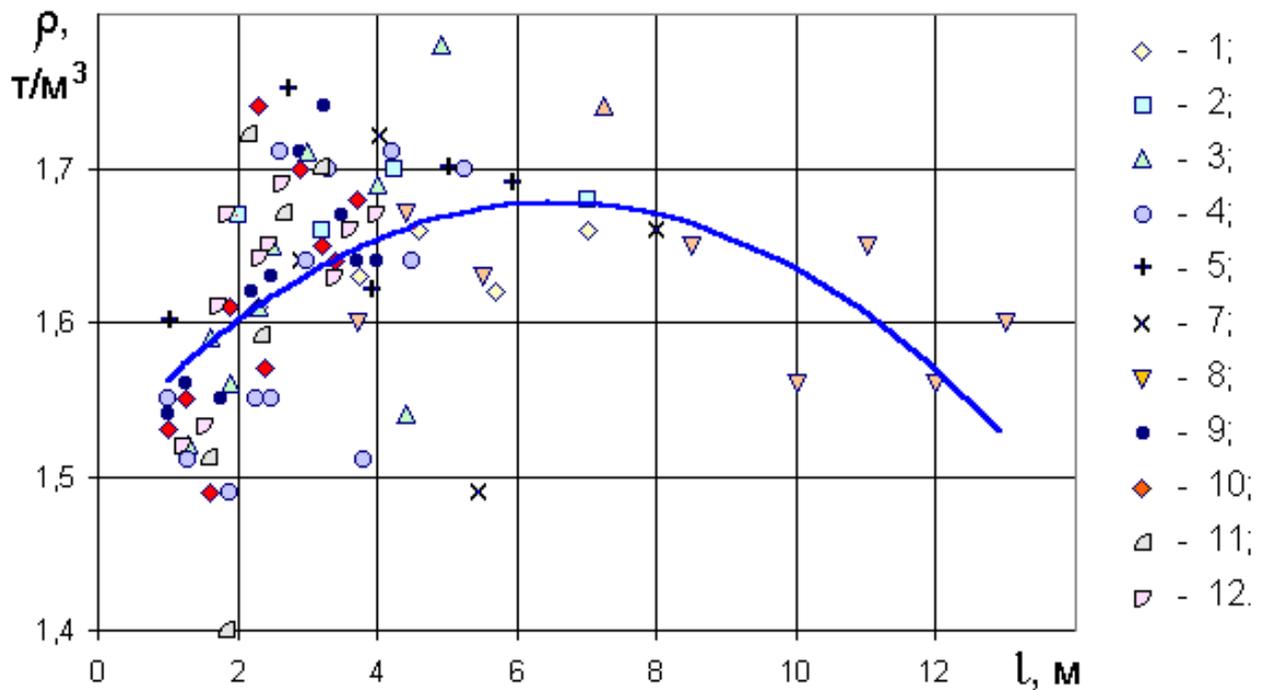


Рисунок 2.4 – Изменение плотности грунта с глубиной при длительных подтоплениях вокруг отстойников ($\rho=1,52+0,05l-0,0037l^2$)

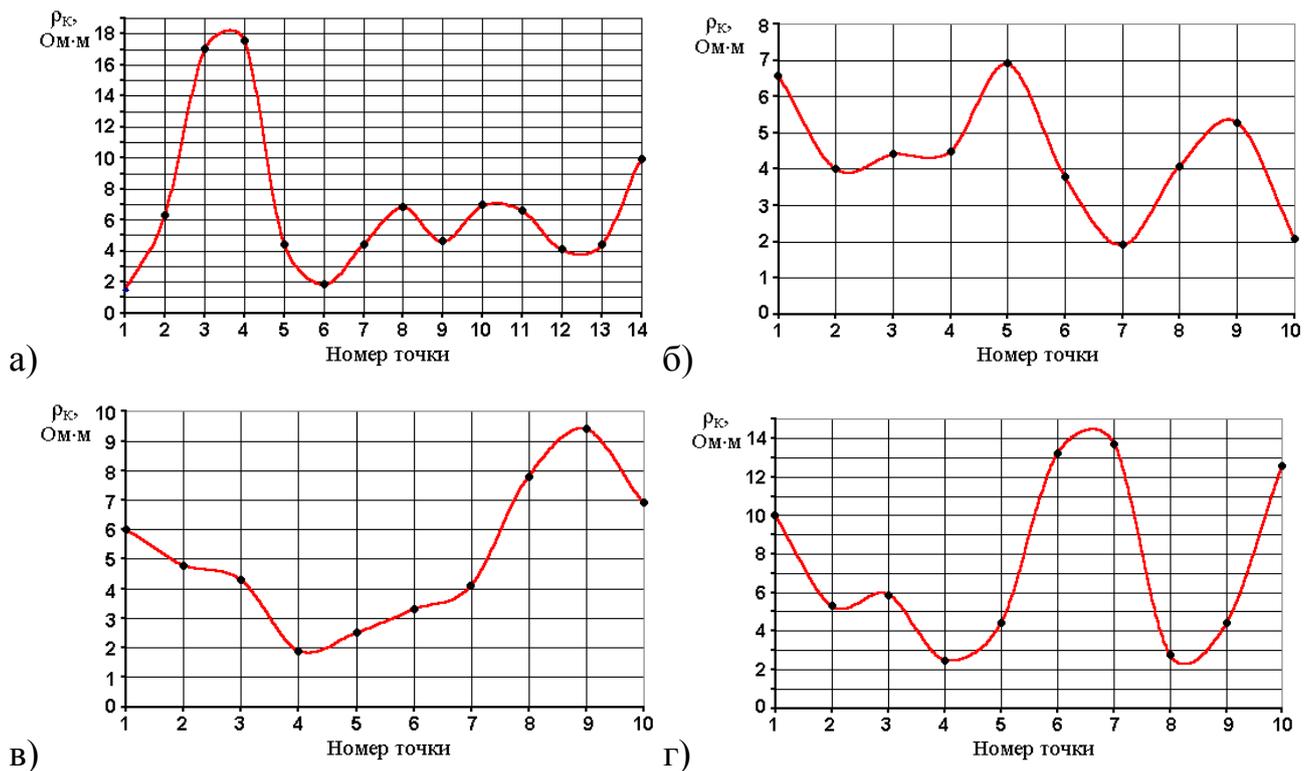


Рисунок 2.5 – Профилирование грунта вокруг мостовой опоры завода им. Петровского: а-г – профили 1-4, соответственно

Например, резкая аномалия в изолированной точке может быть вызвана наличием под слоем земли металлических предметов и не иметь никакого отношения к геофильтрационным процессам. Трассировку геофильтрационных потоков можно осуществить выделением аномальных зон по профилям, анализом возможных причин их возникновения, а также учетом дополнительной информации, полученной в процессе использования других методов при комплексном обследовании, но наиболее эффективным при этом является метод картирования (рис. 2.6).

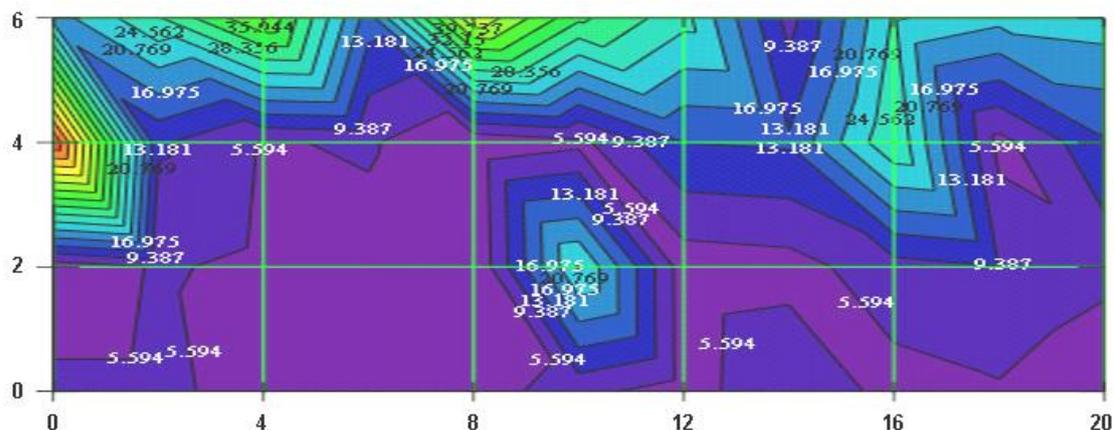


Рисунок 2.6 – Карта электросопротивления грунтового и насыпного массивов вблизи опоры №3 железнодорожного моста завода им. Петровского

Из-за высокой насыщенности контролируемой грунтовой площадки разнообразными техническими и технологическими объектами (два моста, железная дорога, автомобильная дорога, трамвайные пути и др.) совершенно равномерную сетку измерений создать не удалось, но к этому стремились и в первом приближении ее можно считать равномерной, рис. 2.7. По результатам картирования четко зафиксирован сильно увлажненный участок в зоне от 4 до 8 м, который примыкает к колонне №3 с трещинами (рис. 2.6).

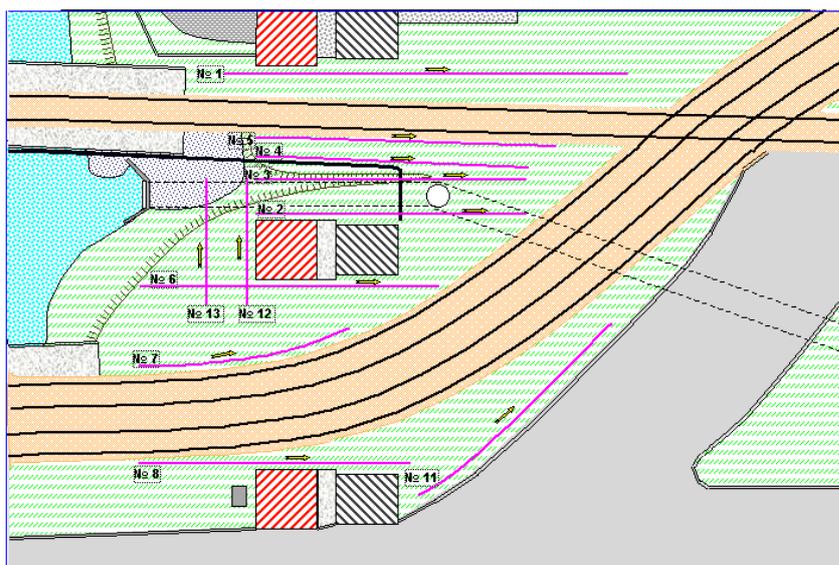
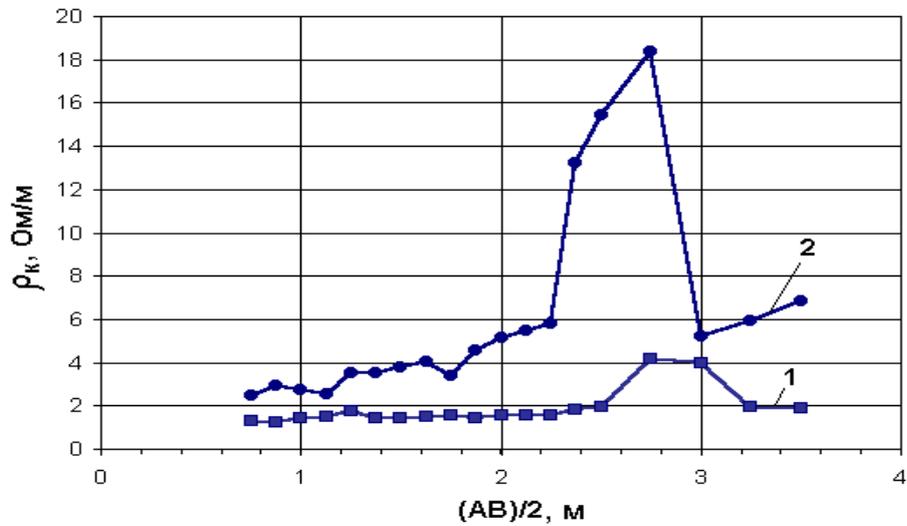


Рисунок 2.7 – Схема площадки электрометрического контроля с относительно равномерным расположением профилей электрометрии

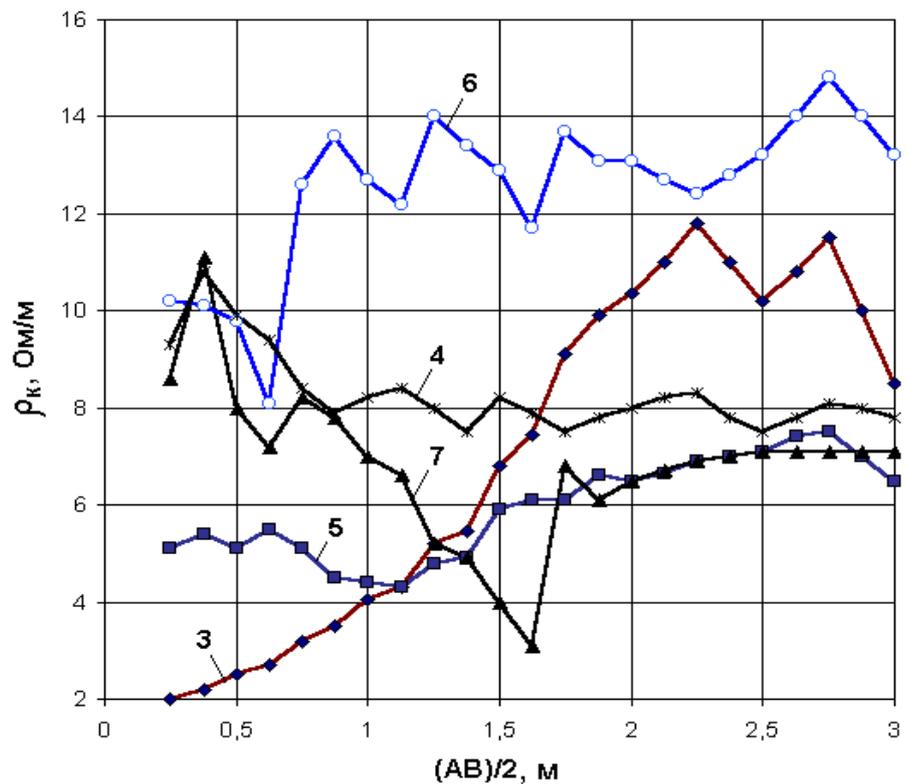
Трещиноватость разрывает сплошность массива, поэтому трещины выделяются резким изменением кажущегося электрического сопротивления (рис. 2.8.).

Глубина трещин относительно контура выработки остается постоянной, поэтому при возрастании нагрузок увеличивается расслоение и изменяется величина электросопротивления, но не изменяется местоположение этих пиков (рис. 2.8, а). Величина электросопротивления резко возрастает в кровле выработок, что свидетельствует о наличии интенсивных процессов расслоения массива пород (рис. 2.8, б). При прохождении выработок по подработанным и нарушенным породам, на графиках изменения электросопротивления отмечаются многочисленные перепады (пики), которые вызваны повышенной трещиноватостью массива, однако расположение зон повышенных и пониженных напряжений остается

постоянным. Наиболее наглядно результаты электрометрических исследований можно представить на объемной карте (рис. 2.9).



а)



б)

1 – почва выработки в зоне среднего давления (ПК-85); 2 – почва выработки в зоне большого давления (ПК-92, развилка выработок); 3 – почва выработки вблизи развилки; 4 – кровля; 5 – бок со стороны массива; 6 – бок со стороны развилки; 7 – верхний угол (3, 4, 5, 6, 7 – ВЭЗ в одном сечении выработки)

Рисунок 2.8 – Исследование трещиноватости массива горных пород методом вертикального электрометрического зондирования пород кваршлага № 600 (ПО «Полиминерал»), пройденного комбайном

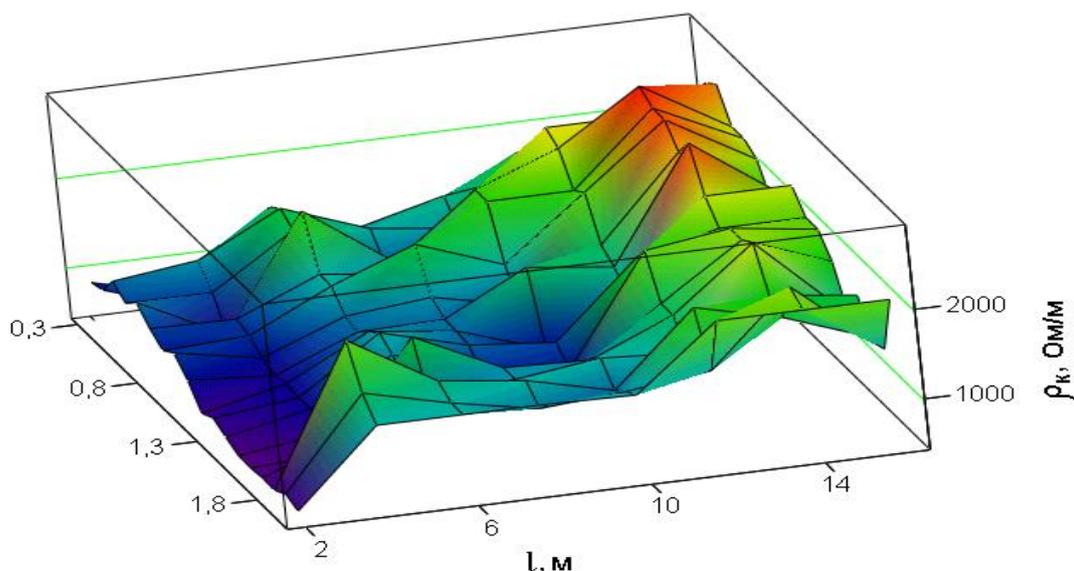


Рисунок 2.9 – Объемная карта зональности кажущегося электрического сопротивления в массиве горных пород на участке сопряжения ствола и горизонтальной выработки (шахта «Прогресс», глубина 900 м)

Таким образом, проведенные исследования позволили установить высокую степень информативности электрометрического метода для экспресс-диагностики фильтрационных и деформационных процессов в массиве осадочных пород.

2.5 Выводы по разделу

Для расчета параметров устойчивости горных выработок предложено использовать усредненные показатели физико-механических свойств горных пород с учетом глубины, условий залегания, стадии метаморфизма, а самое главное коэффициентов вариации, которые характеризуют усредненный разброс параметров. Рационально использовать табличные показатели физико-механических свойств, а неблагоприятные горно-геологические условия залегания пород учитывать методикой расчета, предусматривающей расчет нагруженности модели при усредненных критических с учетом коэффициентов вариации, но не экстремальных параметрах ее свойств. При решении упругопластических задач методом итераций для осадочных пород рационально использовать постоянный модуль Юнга, при этом остаточные деформации следует учесть за счет заранее заданных дополнительных перемещений.

Влагонасыщение грунта в зависимости от глубины происходит по гиперболической зависимости, тогда как его плотность сначала

увеличивается, а затем снижается по параболической зависимости, что связано с просадочными явлениями в верхнем влагосодержащем слое. Прочность осадочных пород при водонасыщении снижается и находится в линейной зависимости от начальной, глинистые породы размокают полностью, поэтому в расчетных методах их остаточную прочность в первом приближении можно принять за прочность полностью разрушенных пород.

В плотных осадочных горных породах вода содержится в молекулярно связанном виде и явление фильтрации возникает лишь тогда, когда величина градиента напора превышает некоторое значение I_0 , называемое начальным градиентом, поэтому решения фильтрационных задач методом конечных элементов, которые с достаточно высокой точностью реализованы для грунтов, для горных пород требуют новых подходов (см. раздел 4).

Для учета трещиноватости в приближенных расчетных методах нагружение математической модели необходимо производить вплоть до разрушения элементов, этим приемом уже частично учитывается трещиноватость, поскольку будут установлены области зарождения первичных техногенных трещин. Второй путь учета трещиноватости – заложение в модель параметров остаточной прочности, определенной в режиме запредельного деформирования.

Среди методов геоконтроля наиболее информативными и экономичными являются геофизические, в частности электрометрические методы определения трещиноватости и влагонасыщенности пород. Длину питающей линии для установки электродов в стволах удобно выбрать равной от 1,5 до 6 м, в выработках – размер питающей линии лежит в пределах от 6 до 12 м.

Естественная влажность горных пород и их трещиноватость изменяют электросопротивление пород в противоположных направлениях: влажность снижает сопротивление, а трещиноватость его повышает. Поскольку уровень воды в грунте или породе определяется депрессионной кривой, которая характеризуется непрерывностью и монотонностью, то и изменение электросопротивления от влияния воды более плавное, в отличие от резких изменений его при переходе трещин, изменение электросопротивления при повышении напряжений зависит от первых двух составляющих и, как правило, монотонно повышается, но при этом доминирующим является влияние трещиноватости.

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПЕРСОНАЛЬНОЙ ЭВМ

3.1 Современные методы ввода аналоговых сигналов и средства оценки трещиноватости и анизотропных свойств горных пород на основе анализа их спектров

При проведении исследований, контроле и управлении процессами горного производства эффективным и необходимым инструментом является персональная ЭВМ, на которую возлагаются функции: выполнения громоздких вычислений и символьных преобразований; статистической обработки данных; программной реализации регрессионных, структурных, пространственных физических, потенциальных и других моделей; расчета напряженного состояния породного массива; картирования, построения графиков и таблиц, визуализации и преобразования форм представления больших массивов данных; архивирования и хранения исходных геофизических, геомеханических и технологических данных, а также результатов расчетов. Применение компьютера для задач мониторинга, обработки и анализа сигналов является более целесообразным, чем использование аналоговых фоторегистраторов, самописцев, запоминающих осциллографов и анализаторов спектра.

Для ввода в ЭВМ аналоговых электрических и акустических сигналов сложной формы предложено использовать звуковую карту общего назначения. Хотя точность представления сигналов в данном случае априорно более высокая, чем при использовании аналоговых регистраторов, обязательной является первоначальная поверка характеристик устройства с помощью тестовых сигналов, поскольку звуковые карты общего назначения не аттестуются как измерительные приборы.

Анализ сигнала начинается с визуального осмотра его осциллограммы. При этом используются функции изменения масштабов графика по амплитуде и времени. В случае максимального увеличения графика по амплитуде, разрешающая способность по оси ординат составляет 0,01 %. При максимальном увеличении осциллограммы сигнала во времени разрешающая способность по оси абсцисс составляет $0,5 \cdot 10^{-4}$ с, однако быстродействие современных компьютеров постоянно повышается, поэтому

повышается и возможная частота контроля. При визуальном осмотре осциллограммы, прежде всего, необходимо выявить возможные ошибки, допущенные при записи сигнала. Наиболее точными можно считать результаты записи, при которой максимальная амплитуда сигнала находится в верхней трети шкалы аналого-цифрового преобразователя, однако не превышает 95 %. В случае, если максимальная амплитуда сигнала не перекрывает одной трети шкалы АЦП, динамический диапазон сужается, поэтому рекомендуется повторить запись с большим коэффициентом предварительного усиления. Если повторная запись невозможна, а также в случае анализа множества осциллограмм, для обеспечения сопоставимости результатов рекомендуется выполнить нормализацию всей группы рассматриваемых графиков. За базовую величину ординаты можно принять максимальную амплитуду сигнала в осциллограмме или корень среднеквадратичного отклонения амплитуд (Root Mean Square, RMS), характеризующий энергетическую интенсивность сигнала. При этом нормализация будет выполняться по формулам

$$u_{iA}^* = \frac{u_i}{u_{\max}} k ; \quad u_{iRMS}^* = \frac{u_i}{u_{RMS}} k, \text{ дБ}, \quad (3.1)$$

где u_{iA}^* - нормализованная по максимальному уровню амплитуда сигнала в i -м отсчете; u_{iRMS}^* - нормализованная по уровню u_{RMS} амплитуда сигнала; u_i - исходная амплитуда оцифрованного сигнала; u_{\max} - максимальная амплитуда сигнала в выборке; k - коэффициент приведения ($k=0,8 \dots 1,0$); u_{RMS} - средний уровень энергетической интенсивности сигнала в выборке.

При обнаружении переполнения АЦП или насыщения входного тракта контура записи, возможен только визуальный, качественный анализ осциллограммы на "ненасыщенных" участках. Если опыт, при выполнении которого была снята осциллограмма, является воспроизводимым, следует повторить запись при меньшем коэффициенте усиления. Однако всегда, когда не только спектр в относительных единицах, но и амплитуда сигнала является информативным параметром, коэффициент усиления тракта записи должен быть контролируемым и метрологически достоверно измеренным.

Следующим этапом после визуального контроля осциллограммы является спектральный анализ сигнала. При этом доступны следующие настройки: размер вектора быстрого дискретного преобразования Фурье (128...65536 отсчетов); вид сглаживающего окна (Блэкмена, Блэкмена-Харриса, Ханнинга, Хэмминга или треугольное); коэффициент перекрытия БПФ (0...99 %); вид графика (график кривой с обычной или логарифмической шкалой, гистограмма или сонограмма). Выбор тех или иных настроек определяется конкретными требованиями и условиями эксперимента.

В дальнейшем выполняются более детальные исследования введенных в компьютер электрических и акустических сигналов. Для этого необходимо преобразовать файлы RIFF-формата, создаваемые звуковой картой под управлением операционной системы ЭВМ, в текстовые файлы, содержащие векторы мгновенных значений оцифрованного сигнала. Программа преобразования файлов, представленная в работе [130], выполняет только функции конвертации форматов и работает в режиме MS-DOS. В этой связи авторами на языке программирования высокого уровня Delphi разработана программа-конвертер "Convert.exe", отличающаяся расширенным набором функциональных и сервисных возможностей. В частности, программа позволяет: выполнять преобразование форматов представления чисел; осуществлять поиск и загрузку файлов в буфер данных средствами Windows; просматривать и редактировать содержимое встроенного буфера; выполнять прореживание сигналов во времени, в том числе с усреднением данных по соседним точкам; приводить 16-ти битные данные к произвольной разрядности, в том числе с возможностью нормализации сигнала; сохранять преобразованные данные на жестком диске компьютера. Детальный спектральный и регрессионный анализ данных выполняется с помощью программ в оболочке для математических вычислений Mathcad 7 Pro [35, 130]. Способы представления спектров сигналов приведены на рис. 3.1. Спектральный анализ электрических и акустических сигналов - мощное средство оценки трещиноватости породного массива [27, 33].

В случае, если контроль и мониторинг параметров физических и технологических процессов горного производства производился аналоговыми регистрирующими приборами, ввод полученных

осциллограмм выполняется методом сканирования с последующим распознаванием графика [130].

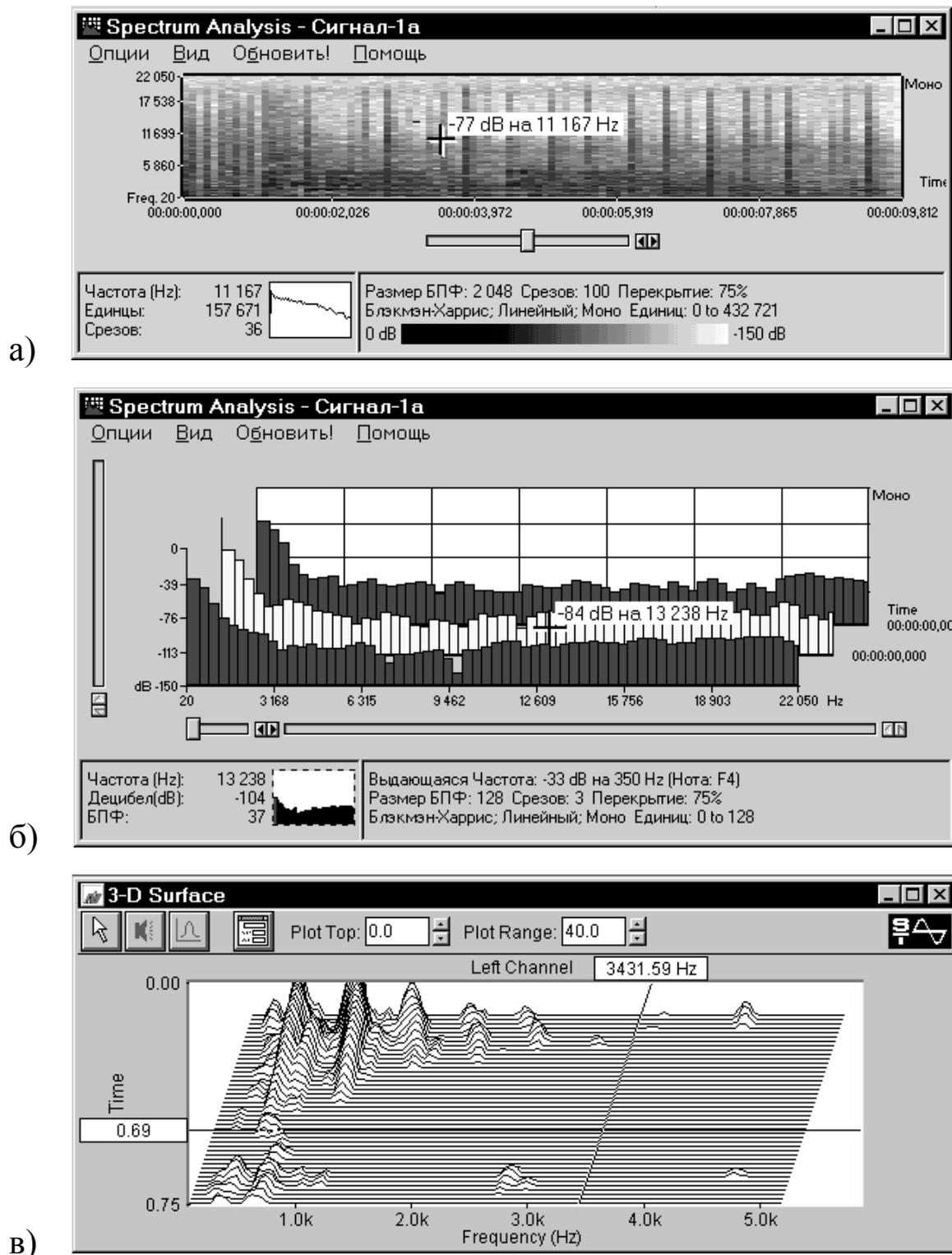


Рисунок 3.1 – Способы представления спектров сигналов: а) в виде сонограммы; б) последовательными временными срезами; в) в виде криволинейной поверхности амплитуд (применено сглаживание окном Блэкмена-Харриса, степень перекрытия данных – 75 %).

3.2 Разработка унифицированных расчетных схем для математического моделирования методом конечных элементов

Постановка конкретной задачи по оценке устойчивости подземного сооружения предусматривает соблюдение геометрических и физических критериев подобия по отношению к реальному сооружению. Геометрическое подобие определяется выбранным масштабом моделирования. Выделенный геометрический объем разбивается сеткой треугольных элементов, при этом производится ее сгущение в местах ожидаемых высоких градиентов напряжений. Положение элемента в пространстве определяется однозначно тремя точками, не лежащими на одной прямой [119]. Отклонение аппроксимирующей кусочной поверхности тем больше, чем больше размер конечного элемента. Физическое подобие определяется заданием реальных физико-механических свойств с учетом их водопроницаемости и размокаемости.

Одним из основных моментов в разработке расчетной схемы является определение граничных условий. Граничные условия задаются известными силами или перемещениями. Если исследуемая область и граничные условия симметричны, то достаточно рассматривать лишь часть области по одну сторону от осей симметрии. Узлам на осях симметрии задаются нулевые перемещения [6, 119].

При использовании универсальной сети конечных элементов той или иной структуры удается сильно сократить объем вводимой информации. Однако затраты усилий на разработку приемов автоматизации конструирования сетей конечных элементов обычно не оправдываются, в то же время они безусловно необходимы при решении объемных задач или очень больших двумерных задач [119].

В качестве примера изначально апробированы две симметричные упрощенные универсальные расчетные схемы слоистой структуры, которые разбиты на 176 и 204 треугольных элемента (рис. 3.2). Схемы отличаются видимой простотой, однако они позволяют рассматривать довольно широкий диапазон совершенно различных горных задач: от работы самой простой одиночной выработки (штрека) до очистной выработки (лавы). Этот эффект достигается за счет их построения.

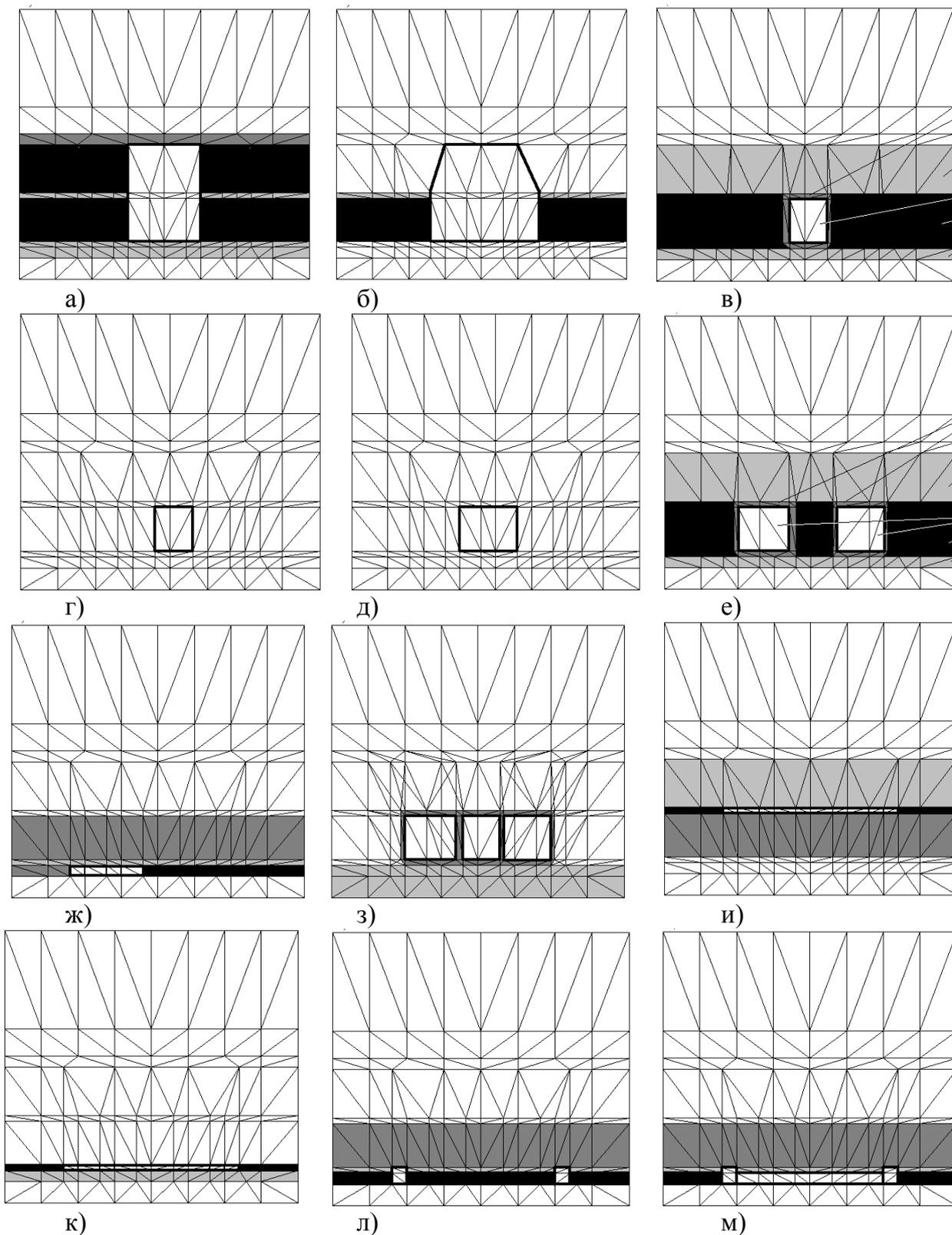


Рисунок 3.2 – Примеры упрощенных универсальных расчетных схем для экспресс-оценки НДС: породного массива вокруг штрека или камеры (а), выработки арочного типа (б); моделирования работы деревянной или бетонной крепи (в), крепи сопряжений (г, д, е), крепи очистной выработки (ж), коллектора (з); поведения пород почвы-кровли (и), пучения ложной почвы (к), выемочного столба (л), непосредственно лавы (м)

Нижняя пассивная часть модели предназначена для выравнивания нагрузки. Большое количество горизонтальных слоев позволяет моделировать основную и непосредственную кровлю и почву, различные прослои, при этом сохраняется простота модели, а геометрическое подобие поддерживается изменением только толщины слоев, что значительно проще построения новой оригинальной модели.

Возможны также незначительные дополнительные разбивки необходимых зон модели. Боковые разбивки противоположно направлены, что позволяет выровнять нагрузку и создать изначально равномерное поле нагруженности в центре модели. Изменение толщины слоев в вертикальном направлении позволяет моделировать различные типы крепи, варианты сопряжений, геологические складки и целики, однако такие упрощенные схемы позволяют исследовать только тенденцию развития процесса деформирования.

С целью прогноза ожидаемых водопритокков и устойчивости горнотехнических и гидротехнических сооружений, разработки мероприятий по предупреждению просадочных явлений, разработана асимметричная расчетная схема и проведены исследования с помощью конечноэлементной математической модели, состоящей из 842 треугольных элементов, рис. 3.3. Модель представляет собой многослойный массив, в котором расположены три полости. Массив, целики и полости имеют различную плотность разбивки со сгущением сетки элементов в местах ожидаемых высоких градиентов напряжений, что позволяет решать достаточно широкий круг геомеханических задач по оценке устойчивости одиночных выработок, камер, рудного двора (рис. 3.3, а), исследовать различного вида целики и потолочины (рис. 3.3, б, в), тектонические нарушения (рис. 3.3, г, д), подземные и наземные геотехнические объекты (рис. 3.3, е, ж, з). Возможность изменения любого линейного размера в расчетной схеме позволяет учесть влияние конфигурации полости, технологии отработки, сближенных и сопрягающихся выработок, изменить наклон и протяженность геотехнического объекта, например плотины (рис. 3.3, з). Участок модели с минимальной разбивкой элементов позволяет имитировать увлажненные зоны, карсты, пустоты, тектонику и ранее отработанные участки массива. В алгоритм решения заложены деформационная упругопластическая модель среды и среда с разупрочнением в области неравнокомпонентного сжатия как представляющие наибольший

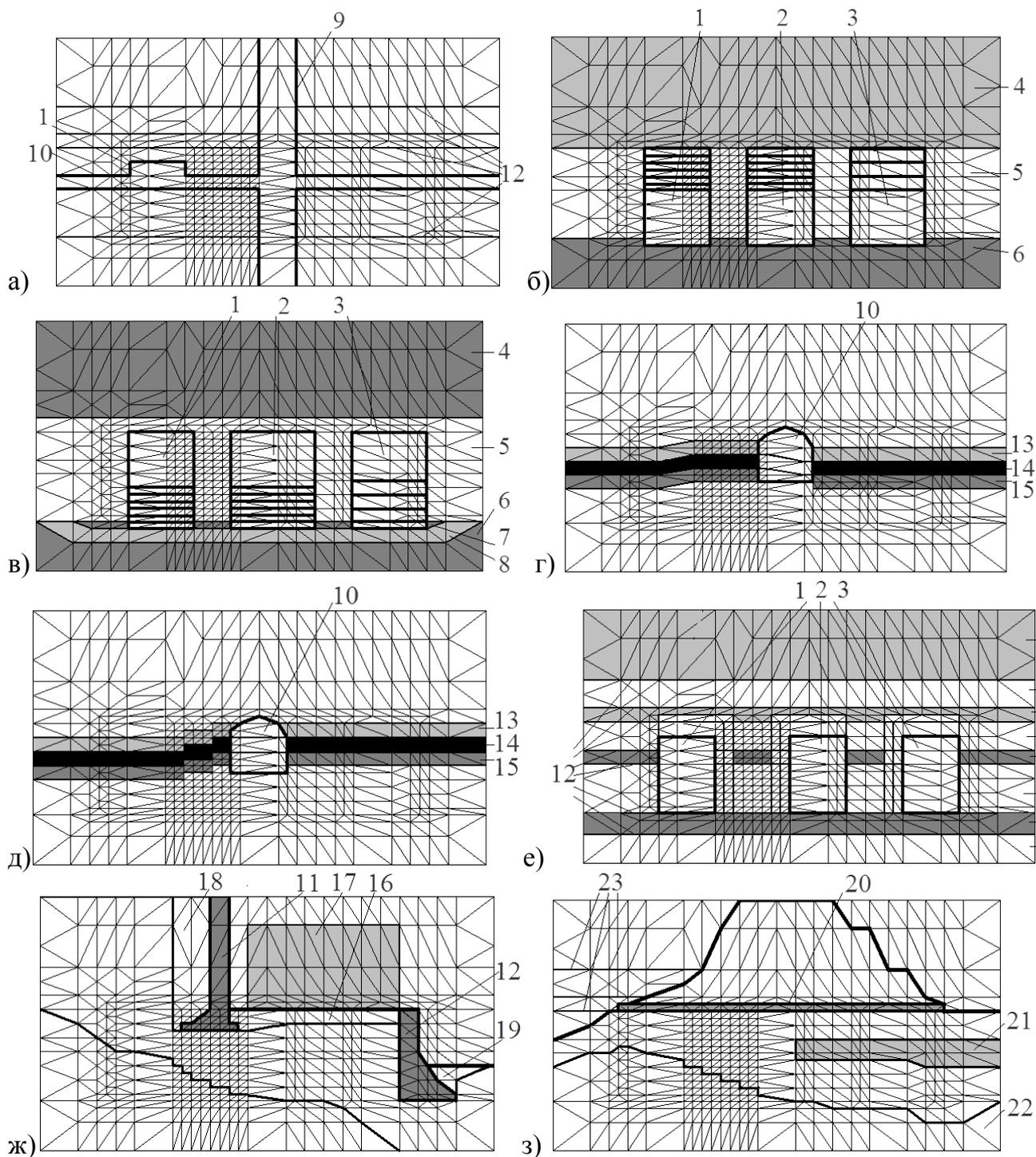
интерес для практического решения горных задач с учетом гидрогеологических особенностей породного массива (размокание, выпор, суффозия). Для описания этих моделей достаточно обычного набора механических характеристик, полученных при инженерно-геологических исследованиях [73]. Для наземных объектов или объектов, расположенных в прочных горных породах, достаточно решения задачи в упругой постановке (одна итерация).

3.3 Разработка программ автоматизированной подготовки расчетных схем с заранее выбираемыми параметрами

На основе метода аналогии, инженерного опыта эксплуатации подобных геомеханических объектов в аналогичных горно-геологических условиях часто инженерам геомеханикам заранее известен характер деформирования породного массива, а расчетные методы позволяют уточнить только количественную их величину, провести исследования в зависимости от изменения тех или иных параметров.

Однако бывают случаи, когда задача ставится первично, когда возможны многовариантные последствия принятых решений, а ввиду необычности конфигурации трудно подобрать удобную универсальную схему (или создать новую). В таких случаях рациональна равномерная разбивка простого прямоугольника. Частный случай – это квадрат, однако он подойдет только для равновеликих объектов. Поэтому предложен алгоритм и разработана программа для автоматизированной равномерной разбивки на треугольные элементы с возможностью изменения количества и формы элементов в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Следует еще раз отметить, что наиболее сложным и трудоемким этапом для решения геомеханической задачи любого уровня является собственно разработка расчетной схемы и установление граничных условий, как можно наиболее близко отражающих соответствующие реальные условия. Под граничными условиями, в данном случае, следует понимать весь комплекс задаваемых воздействий и трансформаций выделенного фрагмента исследуемого массива горных пород, которые нарушают его исходное равновесное состояние. Задание граничных условий можно разделить на активную и пассивную составляющие процесса моделирования [119].



1, 2 и 3 – первая, вторая и третья камеры; 4 – глинистые породы; 5 – гипс; 6 – породы; 7 – глинистый прослой; 8 – прочный или слабый слой; 9 – ствол; 10 – выработки; 11 – подпорная стенка; 12 – контакты разнопрочных слоев; 13 – непосредственная кровля; 14 – угольный пласт; 15 – непосредственная почва; 16 – известняк; 17 – условный груз; 18 – ангидрит; 19 – зоны подсыпки (доломит); 20 – тоннель для выпуска воды; 21 – дренаж; 22 – основные породы; 23 – уровни заполнения водохранилища

Рисунок 3.3 – Универсальная расчетная схема с асимметричным расположением конечных элементов для оценки устойчивости одиночных выработок, камер, рудного двора (а), целиков и потолочин (б, в), тектонических нарушений (г, д), подземных и наземных геотехнических объектов (е, ж, з).

К активным граничным условиям следует отнести силовые воздействия, ранее известные или предполагаемые. Чаще всего, для решения геомеханических задач, рассматривающих поверхностный слой земной коры, задают равномерно распределенную, плавно возрастающую (убывающую) или точно-направленные нагрузки. Осуществление нагружения расчетной схемы выполняется пересчетом заданной нагрузки в узловые силы. Используют метод суперпозиции по отношению к узлам расчетной схемы. Примером в данном случае может служить нагружение выделенного участка земной коры весом вышележащих пород путем задания на верхней части расчетной схемы вертикальной равномерно распределенной нагрузки (рис. 3.4, а), которая пересчитывается в узловые силы по оси y по формуле:

$$F_2 = q((A+B)/2), \quad (3.2)$$

где $q = \gamma H$.

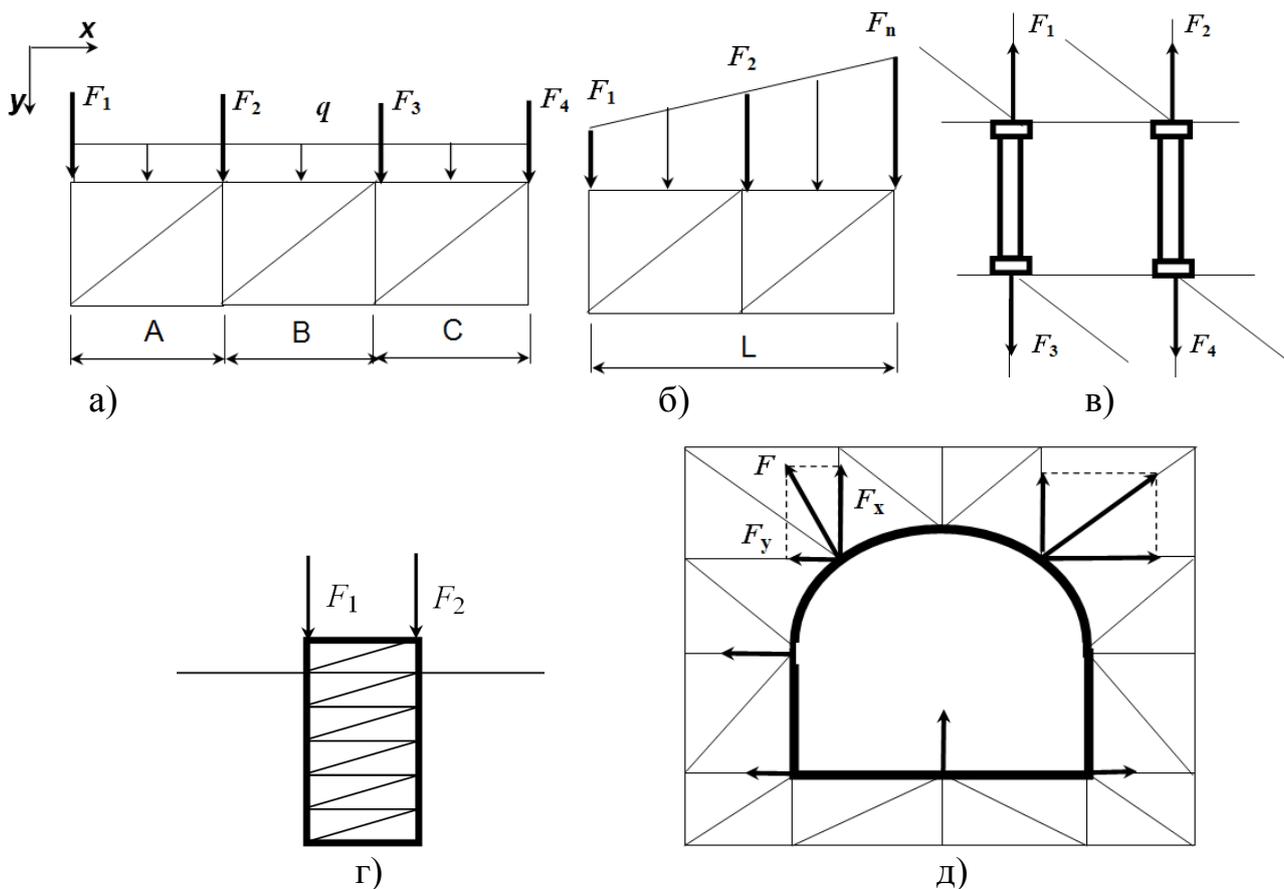


Рисунок 3.4 – Примеры пересчета распределенных равномерных и неравномерных нагрузок в узловые силы: а – равномерная нагрузка; б – неравномерно распределенная нагрузка; в – нагрузка со стороны механизированной крепи; г – нагрузка на фундамент; д – отпор арочной крепи

Неравномерно распределенная нагрузка (рис. 3.4, б) вычисляется по формуле:

$$q = (F_1 + F_n)/L. \quad (3.3)$$

Точечная нагрузка может быть задана в любом направлении и делится на составляющие по осям координат. Этот принцип позволяет включить в исходные данные широкий спектр известных измеренных либо точно вычисленных сил. Примером прикладных инженерных задач, использующих данные такого типа, являются отпор крепей, распорных конструкций, нагрузок на фундаменты и др. (рис. 3.4, в-д).

К пассивным граничным условиям относятся заданные узловые смещения, нулевые силы и перемещения, измененные физико-механические свойства участков расчетной схемы (E , ν , γ , C , ϕ), рис. 3.5.

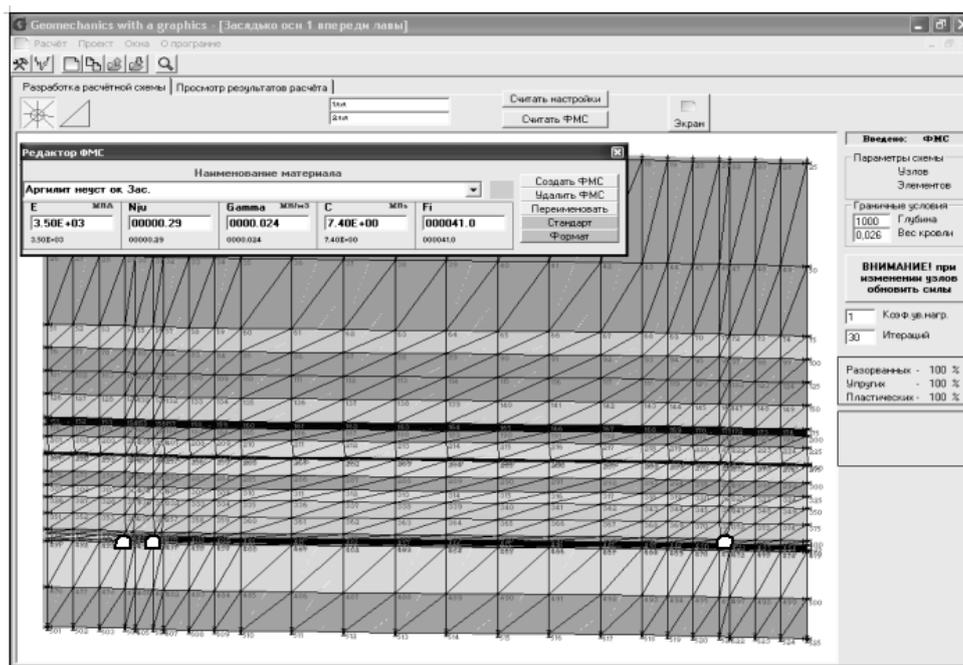


Рисунок 3.5 – Автоматизированный ввод исходной геотехнической информации из банка данных физико-механических свойств горных пород

Последовательность ввода данных заключается в следующем. Программный модуль вычисления напряженно-деформированного состояния автоматически вычисляет вес элементов, зарегистрированных в блоке ввода данных, по заданному объемному весу каждого элемента γ и его единичному объему и добавляет нагрузку в узлах расчетной схемы, а для постановки задачи и ее

решения достаточно постановки только граничных условий. Задаются геометрические параметры исследуемой области, подземных сооружений и коммуникаций, внешние и активные внутренние нагрузки, известные перемещения и деформации. В результате расчетов система приходит в равновесие, и можно, с достаточной для расчетов точностью, определить напряженно-деформированное состояние внутри заданной системы. Путем последовательного решения задач прогнозируется формирование зон неупругих деформаций и зон разрыва сплошности при изменении горнотехнических ситуаций.

Реализован комплекс автоматизированного ввода и обработки информации, который содержит модуль исходных данных, модуль расчета напряженно-деформированного состояния, модуль графического построения расчетных схем и модуль обработки результатов расчетов. Оператором заполняются окна геометрических параметров расчетной схемы: ширина, шаг сетки по ширине; высота, шаг сетки по высоте; физико-механические свойства горных пород или другого материала; число шагов нагружения; глубина разработки; предельное число итераций при пластическом деформировании.

Разработанная программа автоматизированной подготовки расчетных схем с заранее выбираемыми параметрами позволяет изменять количество и форму треугольных элементов в горизонтальном и вертикальном направлении, что открывает возможность моделировать наклонное или крутое падение горных пород и, ввиду сложности конфигурации и невозможности подбора удобной универсальной расчетной схемы, исследовать возможные многовариантные результаты принятых решений.

3.4. Автоматизированная статистическая обработка промежуточной и выходной информации в геомеханических расчетных схемах

Отклонение аппроксимирующей кусочной ломаной от реальной гладкой будет тем больше, чем больше кривизна и чем больше размер гладкого элемента. Отсюда вытекает основное правило построения сетей конечных элементов: необходимо выполнить сгущение сети в местах ожидаемых высоких градиентов искомых функций [119]. Однако общее количество узлов и элементов обычно ограничивают,

что связано с накоплением погрешности при вычислениях, увеличением времени расчетов и трудоемкостью подготовки исходной информации, которая является основным сдерживающим фактором широкого использования приближенных методов.

Любым конечно-элементным расчетным схемам присущи элементы субъективизма, случайности и расчетной погрешности. Погрешность расчета заложена в принципе расчетных методов, поскольку они являются приближенными методами. Мало элементов – погрешность от неточности разбиения, много элементов – возникает эффект накопления мелких погрешностей, увеличивается вероятность допущения мелких ошибок оператором, которые в принципе могут быть даже не обнаружены и при повторных проверках из-за большого количества исходного материала. Субъективизм связан с многовариантностью возможностей разбиения схемы, интуитивной оценкой характера будущего разбиения (тип элементов, форма, количество, взаимосвязи), даже при равномерной автоматизированной разбивке субъективизм, хотя и минимальный, но неизбежен, он связан с типом, формой и размерами элементов, количеством узлов и элементов, направлением слоев. Элементы случайности обусловлены погрешностями оценки горно-геологических условий, определения физико-механических свойств горных пород, задания геомеханических параметров применяемой крепи, а также вышеперечисленными субъективными и объективными факторами. В этой связи, в зависимости от конкретно решаемой задачи, предложена дополнительная автоматизированная статистическая обработка промежуточной и выходной информации для объективной оценки взаимосвязей и закономерностей между различными параметрами как в общем по модели, так и в определенных сечениях или направлениях.

Для построения корреляционных моделей в Excel выделяются попарно столбцы данных, содержащие значения коррелируемых параметров. Каждая пара столбцов должна иметь одинаковое количество данных, а каждый столбец заносится в отдельный файл, которому присваивается адрес (наименование). Столбцы данных формируются в зависимости от поставленной задачи поэлементно в горизонтальном, вертикальном или любом произвольном направлении, послойно по определенной литологии горных пород, зонально (например, вдоль или поперек образовавшейся зоны трещиноватости), готовыми столбцами выходных данных или их

частями, выборочно через одно, два и так далее выходных значений. При условии, что расчеты выполняются на одной и той же математической универсальной конечноэлементной модели, например, для сопряжения горных выработок в различных горно-геологических условиях, выбор данных может производиться по заранее подготовленной структуре вплоть до полной автоматизации.

Затем в оболочке Mathcad осуществляется автоматизированная статистическая обработка и анализ информации по программе Su-Stat [101]. При разработке варианта алгоритма программы, который используется в работе, применены известные и широко апробированные методы решения базовой линейной задачи теории упругости МКЭ [17, 22] и расчета предельных и запредельных состояний методом начальных напряжений [119, 46, 47]. Вместе с тем он существенно отличается от известных алгоритмов, в частности [119], который написан для линейного программирования (язык Fortran-4). Данный алгоритм использует объектно-ориентированную технологию программирования (языки C++, Visual basic), которая заключается в управлении объединенными типами данных (объектами и классами), каждый из которых имеет свою память, отличную от других объектов, и включает в себя объекты более низкого уровня с внутренним типом данных. В данном случае программа является связкой программных объектов, которые посылают друг другу сообщения на выполнение определенных вычислительных операций. Программирование вычислительного комплекса выполнено группой разработчиков ИГТМ НАН Украины при участии автора [103], которым разработана объектно-ориентированная структура программного комплекса (структурный алгоритм), модель функционирования всей программной системы и последовательность выполнения отдельных вычислительных операций, исходный программный код расчета, анализа и визуализации систем техногенной трещиноватости. Также снижена погрешность вычислений при решении системы линейных уравнений, реализованы задачи в пластической и упругопластической постановках, задачи с разупрочнением и расслоением, усовершенствована программа распечатки графической информации.

Метод статистической обработки промежуточной и выходной информации в приближенных расчетных схемах непрерывного цикла математического моделирования предложен, обоснован и

апробирован впервые [100, 101, 130]. Программа Su-Stat разработана в НГУ и позволяет автоматически вычислять основные статистические характеристики массивов случайных чисел, строить гистограммы распределения случайных величин, линейную и нелинейные (параболическую, гиперболическую, степенную и экспоненциальную) регрессионные модели с оценкой их корректности по коэффициентам детерминации при исследовании объектов горнотехнического профиля. Программа соответствует международному стандарту "Worldwide Standard for Technical Calculations" и может быть использована как приложение в интегрирующей среде для математических вычислений MathConnex при автоматизированном контроле и управлении. Программа обеспечивает считывание массивов значений случайных величин из файлов, автоматическое определение длин выборок и масштабирование графиков, а также предоставляет сервисные средства редактирования в оболочке Mathcad. Операторы программы имеют вид математических формул, что в совокупности с наличием Windows-совместимых средств редактирования позволяет переносить их в документы MS Office, что упрощает составление отчетных документов. Минимальная конфигурация ЭВМ, поддерживающая разработанную программу: процессор 80486, 8MB RAM-памяти, 20MB свободного места на жестком диске для инсталляции оболочки, SVGA-графический адаптер, ОС - Windows 95.

Программа статистической обработки состоит из следующих разделов: «Математическое моделирование при исследовании горнотехнических объектов», «Построение гистограмм распределения случайной величины», «Линейный парный регрессионный анализ», «Нелинейный парный регрессионный анализ» и «Вывод результатов вычислений».

Блок предварительной обработки выборки выполнен в виде отдельной подпрограммы. Блок предназначен для отсева ложных значений, вносимых системами сбора и обработки информации, вызванных сбоями в аналого-цифровых преобразователях, зашумлением сигнала в линиях связи и тому подобное. Ложные значения в выборке либо автоматически не учитываются, либо заменяются некоторыми аппроксимированными значениями.

Известны следующие основные способы отсева грубых погрешностей: фильтрация, усреднение (сглаживание), отсев значений, доверительная вероятность которых меньше допустимой,

либо не попадающих в определенный доверительный интервал. Применение цифровой фильтрации целесообразно в системах реального времени в тех случаях, когда частотные области спектра помех относительно постоянны и не пересекаются с частотными областями спектра полезного сигнала, например при отфильтровывании помех, наводимых силовыми линиями промышленной частоты или высокочастотных шумов. Так как программа предназначена для решения общестатистических задач при исследовании процессов горного производства и не ориентирована на обработку быстроизменяющихся сигналов, то цифровая фильтрация выборок не производится. В программе предусмотрена возможность линейного сглаживания массива значений по трем и пяти точкам, нелинейного – по семи точкам, сглаживания методом плавающей медианы с выбираемой шириной окна. Во всех схемах неявно принято, что истинные значения имеют плавный характер изменения во времени, а ложные – резкий. Для расчета некоторых статистических величин используются встроенные операторы оболочки Mathcad. Это позволило упростить программу без увеличения погрешности вычислений. Встроенные операторы используются также для решения систем уравнений методом итераций при расчете коэффициентов регрессионных моделей.

Для каждой регрессионной модели производится автоматическое построение совмещенных графиков модели и реальных значений выборки, что позволяет визуально оценить достоверность модели. Кроме того, рассчитывается средняя квадратическая ошибка регрессионной модели. Программа предназначена для включения в качестве приложений в методические руководства для решения конкретных горнотехнических задач.

3.5 Выводы по разделу

Геомеханический мониторинг в режиме реального времени на основе персональной ЭВМ возможен на основе внедрения в практику горного дела прогрессивных методов и средств контроля горного давления, высокопроизводительных средств ввода и обработки информации, унифицированных расчетных схем и апробированных методик прогноза устойчивости геоматериалов в обнажениях. Для ввода в ЭВМ аналоговых сигналов сложной формы предложено использовать звуковую карту общего назначения. Хотя точность

представления сигналов с помощью компьютера более высокая, чем при использовании аналоговых регистраторов, первоначальная проверка характеристик с помощью тестовых сигналов является обязательной, поскольку звуковые карты не аттестуются как измерительные приборы. Автоматическая обработка сигнала позволяет осуществить визуальный осмотр осциллограмм, анализ и обработку с помощью программного инструмента «Статистика», стандартных программ компьютерного моделирования и спектральной обработки сигналов.

Апробированы симметричные упрощенные универсальные расчетные схемы слоистой структуры, позволяющие исследовать тенденцию развития процесса деформирования вокруг геотехнических объектов. Универсальная расчетная схема с асимметричным сгущением сетки в местах предполагаемых высоких уровней напряжений и деформаций позволяет задать заранее заданные параметры известных или предполагаемых крупных тектонических нарушений, а также параметры трещиноватых зон. Модели изучаются последовательно путем частичного нагружения модели через фиксацию разрушения при переходе от предыдущей стадии к последующей. Упрощенно трещиноватость следует учитывать по результатам натурных испытаний образцов путем введения коэффициентов ослабления в прочностные характеристики породы.

Разработан комплекс автоматизированного ввода и обработки исходной информации для расчетов методом конечных элементов. Комплекс содержит модуль исходных данных, модуль расчета напряженно-деформированного состояния, модуль графического построения расчетных схем и модуль обработки результатов расчетов. Оператором заполняются окна геометрических параметров расчетной схемы, физико-механические свойства горных пород или другого материала, число шагов нагружения, глубина разработки, число итераций при пластическом деформировании. Программа автоматизированной подготовки расчетных схем с заранее выбираемыми параметрами имеет возможность изменения количества и формы треугольных элементов в горизонтальном и вертикальном направлениях, что позволяет смоделировать наклонное и крутое падение горных пород и, ввиду сложности конфигурации и невозможности подбора удобной универсальной расчетной схемы, исследовать многовариантные результаты принятых решений в сложных горно-геологических условиях.

Разработана и апробирована методика статистической обработки промежуточной и выходной информации в расчетных схемах для программ расчета геомеханических процессов.

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1 Методические особенности реализации геомеханических задач

В тех случаях, когда невозможно получить точное аналитическое решение геомеханической задачи, в качестве метода исследований применяют моделирование (оптическое, моделирование на эквивалентных материалах, в последнее время – компьютерное моделирование). Основными этапами моделирования являются: построение формальной модели, программное обеспечение процесса имитации, вычислительные эксперименты. Варианты программ позволяют получить упругопластическое решение в условиях плоской деформации, и только упругое решение в условиях плоского напряженного состояния в однородной и неоднородной среде [6, 119].

Упругая модель – линейно-деформируемая среда, напряжения и деформации подчинены физическому закону Гука (1.5) [119]. Решение упругой задачи методом конечных элементов выполняется в следующей последовательности: 1) ввод информации о геометрии сети конечных элементов, их свойствах и заданных узловых силах и перемещениях; 2) формирование вектора узловых и массовых сил; 3) непосредственная подготовка информации, которая относится к очередному элементу, в частности номеров окружающих узлов, их координат, свойств элемента; 4) составление матрицы жесткости элемента (МЖЭ); 5) формирование матрицы жесткости системы путем рассылки коэффициентов МЖЭ в соответствующие адреса; 6) введение заданных узловых перемещений путем умножения их на соответствующие столбцы матрицы жесткости системы и переноса результатов в вектор узловых сил; 7) решение системы уравнений; 8) печать узловых перемещений; 9) очистка поля вектора узловых сил от первичных значений; 10) расчет и печать деформаций и напряжений в элементах; 11) расчет узловых сил по найденным напряжениям и накопление их в поле вектора узловых сил; 12) печать узловых сил.

Простейшая, наиболее универсальная, но наиболее объемная информация включает в себя координаты всех узлов, заданные

узловые силы, заданные узловые перемещения, номера трех узлов, окружающих каждый из элементов, номер типа каждого из элементов, модуль упругости, коэффициент Пуассона, объемный вес элементов каждого типа. Естественное поле напряжений определяется путем перерасчета нагрузки в заданные узловые силы. Нагрузка может быть приложена сразу или в несколько шагов для поэтапного наблюдения за процессом деформирования. Например, если число шагов задано трем, то заданная узловaя сила сначала делится на три и производится решение, затем увеличивается в два раза, и, наконец, сила будет принята равной полному ее значению, при этом результат решения не зависит от числа шагов нагружения. Силы тяжести элементов учитываются автоматически. Введенный объемный вес умножается на площадь элемента, поровну делится между тремя узлами и прикладывается в направлении вертикальной оси. Вырез в области имитируется приданием значений модулю упругости $E=0$ и объемному весу $\gamma=0$ группе элементов, заполняющих эту область.

Среда, деформирующаяся упруго вплоть до момента выхода в предельное состояние и не изменяющая сопротивление при дальнейшем ее деформировании, является упругопластической. Реализация такой среды достигается совмещением МКЭ и модифицированного метода Ньютона-Рафсона (начальных напряжений), предложенного О. Зенкевичем [46], который заключается в следующем. Элементы среды первоначально наделяются начальными упругими свойствами, и составляется постоянная матрица жесткости системы. Затем прикладывается полная заданная нагрузка, решается упругая задача и рассчитываются теоретические напряжения и деформации. Разница между упругими и расчетными напряжениями рассматривается как прирост начальных напряжений. Прирост начальных напряжений элемента пересчитывается в начальные узловые силы, которые добавляются к вектору сил системы. Проводится следующее упругое решение с прежней матрицей жесткости, но с новым набором узловых сил. Добавление начальных сил увеличивает упругие напряжения в элементе, но на величину меньшую, чем начальные напряжения, так как добавленные узловые силы распределяются на все элементы. Итерации повторяются до тех пор, пока найденные упругие напряжения не будут соответствовать заданной геомеханической

модели горного массива, в принципе, среда может обладать любым законом пластического течения [6, 119].

В условиях гидростатического сжатия горные породы могут находиться в любом по величине напряженном состоянии. Однако, при неравнокомпонентном напряженно-деформированном состоянии, величина касательных напряжений ограничивается прочностными свойствами среды. Деформации горных пород под действием растягивающих напряжений характерны для верховых зон сползающих откосов, а также для толщ горных пород, оседающих над выработанным пространством, при подземной выемке полезного ископаемого для системы разработки с полным обрушением кровли. Поэтому представляет интерес прогноз ожидаемых деформаций при растяжении и определение начала разрушения элемента, т. е. – начала процесса трещинообразования или отслоения на контакте слоев. Предельные напряжения в области растяжения в программе «Геомеханика» ограничиваются пределом прочности на растяжение, при этом они автоматически принимаются равными $C/5$ для элементов, не выходящих в пластику, и равными нулю для элементов, выходящих в пластику на предыдущих циклах итерации.

В области сжатия применяется критерий Кулона, предельные напряжения ограничиваются пределом прочности на сжатие, который определяется автоматически по этому критерию, исходя из заданных послойно физико-механических свойств породного массива [119]:

$$\sigma_1 = 2C \operatorname{ctg} \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3, \quad (4.1)$$

где C и φ - сцепление и угол внутреннего трения.

Наибольший интерес в плане исследования физических процессов разрушения породного массива вокруг геомеханических объектов и возможных предельных геотехнических ситуаций представляет упругопластическая модель среды с разупрочнением за пределом прочности. Основные положения численной реализации этой модели заключаются в следующем. Алгоритм соединяет две теории – теорию упругости и теорию предельного состояния. Вводят понятие остаточной прочности (сопротивляемости) σ_1^{ocm} , формула (4.1), где C и φ - параметры среды с остаточной прочностью. Формально единственным отличием от модели с идеальной пластичностью является определение σ_1 [119]:

$$\sigma_1 = \sigma_1^{ост} + \frac{\sigma_1^{np} - \sigma_1^{ост}}{2\varepsilon_1^y} (3\varepsilon_1^{np} - \varepsilon_1), \quad (4.2)$$

где σ_1^{np} - предельное максимальное напряжение (предельная прочность); ε_1^y - предельная упругая деформация.

Предельное напряжение в области сжатия ограничивается пределом прочности на сжатие, запредельная прочность определяется по формуле (4.2) при $\varepsilon_1^y \leq \varepsilon_1 \leq 3\varepsilon_1^y$, остаточная прочность $\sigma_1^{ост} = \sigma_1/3$, предельная величина прочности определяется уравнением (4.1).

Устойчивые упругопластические решения с учетом остаточной прочности обычно достигаются за 10-15 циклов итерации. Число циклов итерации указывается в выводимой информации. Если итерационный процесс не сошелся за 100 циклов, то надежды на сходимость в дальнейшем нет, и программа прекращает работу [119]. Для описания физико-механических свойств необходимо определение модуля упругости E , коэффициента Пуассона ν , объемного веса γ , сцепления C и угла внутреннего трения φ каждого типа элементов, рис. 3.5.

Вводимая информация составляет семь условных массивов и подготавливается в соответствии с описанием программы. Применение унифицированных расчетных схем и программ автоматизированной равномерной разбивки расчетных схем с заранее выбираемыми параметрами резко снижает объем подготавливаемой информации, так как она уже заранее известна, поэтому требуется лишь корректировка по введению нового объекта или по изменению горно-геологических условий, условий нагружения, прочее.

Выводимая информация представляется в той же системе единиц, что и входная, она состоит из контрольной информации и результатов решения задачи. В качестве контрольной информации на печать выдаются: заданные характеристики всех типов элементов; площади всех элементов от первого до последнего по десять чисел в строке; общая площадь рассматриваемой области; при несовпадении числа заданных ненулевых сил и перемещений с количеством соответствующих признаков выдается указание: «проверь признаки». При несовпадении суммы заданных сил и перемещений с контрольными значениями выдаются указания: «проверь силы» или «проверь перемещения». Если контроль информации не выявит погрешностей, программа продолжает работать. Из результатов

решения на печать выдаются по элементам и узлам: порядковый номер элемента; состояние элемента (если по данному элементу указан признак «0», то элемент деформируется упруго, если признак «1» – то пластически, признак «-1» означает, что элемент порван хотя бы в одном направлении); главные напряжения σ_1 , σ_2 и угол α между направлением σ_1 и осью x ; главные деформации ε_1 , ε_2 и угол β ; теоретические значения главных напряжений σ_1^m и σ_2^m ; порядковый номер узла; перемещения каждого узла по направлению осей x и y ; узловые силы с учетом сил тяжести, в том числе по узлам с заданными перемещениями. При необходимости в печать выдаются осевые значения напряжений σ_x , σ_y , σ_{xy} и деформаций ε_x , ε_y , ε_{xy} .

4.2 Исследование процессов трещинообразования вокруг одиночных капитальных, подготовительных и очистных выработок

Для решения практических вопросов устойчивости капитальных, подготовительных и очистных выработок и управления горным давлением необходимо производить расчеты напряжений и перемещений пород. По мере извлечения полезного ископаемого и перемещения забоя поле напряжений вокруг выработок изменяется. Область массива, в пределах которой происходят эти изменения, называют зоной влияния выработок. В отличие от подготовительных выработок зоны влияния вокруг очистных пространств охватывают значительно большие области массива. Решение таких задач еще можно произвести на упрощенных унифицированных расчетных схемах, рис. 3.2 (пример решения представлен на рис. 4.1). Упрощенные модели позволяют определить тенденцию протекания физических процессов, рассчитать и смоделировать в первом приближении различные варианты посадки основной и непосредственной кровли, пучения пород почвы и забутовки выработанного пространства, определить участки повышенной трещиноватости и углы мульды сдвижения. При этом исследованию подлежат как параметры начального поля напряжений, так и зоны опорного давления, размеры и конфигурация очистных пространств, деформационно-прочностные свойства массива вмещающих пород, а также способы воздействия на угольный пласт.

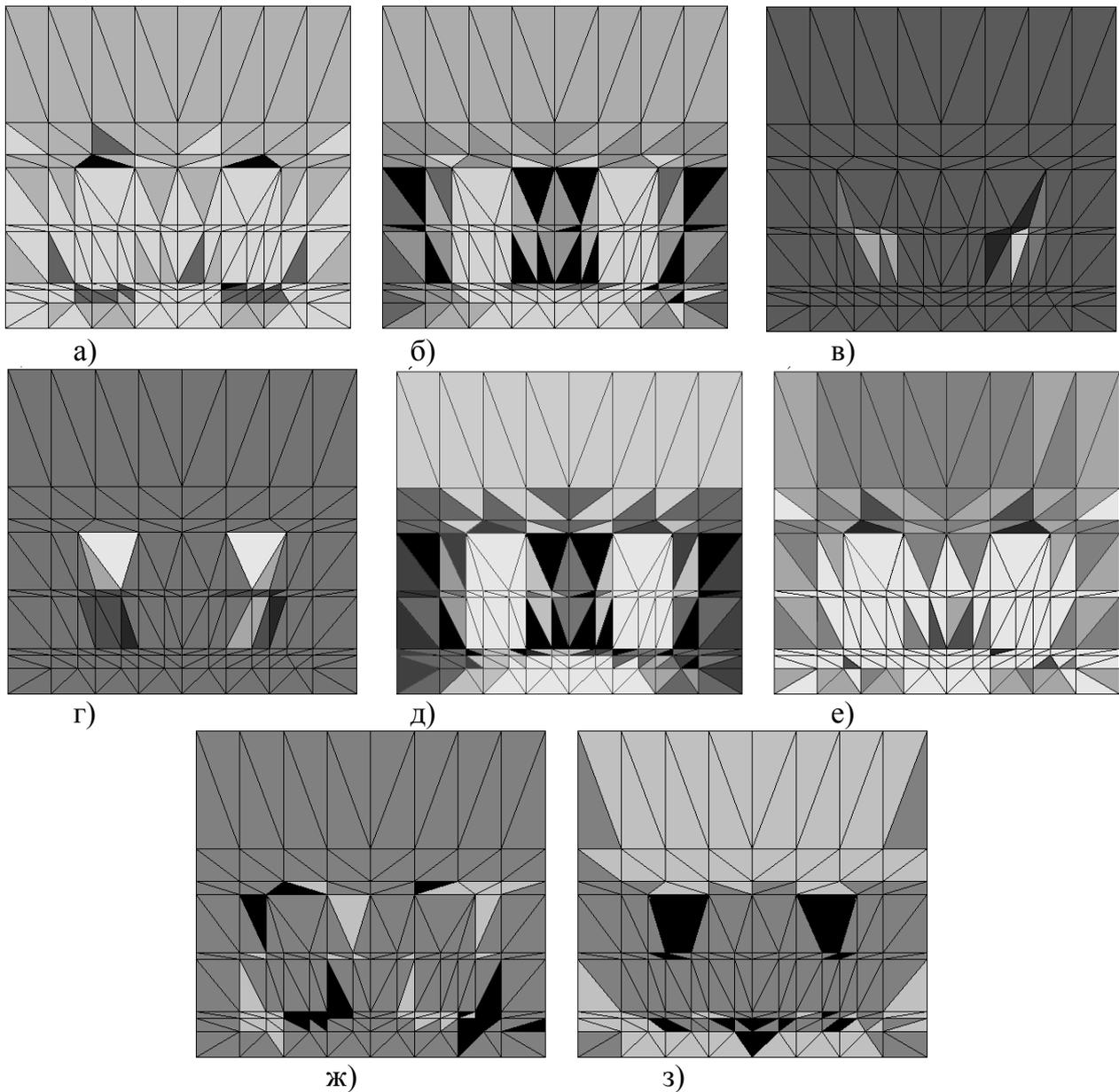


Рисунок 4.1 – Исследование тенденций изменения НДС породного массива вокруг выемочного столба: а – напряжения σ_1 , изменяются от 0 до 100,9 МПа (более темные элементы); б – σ_2 от -1,3 до 37,4 МПа; в – τ_{xy} от -35,3 до 48,1 МПа; г – зоны упругих (светлые элементы), пластических (серые элементы) и разрывных (черные элементы) деформаций; д – напряжения σ_x от -0,7 до 60,1 МПа; е – напряжения σ_y от -0,1 до 99,3 МПа; ж – перемещения вдоль оси x от 0,09 до 0,12 м; з – перемещения вдоль оси y от 0,02 до 0,22 м

С точки зрения оценки напряжений в массиве пород вокруг очистной выработки выделяют две основные зоны: зону разгрузки и зону опорного давления. Так как границы очистной выработки все время перемещаются в пространстве, выделенные зоны также находятся в непрерывном движении. Поэтому различают временное или эксплуатационное опорное давление, возникающее вблизи

перемещающихся границ очистного пространства, а именно: зоны опорного давления основной и непосредственной кровли, основной и непосредственной почвы, которые накладываются на зоны разгрузки и зоны нетронутого массива. В противоположность этому, зону концентрации напряжений возле неподвижной границы очистной выработки называют зоной остаточного или стационарного опорного давления [14]. В этой связи, в методическом плане при решении сложных задач теории упругости, необходимо последовательно конкретизировать (привязывать к фактическим условиям и по мере возможности уточнять величины исходных параметров) условия задачи, учесть не только исходные горно-геологические условия, прочностные параметры, формы и размеры выработок, а и ожидаемые результаты, например, крайние (допускающие еще эксплуатацию) размеры выработок, т. е. ввести максимальные перемещения или допустимые коэффициенты концентрации напряжений в зонах опорного давления, и т. д. (рис. 4.2).

При этом снижается общая неопределенность задачи, она становится более конкретной, а получаемые расчетные параметры становятся более точными, в связи с чем полученные результаты могут быть уже исходными параметрами управления горным давлением, рис. 4.2, а. По степени и характеру процессов деформирования в массиве можно выделить несколько различных зон: упругого плавного прогиба, пластического течения, повышенной трещиноватости, сдвижений и обрушений пород. Толщи пород, подвергшиеся влиянию горных работ, имеют различие по характеру и степени деформирования пород, рис. 4.2, б.

Введение времени с целью прогноза устойчивости чисто теоретически также весьма проблематично, поскольку мешает многофакторность вопроса и взаимозависимость исходных параметров. Значительно проще учесть время на основе экспериментального определения стадии разрушения объекта, т.е. на основе учета реального времени частичного разрушения реального объекта. В природе большинство затухающих процессов носят экспоненциальный характер, поэтому не представляет значительных трудностей, определив априорно и субъективно на первом этапе несколько промежуточных экспериментальных точек, уточнить стадию разрушения породного массива и дать прогноз устойчивости на базе эмпириоаналитических данных, например, на основе экспериментально определенного состояния породного массива,

реального времени достижения этого состояния и расчетных данных разрушения промежуточных моделей при различных нагрузках, рис. 4.3. Для решения таких более сложных задач пригодна асимметричная унифицированная расчетная схема (рис. 3.3) и программа автоматизированного построения конечно-элементных схем (пример решения рис. 4.2 и 4.3).

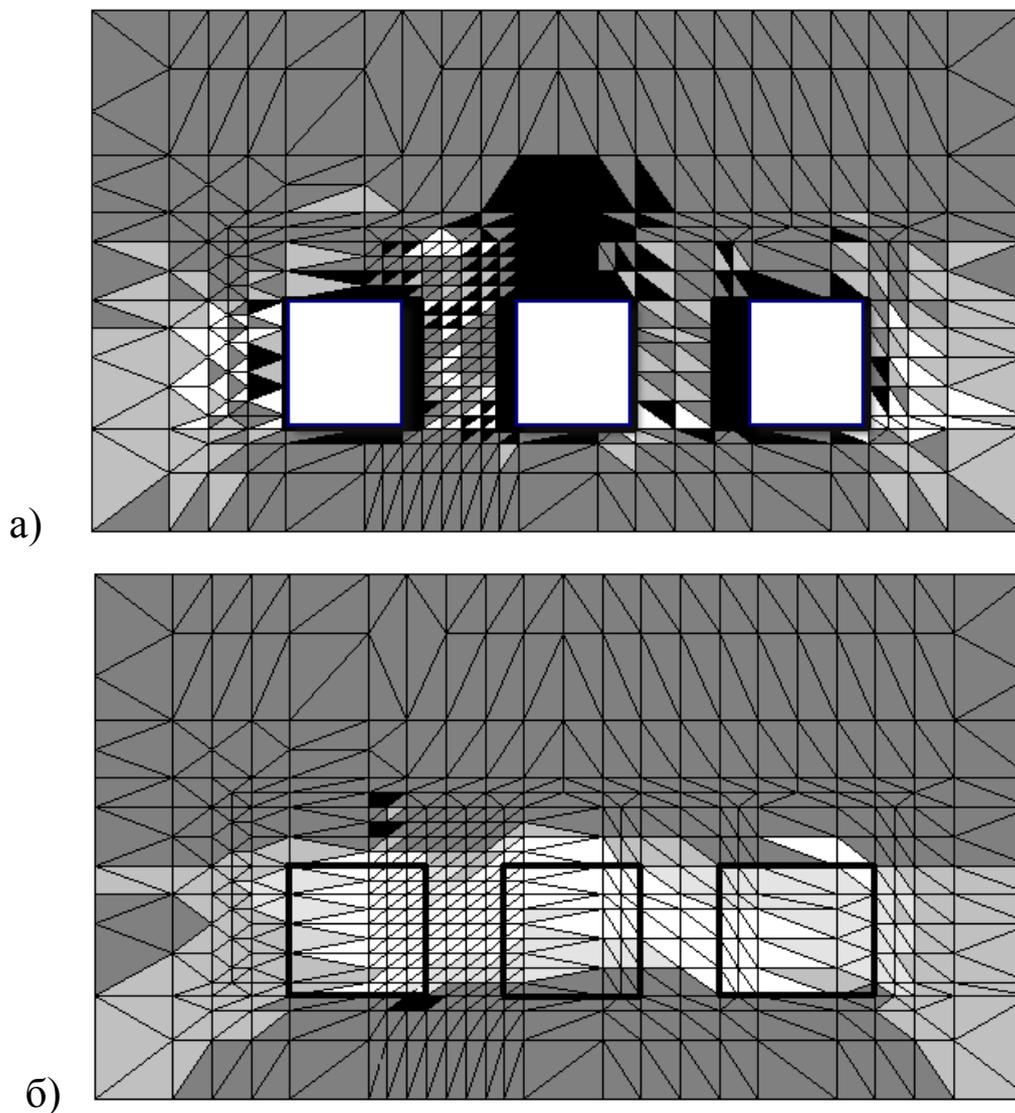


Рисунок 4.2 – Исследование напряженно-деформированного состояния (создание предельных нагрузок, которые заведомо превышают реальные нагрузки) при камерной системе разработки гипса в сложном массиве горных пород: а – напряжения σ_1 , которые изменяются от 21,4 МПа до 128,4 МПа (более светлые элементы), а также зоны разрушения (черные элементы); б – деформации по оси y , изменяющиеся от 0,12 м до 0,24 м (более светлые элементы), а также зоны расслоения (черные элементы)

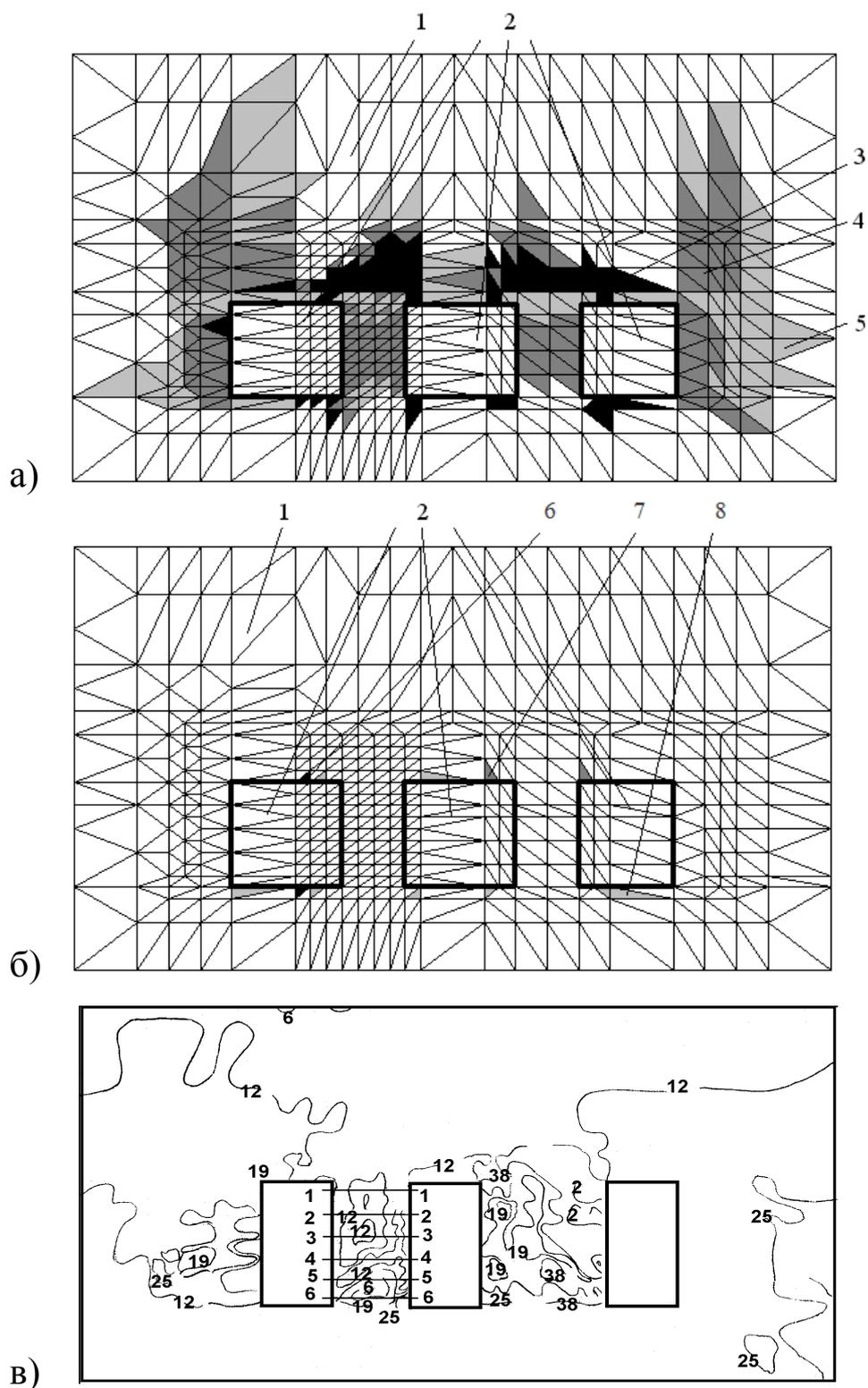
Формы и характер проявлений горного давления вокруг капитальных, подготовительных и, в особенности, очистных

выработок весьма разнообразны (от небольших сдвижений и деформаций горных пород и полезного ископаемого до их разрушения и обрушения, от незначительных нагрузок на крепь до полного вывода ее из строя) и зависят от многих факторов, в том числе от глубины разработки, горно-геологических условий, структуры и механических свойств горных пород, гидрогеологии и тектоники участка. Типичные примеры учета тектоники участка представлены на рис. 3.3, г, д.

Большое влияние оказывают горнотехнические условия эксплуатации месторождений, характеризующиеся формой, размерами и расположением выработок, технологией ведения добычных работ, способом управления горным давлением, скоростью подвигания забоев, видом крепи, способом и типом закладки выработанного пространства и т. д. Технологические процессы, изменяющие массив пород вокруг очистной выработки, породного обнажения, сопровождаются изменением поля статических напряжений и, как следствие этого, деформированием окружающих пород. Типичный пример решения технологических задач приведен на рис. 4.3, в.

В выработанном пространстве вслед за упругими смещениями пород кровли и стенок развиваются неупругие деформации и происходят локальные разрушения. Этому способствует развитие в окружающем массиве зон концентрации как сжимающих, так и растягивающих напряжений, рис. 4.3, в. В процессы деформирования вовлекаются большие объемы пород. Расчетные методы, основанные на теории упругости, пластичности, упругопластичности и т. д., несмотря на то, что они базируются на непрерывности среды, могут определять начало зарождения трещин, а замена трещин слабопрочными породами позволяет приближенно имитировать развитие процесса разрушения, рис. 4.3, а, б.

В практике разработки пластовых месторождений укоренились понятия непосредственной и основной кровли и почвы пластов, отражающие различную способность пород к обрушению над очистным пространством, рис. 3.2, и-м. Расчетные методы позволяют определить шаги посадки основной и непосредственной кровель. В момент первого обрушения происходит изменение характера и значений нагрузок на опорные целики, почву, кровлю и крепь выработок. В этот период часто наблюдают сильную деформацию крепи, приводящую иногда к ее полному разрушению и завалу лав.



1 – массив; 2 – камеры; 3, 4, 5 – возрастающие зоны пластических деформаций; 6, 7, 8 – возрастающие зоны хрупкого разрушения

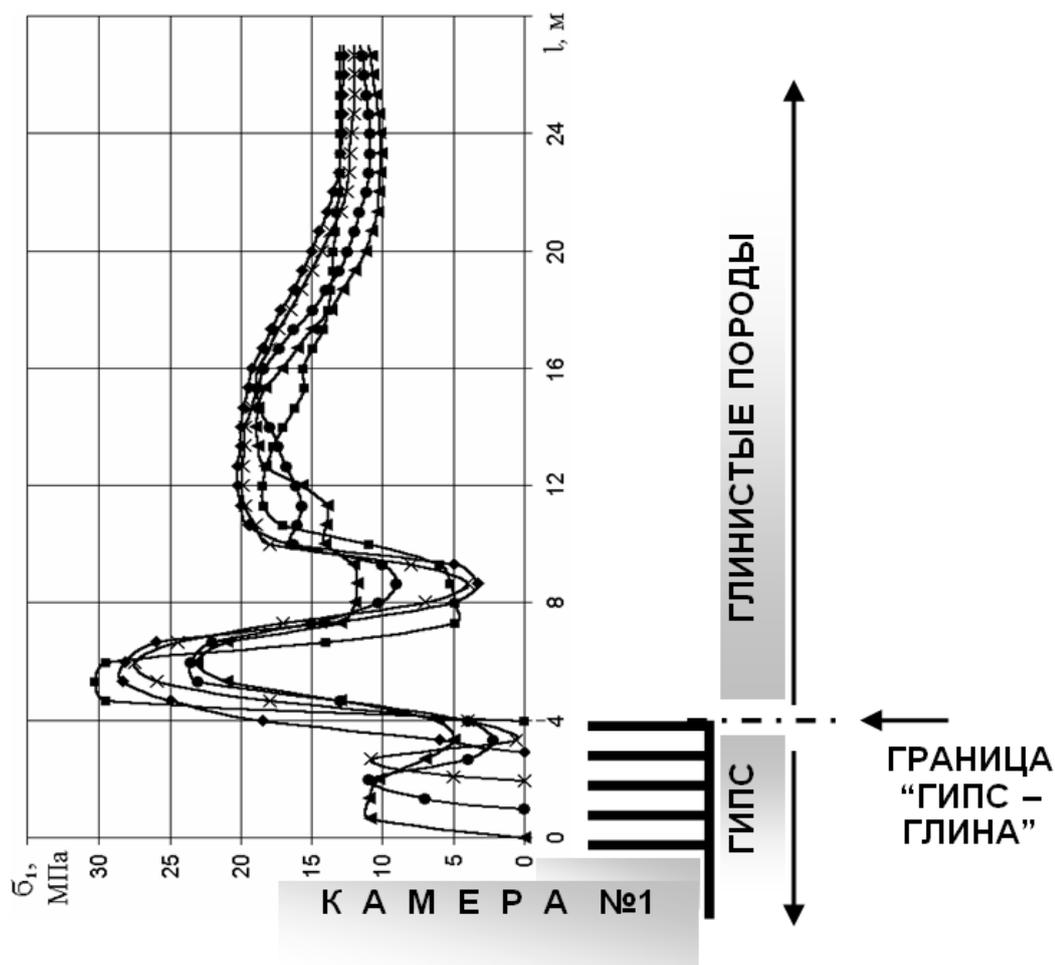
Рисунок 4.3 – Моделирование движения фронтов пластического деформирования (а) и хрупкого разрушения (б) при различных величинах прикладываемой нагрузки (черные элементы – 0,1 от полной нагрузки; серые – 0,5; светлые – полная нагрузка), в – определение главных напряжений σ_1 (МПа) вокруг камер (1-1, 2-2, ..., 6-6 – анализ целика методом сечений)

При первом обрушении трещиноватой кровли трещины разрушения пересекают естественные трещины и располагаются в основном так же, как и в не трещиноватых породах (т.е. в соответствии с характером напряженного состояния). Пролет предельного обнажения трещиноватой кровли составляет примерно 0,6-0,7 предельного пролета нетрещиноватой (цельной) кровли. При пересечении трещин, возникающих от подвижек пород, с кливажными и другими трещинами в кровле образуются отдельные глыбы, куски, отделяющиеся от остального массива и вываливающиеся в выработку (куполообразование). Поскольку объемный вес осадочных горных пород различных литотипов практически одинаков и мало изменяется с изменением трещиноватости, то такую зону при повторном нагружении можно представить зоной слабопрочных пород, см. рис. 4.1, г и рис. 4.3, а, б.

Для каждого сочетания горно-геологических условий существуют определенные размеры обнажений пород в выработках, при превышении которых выработки приходят в неустойчивое состояние. С целью уменьшения их размеров часто оставляют целики. Назначением целиков является предотвращение развития недопустимых деформаций, которые в конечном итоге приводят к разрушению массива, рис. 4.3, а, б.

Для обоснованного определения рациональных параметров систем разработки необходим анализ напряженно-деформированного состояния системы целик – очистная выработка – толща вмещающих пород. В каждом конкретном случае стремятся выявить наиболее слабое звено, устойчивое состояние которого предопределяет состояние всех остальных звеньев.

Для расчета параметров очистных выработок и целиков необходимо: установить характеристики нагрузок, действующих в массиве пород, вмещающем элементы системы разработки, размеры которых подлежат определению; по значениям нагрузок вычислить параметры вызываемых ими напряжений и деформаций в потолочинах и целиках; на основании вычисленных характеристик напряженно-деформированного состояния и сравнения их с деформационно-прочностными параметрами пород, слагающих потолочины, кровлю и целики, оценить несущую способность и устойчивость этих элементов, рис. 4.4, 4.5.



Мощность защитной пачки гипса в кровле камер:

—▲— — 4 м, —●— — 3 м, —×— — 2 м, —◆— — 1 м, —■— — 0 м

Рисунок 4.4 – Расчетные значения концентрации максимальных главных напряжений в слоистом массиве горных пород при изменении мощности защитной пачки гипса (граница «гипс – глина» находится на отметке 4 м, первые слева точки графиков находятся на контуре кровли, шкала расстояний условно неподвижна)

Массив горных пород обладает значительной потенциальной энергией, которая расходуется на их деформацию. Проведение горных выработок и строительство подземных сооружений вызывает изменение начального поля напряжений. Поле напряжений можно представить как сумму начального поля нетронутого массива, т.е. до проведения выработки, и дополнительного поля напряжений и смещений, являющегося результатом выемки породы при проведении горных работ. При выемке полезного ископаемого оно постоянно изменяется, по фронту движения очистного забоя образуется зона опорного давления. Технология ведения горных работ должна предусматривать использование энергии массива для снижения

энергоёмкости добычи полезного ископаемого. Так, при ведении очистных работ на угольных шахтах часть энергии массива расходуется на разрушение и отжим угля в призабойное пространство и снижение прочности пород кровли и почвы. [48, 116].

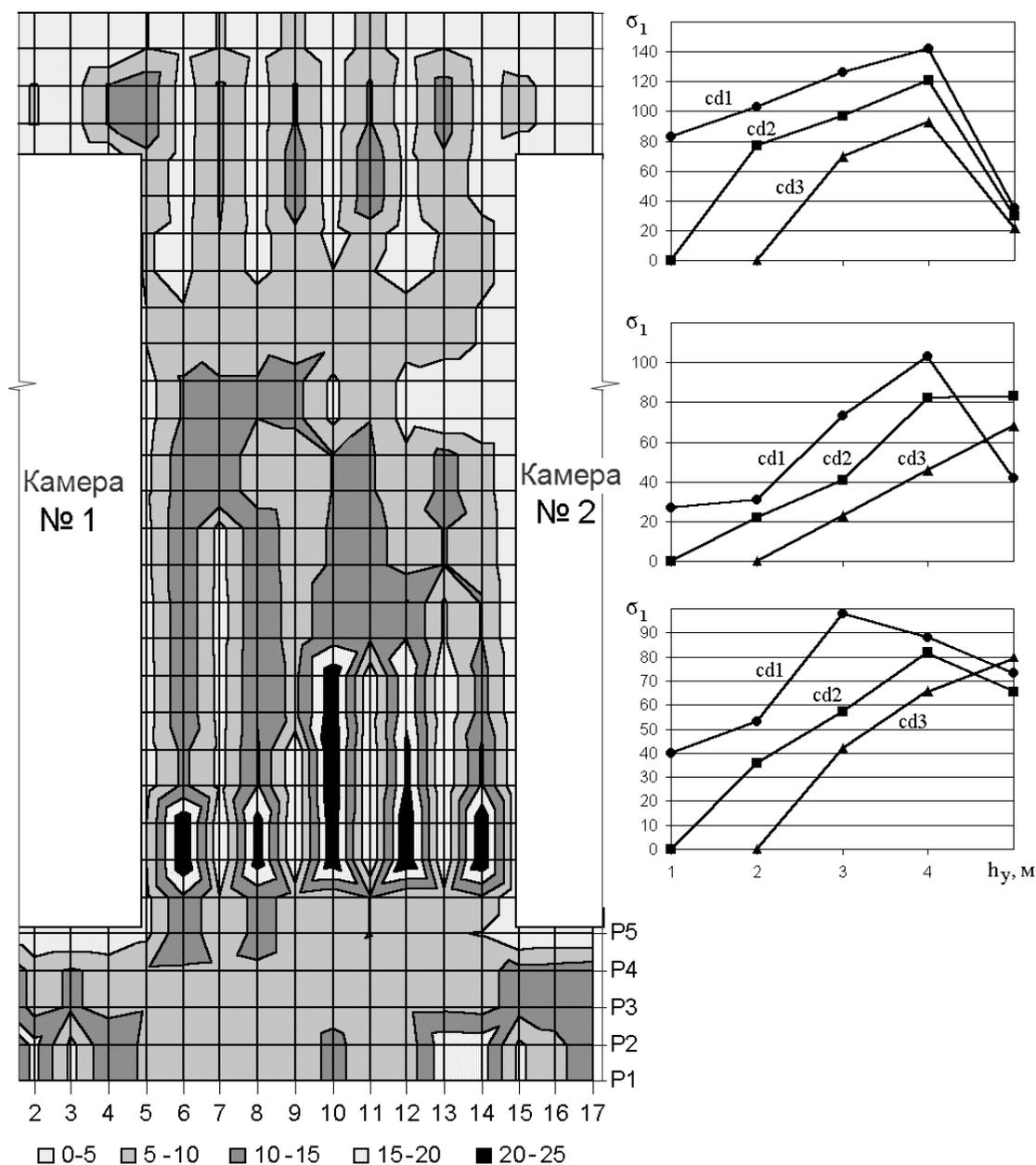


Рисунок 4.5 – Исследование максимальных главных сжимающих напряжений (σ_1 , МПа) в целике методом последовательных сечений (см. рис. 4.3, в) для целика шириной 10 м (cd1), 8 м (cd2) и 6 м (cd3)

Управление процессом освобождения внутренней энергии тесно связано с напряженно-деформированным состоянием породного массива. Проще всего управление горным давлением производится

технологическими способами: выбором направления отработки пластов и, соответственно, проходки подготовительных выработок, рационализацией схем ведения горных работ, форм подготовительных выработок и конфигурации забоев. Величину потенциальной энергии можно оценить поэлементно на основе выходных данных (распечаток) напряжений и упругих параметров горных пород. Оптимизация технологических процессов теоретически возможна, при этом энергия горного массива будет расходоваться на разрушение полезного ископаемого, что приведет к снижению себестоимости добычи, однако на практике это многофакторный трудно управляемый и трудно контролируемый процесс, поддающийся только частичной реализации.

4.3 Исследование параметров напряженно-деформированного состояния массива в условиях камерно-столбовой системы разработки в слабых горных породах и оценка их достоверности

Исследования проведены на основе универсальной расчетной схемы слоистой структуры с асимметричным сгущением сетки в местах предполагаемых высоких уровней напряжений и деформаций. Изучено напряженно-деформированное состояние элементов камерно-столбовой системы разработки гипсовых пластов, которые залегают одновременно в прочных и слабых водонасыщенных горных породах, при различных величинах заданных напряжений и заданных прочностных параметров, изменяющихся аналогично реальным слоистым структурам, см. рис. 4.4, 4.5.

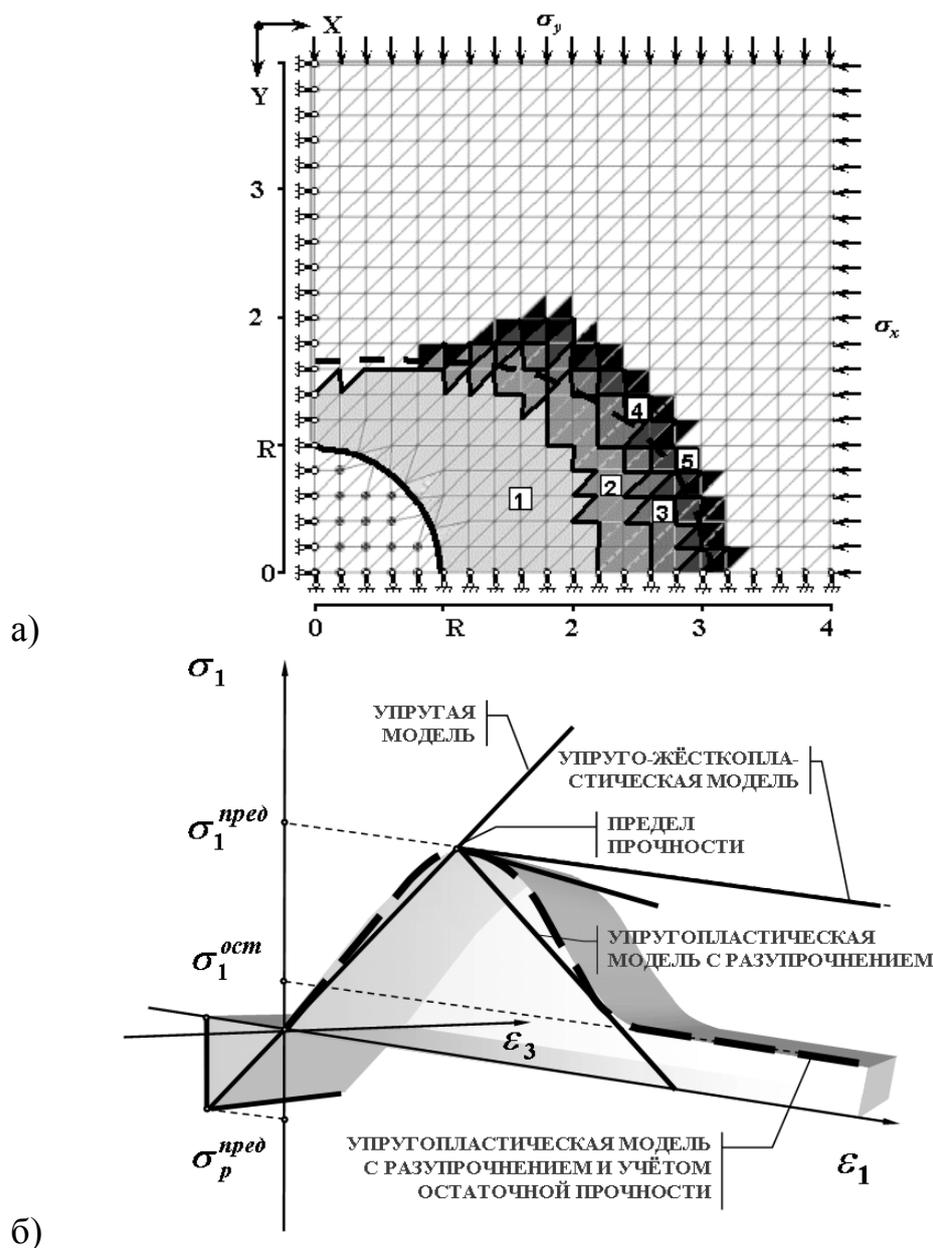
С целью определения рациональной мощности гипсовой плиты в кровле или почве камер при разработке гипсового месторождения рассмотрена задача определения напряженно-деформированного состояния в окрестности трех смежных камер. Задача решена для условий залегания гипсового пласта в слабых глинистых породах. Решение проведено методом конечных элементов в упругопластической постановке с учетом запредельного деформирования.

Рассмотрены варианты, когда глинистые породы находятся в кровле пласта или в его почве. Умышленным ужесточением условий нагружения и снижением прочностных показателей математическая модель исследуемых конструкций доводилась до полного

разрушения, что позволило изучить развитие условных зон неупругих деформаций во времени и учесть возможную потерю прочности пород от развития фильтрационных процессов и водонасыщения глинистых пород почвы.

Исходными предпосылками для изучения процессов деформирования и разрушения массива горных пород приняты общепризнанные схемы типизации пород по характеру их разрушения. При этом условно предполагается, что горные породы во время одного цикла нагружения до предела прочности деформируются упруго, а после достижения предела прочности подчиняются либо закону пластического течения, либо разупрочняются (разрыхляются) до определенного уровня остаточной прочности в зависимости от их физико-механических свойств, см. п. 4.1. Верификация программы проведена по условию тестовой задачи А.Б. Фадеева в сопоставлении с аналитическим решением Л.А. Галина, но на основе автоматизированной конечно-элементной разбивки, рис. 4.6. Как и следовало ожидать, точность повышается при больших значениях напряжений, когда в зону пластичности попадает большее количество элементов, но до начала разрушения элементов в зоне сжатия, при этом относительная погрешность не превышает 30 %, а приведенная погрешность - 10 %.

Исследуемая область размерами 70 м на 100 м выделена в слоистом массиве горных пород, который соответствует реальным горно-геологическим условиям, но для наглядности и ужесточения условий нагружения условно расположена на глубине до 200 м. С целью достаточной дискретизации объекта исследований и повышения точности расчетов, возможности исследования взаимного влияния камер, выполнено сгущение сетки в местах предполагаемых высоких уровней напряжений и деформаций. В верхней части расчетной схемы нагрузка прикладывалась дискретно, по частям и в конечном итоге соответствовала весу вышележащих пород. Высота камер изменялась от 16 м до 20 м, при этом мощность гипсовой потолочины уменьшалась от 4 м до 0 м (рис. 4.4, 4.5). Вначале ширина междукammerного целика принята равной 6 м, ширина камер – 12 м. Расчетная модель позволяла задать заранее параметры крупных тектонических нарушений, а параметры развивающейся трещиноватости исследовались последовательно при переходе от модели предыдущей стадии нагружения через фиксацию разрушения и замену прочностных параметров к последующему нагружению.



1, 2, 3 – расчетные зоны неупругих деформаций для жесткопластической модели; 4, 5 – для упругопластической модели с разупрочнением за пределом прочности (пунктиром показано теоретическое решение задачи Л.А. Галина)

Рисунок 4.6 – Сравнение зон неупругого деформирования с теоретическим решением Л.А. Галина при ступенчатом повышении нагрузки (а) и деформационные модели пород для представленных решений (б)

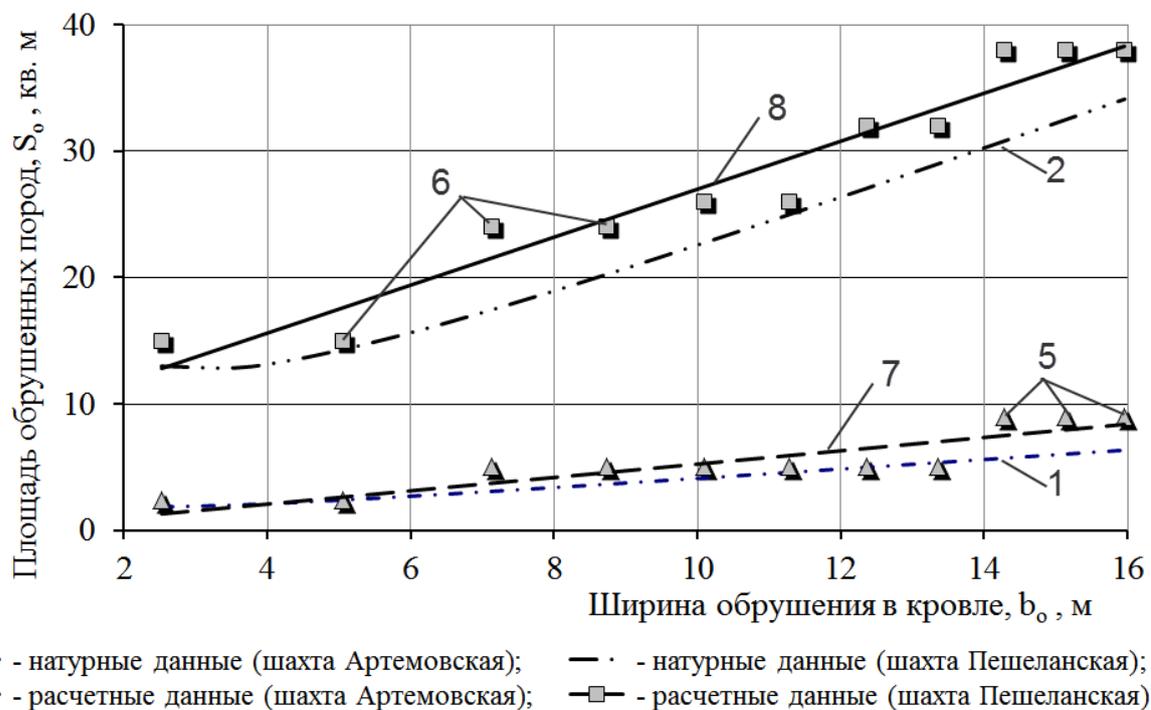
В результате решения упругопластической задачи с учетом запредельного деформирования определены параметры зон неупругих деформаций и разрыва сплошности элементов расчетной схемы для пяти вариантов изменения толщины потолочины. При последовательном уменьшении мощности гипсовой плиты в кровле камер в слабых глинистых породах отмечается изменение зон

упругих и неупругих деформаций. Зона неупругого деформирования при этом увеличивается от 14 до 36 м. Следует отметить, что такое изменение зоны деформирования свидетельствует о существенном влиянии мощности гипсовой плиты на напряженно-деформированное состояние массива. При снижении мощности гипсовой плиты до двух метров и менее отмечается фактическое отсутствие упруго деформированных элементов в глинистых породах кровли камер до глубины 4-6 м. Это предопределяет неустойчивое состояние кровли камер и возможность выдавливания пород при наличии естественной трещиноватости в защитной пачке гипса. Отмечается также пластическое деформирование междукамерных целиков. Зоны деформирования в боках камер № 1 и № 3 достигают 8-14 м. Для анализа состояния кровли центральной камеры № 2 построены графики наибольших главных сжимающих напряжений по вертикальному сечению. При снижении мощности потолочины от 4 до 1 м отмечается спад напряжений на контакте слабых и прочных пород в результате их расслоения. При этом зона концентраций напряжений имеет два максимальных значения: в гипсе - на расстоянии около 1-2 м от обнажения и в глине - на расстоянии около 1-5 м (рис.4.4). При мощности потолочины 1 м и менее наблюдается одна, но смещенная к контуру камеры зона концентрации напряжений на расстоянии 1,5-2,0 м от обнажения, при этом происходит разрушение гипсовой плиты (для условной глубины 200 м) в кровле камеры, а не только возможное отслоение на контакте слоев гипс-глина.

Можно предположить, что для этих условий наиболее рациональным будет сохранение защитной пачки гипса в кровле камер от 1 до 2 м. Это позволит при максимально возможном извлечении полезного ископаемого сохранить устойчивость кровли. При этом смещения кровли камеры составляют 0,01-0,14 м. Расчеты специально выполнены для нижней границы прочностных свойств пород. Для реальных значений прочностных свойств пород уменьшается зона влияния камер (зона пластического деформирования), однако, в отличие от предыдущего расчета, отмечается развитие зоны разрушения, что свидетельствует о преобладающей возможности хрупкого разрушения, рис. 4.3, а, б.

Исследования процесса деформирования камер проводилось вплоть до их разрушения. Анализ результатов расчетов показал, что развитие разрушений породного массива начинается от зоны

концентрации напряжений над междукамерными целиками и распространяется на массив над потолочинами камер. Сопоставление расчетных зон разрушения с результатами обобщения экспериментальных данных показало их хорошую сходимость, рис. 4.7.



1, 2 – эмпирические зависимости (по материалам обработки 67 камер); 3, 4 – расчетные данные для соответствующих условий; 5, 6 – обработка расчетных данных, полученных методом конечных элементов (шахта Пешеланская – линейная модель $S_o = 1,89b_o + 8$, коэффициент корреляции $R = 0,79$; шахта Артемовская – $S_o = 0,53 b_o$, $R = 0,87$)

Рисунок 4.7 – Сопоставление ширины и площади обрушения пород кровли камер, полученных на основе экспериментальных и расчетных данных

Таким образом, в результате исследований определен характер деформирования массива горных пород, позволяющий сделать вывод о том, что для данных типичных условий рациональным является выбор 1-2 метровой гипсовой потолчины в кровле и почве камер, что полностью подтверждается экспериментальными исследованиями. Состояние междукамерных целиков при расчетах для больших глубин неудовлетворительное. В связи с этим, при изменении глубины до 200 м необходимо увеличить ширину междукамерных целиков и уменьшить пролет камер. Целики дополнительно исследовались методами последовательных сечений и картирования, рис. 4.5.

4.4 Методические особенности учета гидрогеологических факторов при решении геомеханических задач устойчивости массива

4.4.1 Анализ особенностей решения фильтрационных задач аналитическими и численными методами

В горном деле существует обширный круг задач, который связан с фильтрацией жидкости или газа. Борьба с подземными водами при проходке стволов шахт и выработок, осушение месторождений при открытых разработках и экологическая охрана прилегающих территорий, увлажнение пластов для подавления пыли, гидроимпульсное воздействие при вскрытии выбороопасных пластов и гидроимпульсная добыча, подтопление местности при закрытии и консервации шахт – это не полный перечень гидрогеологических задач, связанных с фильтрацией водных растворов. Решение проблемы внезапных выбросов угля и газа на основе предварительной дегазации угольных пластов, вентиляция выработок и выработанного пространства связаны с фильтрацией газа [39, 107].

Задачи фильтрации переплетаются с задачами исследования напряженно-деформированного состояния, решение которых в общем виде практически невозможно, поэтому в настоящее время зачастую рассматриваются частные варианты и только в постановочном плане с определенными условными ограничениями. Даже простая постановка таких задач требует определения множества исходных параметров. Считают, что применение МКЭ только для решения задач фильтрации и теплопроводности является более естественным и наглядным, чем для решения задач механики твердого тела, однако объем публикаций, посвященных интегрированию водных потоков, относительно невелик [6, 119]. Объяснением служит относительная простота аналитических решений и высокая эффективность аналогового моделирования подобных задач [97]. Аналитически решен целый ряд основных простейших модельных задач фильтрации, правильный выбор которых часто приводит к достижению цели расчета [4, 39, 50, 64, 76, 84, 97, 108, 109].

Конечно, совершенствование ЭВМ приведет к увеличению решений МКЭ, однако проработан несколько иной подход, который отличается селективностью и скоростью принятых решений и связан

со следующими соображениями. Перераспределение полей напряжений, а, соответственно, силовых, фильтрационных, тепловых, электрических и электромагнитных полей, изменяет состав и структуру массива горных пород. Возникают зоны концентрации напряжений, зоны разгрузки, зоны дренажа воды по водопроницаемым трещинам, выщелачивания, разупрочнения и другие.

Если решается чисто гидрогеологическая задача, то, как правило, оценку естественного напряженного состояния в пределах изучаемого участка производят комплексом прямых и косвенных методов по исследованию геодинамики и геомеханики массива, которые включают в себя изучение рельефа поверхности, кливажа, трещиноватости и физико-механических свойств пород геологоразведочных скважин, геофизические исследования, а геофильтрацию определяют аналитическими или численными методами.

Как известно, при решении фильтрационных задач, как и при решении задач теории упругости, исследуемая область разбивается на элементы конечных размеров, предпочтение отдается треугольным элементам. В пределах каждого элемента градиенты напоров dH/dx и dH/dy принимаются постоянными, поэтому функция напора в пределах одного элемента может быть выражена как линейная функция декартовых координат [6]:

$$H = a_1 + a_2x + a_3y, \quad (4.3)$$

где a_1, a_2, a_3 - константы линеаризации. В матричной форме:

$$\{H\} = \begin{Bmatrix} H_i \\ H_j \\ H_k \end{Bmatrix} = [A]\{a\} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix}, \quad (4.4)$$

где $\{H\}$ - вектор напоров; $[A]$ - координатная матрица, $\{a\}$ - вектор параметров. Дифференцируя уравнение (4.3), получим выражения для градиентов напора:

$$\frac{dH}{dx} = a_2; \quad \frac{dH}{dy} = a_3. \quad (4.5)$$

$$\text{Запишем (4.3) в матричном виде } \{dH\} = [B]\{a\}, \quad (4.6)$$

где $B = \begin{bmatrix} 010 \\ 001 \end{bmatrix}$ – матрица выборки. Из уравнения (4.4) имеем

$$\{a\} = [A]^{-1}\{H\}. \quad (4.7)$$

Подставив в (4.6), получим $\{dH\} = [B][A]^{-1}\{H\}$. (4.8)

Фильтрация в грунтовом массиве подчиняется закону Дарси [64]

$$\{v'_\phi\} = [K_\phi]\{dH'\}, \quad (4.9)$$

где $\{v'_\phi\} = \begin{Bmatrix} v'_{x'} \\ v'_{y'} \end{Bmatrix}$ и $\{dH'\} = \begin{Bmatrix} dH/dx' \\ dH/dy' \end{Bmatrix}$ – векторы скоростей и соответственно

градиентов напора вдоль осей x', y' ; $[K_\phi] = \begin{bmatrix} K'_x & 0 \\ 0 & K'_y \end{bmatrix}$ – матрица фильтрационных свойств; K'_x, K'_y коэффициенты фильтрации вдоль главных направлений.

$$\{v'_\phi\} = [C] \times \{v_\phi\}; \quad \{dH'\} = [C] \times \{dH\}, \quad (4.10)$$

где $[C] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$ – матрица ориентировочная.

$$\{v'_\phi\} = [C]^{-1}[K_\phi] \times [C] \times [B] \times [A]^{-1}\{H\}, \quad (4.11)$$

где $[C]^{-1}[K_\phi] \times [C]$ для изотропной среды равно K_ϕ [4]. При этом, по аналогии с теорией упругости, считая, что дополнительная работа внешних сил равна дополнительной работе внутри контура, на основе вариационного исчисления связывают дополнительные напоры с дополнительными водопритоками через матрицу, которая аналогична матрице жесткости системы [4].

Таким образом, в изотропных средах формулировку решения плоской задачи теории упругости при решении задач методом конечных элементов и программу ее реализации с небольшой корректировкой используют для решения плоских задач фильтрации (и им подобных). Сущность этой корректировки заключается в том, что в матрице $[D]$, которая для случая плоской деформации имеет вид [6]:

$$[D] = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

а для случая плоского напряженного состояния-

$$[D] = \frac{E}{(1-\nu)(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

коэффициент Пуассона принимается равным нулю, а элемент e_{33} умножается на два (в этом случае вид матрицы не имеет значения). Далее, задавая всем узлам области нулевое перемещение по оси y и вводя вместо модуля упругости E коэффициент фильтрации K_ϕ (теплопроводности в тепловых задачах), а вместо заданных узловых сил и перемещений соответственно узловые притоки и напоры, в результате решения задачи получим вместо узловых перемещений по оси x узловые напоры, вместо деформаций ε_x градиенты напора dH/dx , вместо деформаций γ_{xy} градиенты напора dH/dy , вместо напряжений σ_x скорость фильтрации v_x , вместо напряжений τ_{xy} скорость фильтрации v_y . Параметры по оси y в результате решения задачи будут нулевыми незначащими параметрами [6]. Однако такой подход справедлив только для грунтовых массивов, поскольку даже в плотных глинах и тяжелых суглинках фильтрация возникает после превышения начального градиента, не говоря уже о горных породах (см. п. 2.1.3). Кроме того, как мы видим, математическая модель значительно упрощена, изменение прочностных параметров вовсе не учитывается.

Таким образом, более предпочтительным является вариант, когда решается механическая задача, а учет гидрогеологических условий производится как на стадии постановки задачи МКЭ, так и в процессе ее решения. На стадии постановки задачи задаются гидростатические и гидродинамические силы, которые суммируются по каждому отдельному элементу. Указанные силы заменяются эквивалентными контурными силами, приложенными вдоль границ выделенного фильтрационного потока. Замена объемных фильтрационных сил контурными приводит к удобным и простым техническим приемам учета силового воздействия подземных вод.

Кроме силового воздействия, подземные воды приводят к существенному снижению прочности глинистых пород, что необходимо учитывать заменой прочностных и упругих параметров на различных стадиях поэтапного нагружения.

В результате решения конкретной горнотехнической задачи определяются: расположение и объем зон нарушения горного массива, образованных производством горных работ; параметры водопроницающих трещин и их распространенность; зоны повышенных сжимающих и растягивающих напряжений; смещения и деформации горного массива, их направление и величина; водопроницаемость опасных зон горного массива; структура и параметры фильтрационного потока до и после производства горных работ. При этом экспериментально определяют давление жидкости или газа на наиболее опасных участках.

В дискретных пористых системах типа горных пород сжимаемость частиц скелета составляет ничтожно малую долю в общей сжимаемости среды [119], поэтому без заметной погрешности можно считать, что объемная деформация пористой среды равна изменению объема порового пространства, заполненного жидкостью и газом.

В качестве оценочных параметров изменения фильтрационных свойств и структуры надугольного массива используют значения удельного водопоглощения и модуля трещиноватости, определенного по видеокаротажным диаграммам в соответствии с интервалами нагнетаний воды. Водопроницаемость является функцией трещиноватости, она в большей степени зависит от раскрытия, густоты, протяженности и заполнителя трещин и в меньшей - от извилистости и шероховатости [50].

4.4.2 Исследование фильтрационных процессов на основе оценки разрыхления грунтовых и породных массивов, плотин и откосов

Последовательность решения геомеханических задач включает в себя аналитические и экспериментальные исследования. Породный массив, включающий водонасыщенные породы, рассматривается как единая гидрогеомеханическая система. Воздействие шахтных вод вызывает существенные деформации отдельных участков массива пород, набухание глинистых фракций и выщелачивание скальных и

прочных осадочных пород. Однако, на наш взгляд, следует отдельно остановиться на дополнительных возможностях, которые представляет численный метод конечных элементов при решении фильтрационных задач в режиме реального времени, т.е. в плане хотя бы и приближенного, но экспрессного получения первичных результатов. Такой подход до настоящего времени не рассмотрен в литературе.

С точки зрения безопасности и охраны шахты в целом, предупреждения внезапного прорыва шахтных вод (такие прорывы произошли, например, на рудниках №1 и №2 ГГХП «Полиминерал», г. Стебник, когда были полностью затоплены целые рабочие горизонты, на СУБРе (Россия), когда была полностью затоплена целая шахта) наиболее важными параметрами являются объемы воды, которые содержатся в водоносных горизонтах, пустотах, трещиноватых зонах, подземных или наземных водохранилищах, реках, озерах, водоотводах и т.д., а также водопропускная способность соединяющихся водопроницаемых полостей. Метод конечных элементов позволяет на основе методов частичного и избыточного нагружений, а также метода последовательных итераций определить последовательные первичные разрушения элементов, т. е. зоны образования будущих водопроводящих трещин и щелей. В образовании первичных трещин доминирующую роль играют механические напряжения, так как механические нагрузки (возмущения) распространяются со скоростью упругих волн, а фильтрационные напряжения (суффозия, выпор) ввиду преобладающей линейности процессов фильтрации (просачивания) в грунте или породе, турбулентное движение воды возможно только в условиях свободного движения, - изменяются монотонно и непрерывно и только ускоряют процесс разрушения. Поэтому изначально фильтрационные процессы менее динамичны, учитывая еще и малый коэффициент расширения воды при разгрузке, чем процессы сдвижения и обрушения пород, тем более газодинамические процессы. Кроме того, на фильтрационные процессы накладываются инерционные процессы размокания и разрыхления пород, которые не однозначны по отношению к развитию фильтрации.

Поскольку решение плоских задач фильтрации в изотропной среде с применением МКЭ сводится с небольшой корректировкой к аналогичному решению плоской задачи теории упругости и только в

изотропной среде (раздел 4.4.1), при этом механические параметры среды уже не учитываются, вместо узловых сил и перемещений действуют узловые притоки и напоры, а в осадочных горных породах явление фильтрации возникает лишь тогда, когда величина градиента напора превышает начальный градиент, то решение фильтрационной задачи целесообразно выполнить в другой последовательности и в два этапа: сначала необходимо определить зоны разрушения элементов, а затем произвести расчет возможных водопритокков.

Анализ зон разрушения позволяет оценить пути фильтрации водных потоков и объемы возможных водопритокков, включая объемы водоносных пластов и зон накопления воды. Объемы воды легко вычислить по суммарной площади разрушенных элементов и по среднему для зоны коэффициенту разрыхления или объемной пористости горных пород. Будем считать, что зоны разрушения состоят из элементов, у которых разрушились одна, две или три связи. Каковы бы ни были три точки $A(x_1, y_1)$; $B(x_2, y_2)$; $C(x_3, y_3)$, площадь треугольника ABC вычисляется по формуле:

$$S_1 = \pm \frac{1}{2} \left[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) \right]. \quad (4.14)$$

В формуле берут знак "+", когда выражение в квадратных скобках положительно, и знак "-", когда оно отрицательно, т.е. значение площади всегда положительно по модулю. Площадь зоны равна сумме площадей разрушенных треугольников

$$S_3 = \sum_{i=1}^n |S_i|. \quad (4.15)$$

Если произвести расчеты зон разрушений нескольких сечений, то предполагаемый объем накопления воды равен произведению объема зоны фильтрации на коэффициент, характеризующий величину открытой пористости и трещиноватости:

$$V_6 = V_3 K_{on} = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i| + 2 \sum_{i=1}^m |S_i| + \dots + \sum_{i=1}^k |S_i|}{2} \times L_3 K_{on}, \quad (4.16)$$

где V_6 и V_3 - объемы воды и водонасыщенной зоны; K_{on} - коэффициент открытой пористости; L_3 - длина зоны.

Следует отметить, что количество разрушенных элементов в зонах по сечениям в общем виде будет различно и новая нумерация может не совпадать с изначальной нумерацией элементов.

В соответствии с полученными результатами по определению зон разуплотнения и разрушения породного массива фильтрационные потоки рассчитываются по известным методикам [76]. На основании этих данных осуществляется прогноз ожидаемых водопритоков и изменения напряженно-деформированного состояния массива, разработка мероприятий по повышению устойчивости горнотехнических сооружений.

Таким образом, постановка гидрогеомеханической задачи сводится к установлению исходных параметров фильтрации и напряженного состояния породного массива в следующем порядке: определяются физико-механические и фильтрационные свойства породы, структура фильтрационных потоков и их параметры, граничные условия в потоках подземных вод; разрабатывается расчетная схема и принимается геомеханическая модель породного массива с учетом гидрогеологии участка; выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния. В результате решения определяются зоны разрушения массива, параметры водопроводящих трещин и их распространенность, зоны повышенных сжимающих напряжений, смещения и деформации массива пород. В зависимости от поставленной задачи производится прогноз ожидаемых водопритоков и устойчивости горнотехнических сооружений, разрабатываются технологические мероприятия по предупреждению негативных проявлений и определяются наиболее опасные участки для установки датчиков геофизического мониторинга.

4.4.3 Разработка методики экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния геоматериалов в сложных горно-геологических условиях

Строительство и эксплуатация шахт, рудников, наземных и подземных сооружений требует сохранения устойчивости самих объектов, а это возможно только при своевременном проведении ремонтно-восстановительных работ. Горные работы формируют новый техногенный режим подземных вод, который определяется

тем, что контурами разгрузки водоносных горизонтов становятся выработки и дренажные объекты. Вследствие этого изменяются направления водных потоков и увеличиваются их градиенты. Усиленное дренирование водоносных горизонтов интенсифицирует развитие гидрогеологических процессов в массивах пород и грунта, при этом происходит проседание поверхности земли, разрушение сооружений, в частности капитальных и подготовительных выработок, бортов карьеров и откосов плотин, что часто приводит к непоправимым горнотехническим и экологическим последствиям. В настоящее время не менее важным является обеспечение экологической безопасности при закрытии шахт, в особенности в равнинной местности, где происходит ее заболачивание.

Интенсивная отработка месторождений в сложных горно-геологических условиях предопределила необходимость применения расчетных методов экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния геоматериалов в обнажениях на основе данных геоконтроля с целью обеспечения безопасности производства и его рентабельности. Среди методов геоконтроля наиболее информативными и экономичными являются геофизические, в частности электрометрические методы определения трещиноватости пород. Кроме того, в настоящее время системы сбора и обработки информации на основе персональных ЭВМ – самый быстрорастущий сектор мониторинга технологических и геомеханических процессов и управления ими. Однако, как мы видим, внедрение в практику горного дела прогрессивных методов и средств контроля и управления горным давлением сдерживается отсутствием высокопроизводительных средств сбора, ввода и обработки информации, унифицированных расчетных схем и апробированных методик оценки состояния геоматериалов в обнажениях.

Таким образом, задача экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг геотехнических объектов включает в себя исследования геомеханических процессов на основе математического моделирования, решение конкретных задач оценки состояния пород и прогноза устойчивости объекта методами геомеханики и инженерной геологии и проведение контрольных экспериментальных геофизических измерений.

Как уже отмечалось, в сложных горно-геологических условиях расчеты напряженно-деформированного состояния рационально

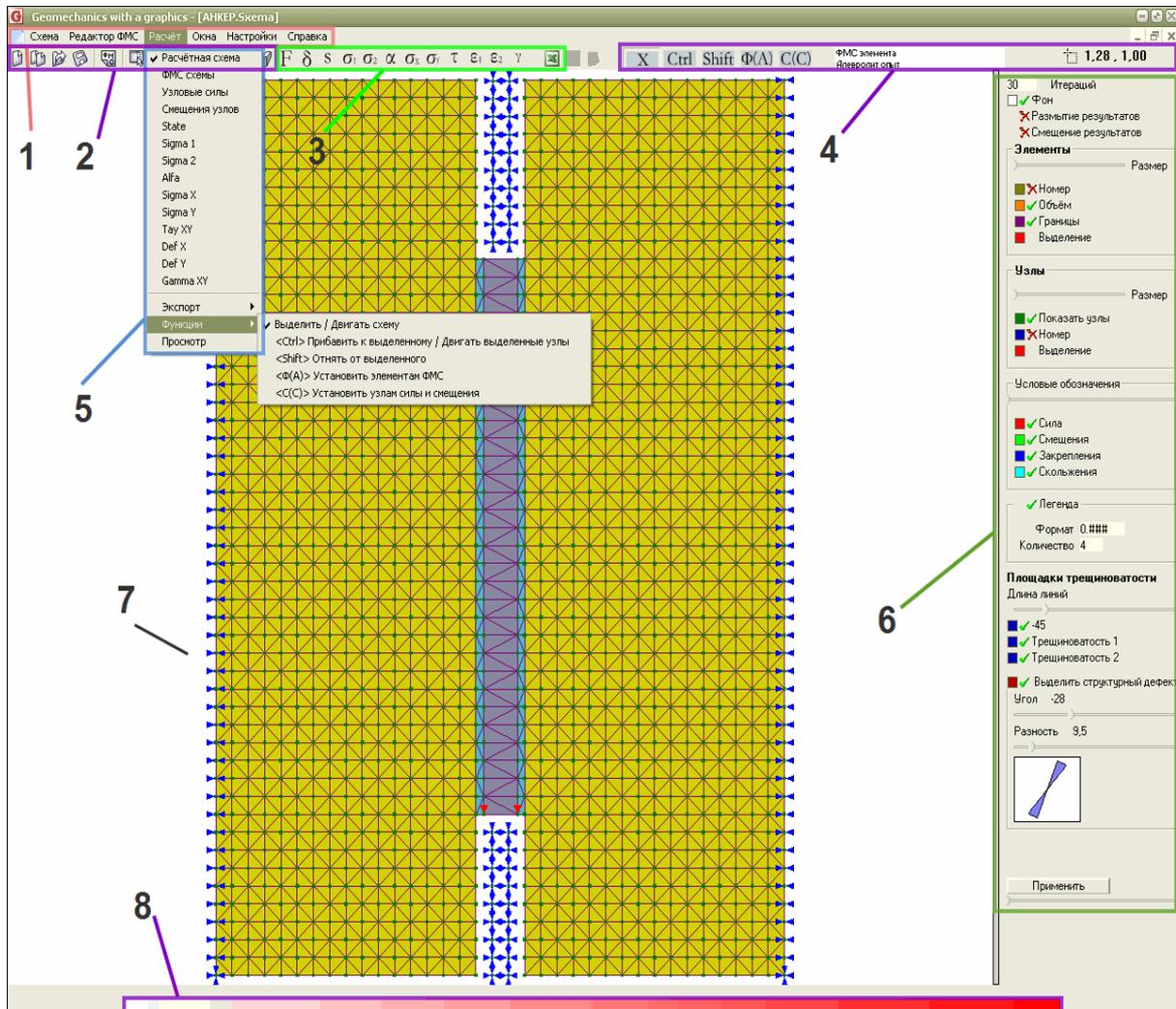
производить наиболее наглядным и широко апробированным на инженерном уровне методом конечных элементов, который позволяет описать трансверсально-изотропную область любого очертания, и при этом сохраняется соответствие математической модели физическим процессам, реально происходящим в массиве. Современные программы позволяют оперативно оценить напряжения, исследовать равновесие системы и определить условия их устойчивости в режиме реального времени, однако подготовка исходной информации достаточно трудоемкий процесс, требующий проведения множества простых вычислений, построений и проверок. Разработанные программы автоматизированного ввода и расчета напряженно-деформированного состояния вокруг геотехнических объектов сложной конфигурации полностью решают расчетную часть задачи экспресс-оценки в целом, рис. 4.8 (программная реализация алгоритмов и интерфейсов системы ввода и обработки геотехнической информации выполнена А.И. Слащевым).

Создана система управления геомеханическими базами данных и результатами расчетов для оперативного расчета состояния массивов осадочных горных пород и грунтов. Комплекс программного обеспечения состоит из трех основных блоков, каждый из которых составляет самостоятельный многофункциональный объектно-ориентированный программный модуль, выполняющий определенный круг задач.

Блок ввода геомеханической информации позволяет оперативно создавать модели исследуемой области произвольного очертания и начального напряженного состояния. В результате добавления совокупности физико-механических свойств среды генерируется законченный числовой массив и формируется файл исходных данных. При этом все сложные операции максимально автоматизированы, что позволяет пользователю максимально сократить время на подготовку данных.

Блок расчета напряженно-деформированного состояния выполняет численную реализацию исходной расчетной схемы, сохраняя при этом равновесие внутренней энергии исследуемой области. Кроме того, выполняются функции контроля субъективных ошибок оператора. Однако основная функция возложена на анализ получаемой информации, реализованный в блоке обработки выходной информации. Совокупность средств и методов обработки данных позволяет выполнять прогноз геомеханических явлений,

рассчитывать конструкции и сооружения. Реализовано две системы в Mathcad и MS Excel.



1 – меню; 2 – панель быстрого доступа управления файлами данных и редактором физико-механических свойств пород; 3 – панель управления результатами расчетов, 4, 5 – основная и дублирующая панели корректировки расчетных схем; 6 – панель управления интегральными параметрами НДС модели; 7 – окно вывода результатов; 8 – дифференцированная цветовая панель

Рисунок 4.8 – Интегрированный интерфейс разработанного программного комплекса для расчета параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород

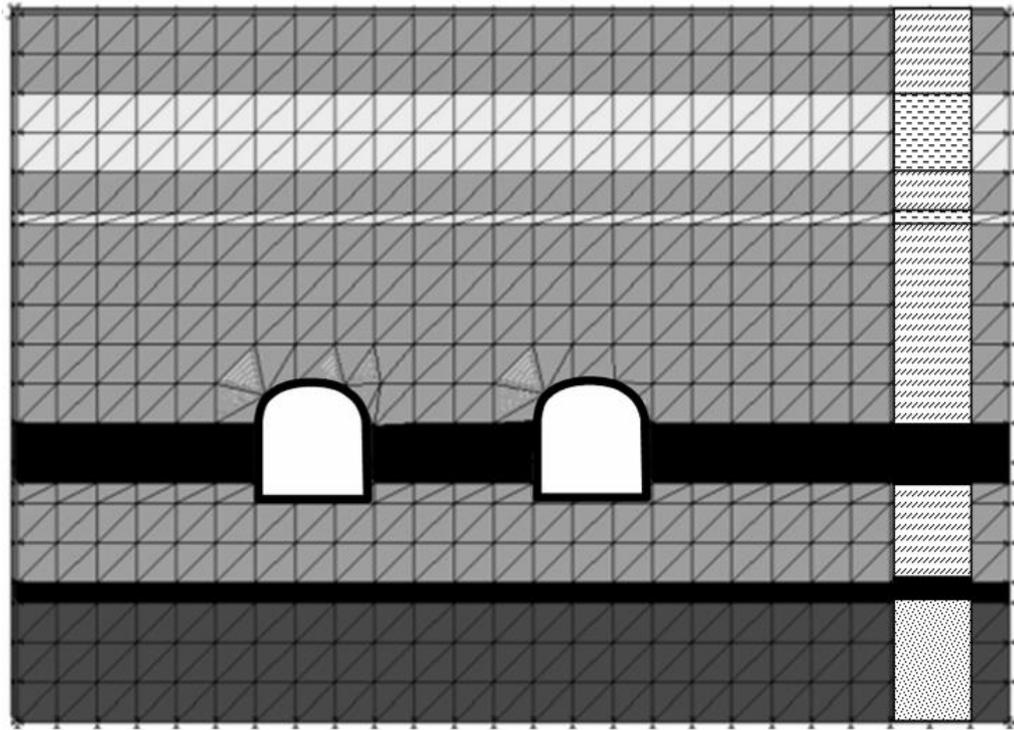
Программа автоматизированной подготовки расчетных схем с заранее выбираемыми параметрами позволяет исследовать многовариантные результаты принятых решений в сложных горно-геологических условиях пологих, наклонных и крутых пластов (слоистые структуры; слоистые, произвольные и поэлементно

ослабленные зоны). Она включает собственный каталог физико-механических свойств с возможностью их изменений и дополнений, производит автоматизированное изменение граничных условий с глубиной, дает возможность поузлового изменения нагрузок и перемещений непосредственно с помощью монитора для имитации нагрузок и отпора крепи.

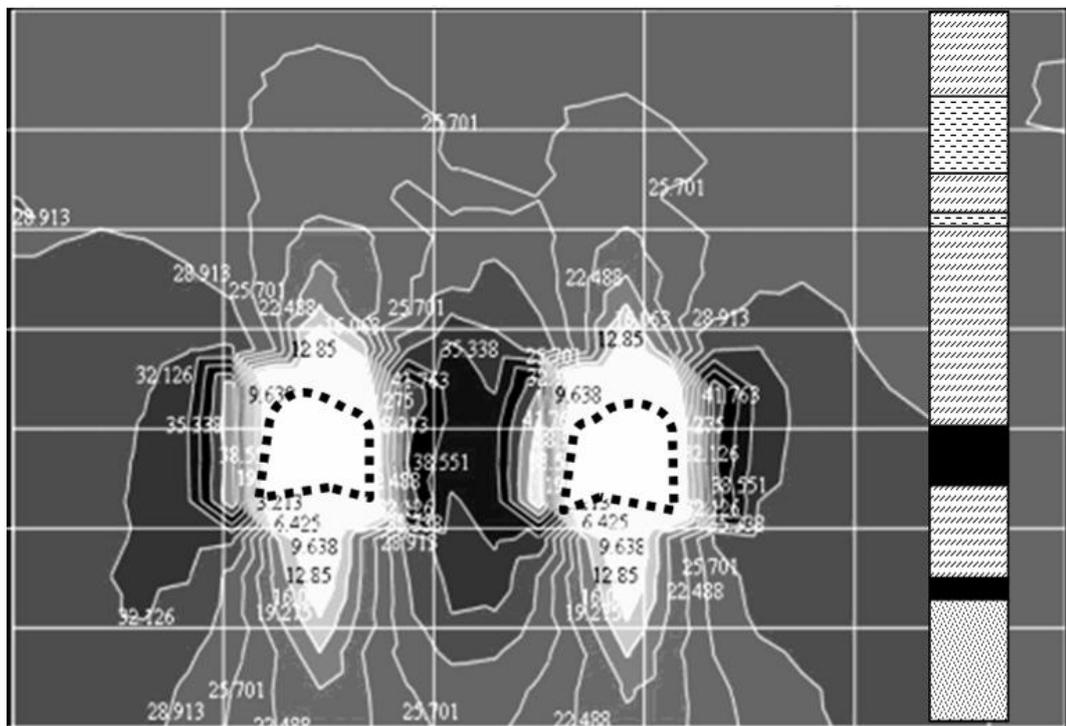
В настоящее время накоплен весьма обширный фактический материал по определению физико-механических свойств образцов горных пород, кроме этого, можно использовать известные корреляционные зависимости для определения основных прочностных параметров различных горных пород, в том числе и осадочных, которые наиболее подвержены влиянию гидрогеологического фактора, в частности размоканию. Зону или прослой любой конфигурации, пониженной или наоборот повышенной прочности, можно задать непосредственно мышкой на мониторе компьютера и одновременно оценить их влияние на устойчивость сооружения, то есть на изменение геомеханической обстановки вокруг геотехнического объекта.

При разработке расчетной схемы выдерживается геометрическое и физическое подобие к реальному геотехническому сооружению. Геометрическое подобие определяется выбранным масштабом моделирования, рис. 4.9, 4.10. Для каждого элемента задаются реальные физико-механические свойства с учетом их водопроницаемости и размокаемости по данным инженерно-геологического опробования. Конфигурация контура подготовительной выработки до необходимой формы доводится также вручную с помощью мышки и монитора, рис. 4.9, а. Необходимую мощность угольного пласта, непосредственной почвы и кровли можно задать изменением толщины слоев, рис. 4.10. Картирование результатов конечно-элементной модели улучшает их визуальное восприятие и упрощает их анализ, рис. 4.9-4.12.

Экспериментальные исследования показали (раздел 2), что глинистые породы размокают полностью, поэтому по аналогии с остаточной прочностью, которая присуща в области сжатия породному массиву, находящемуся в трехмерном напряженном состоянии, их прочность во влагонасыщенном состоянии можно ограничить одной третьей частью начальной прочности [119]. Прочность песчаников и песчаных сланцев можно определить по корреляционному уравнению (раздел 2).

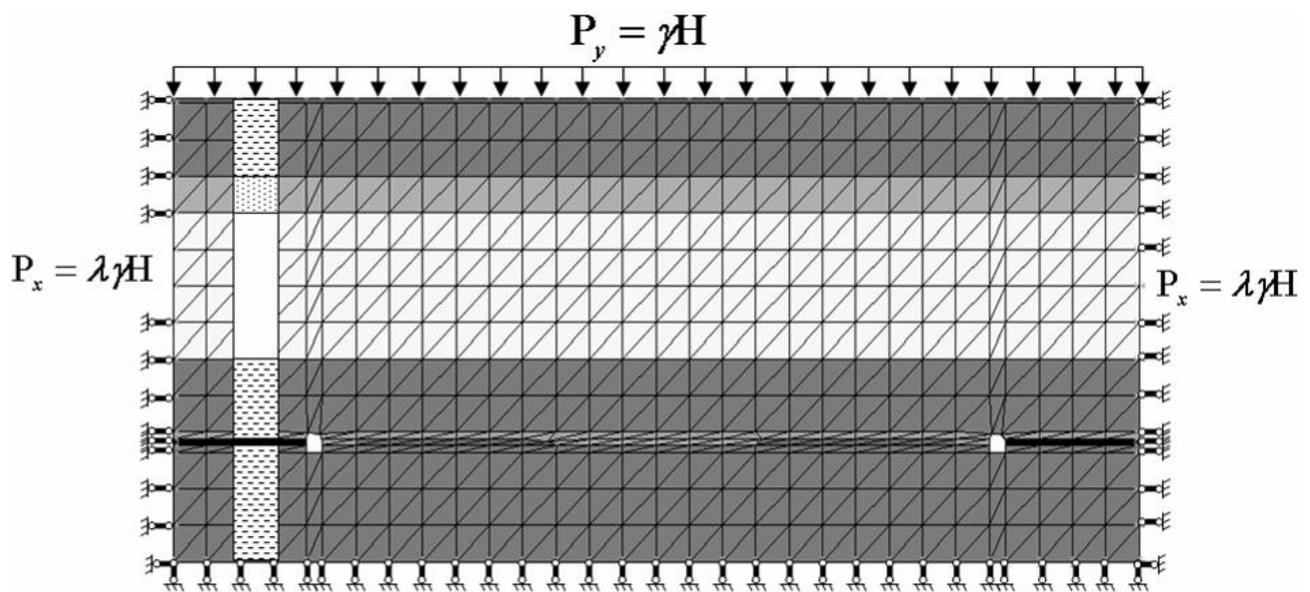


а)

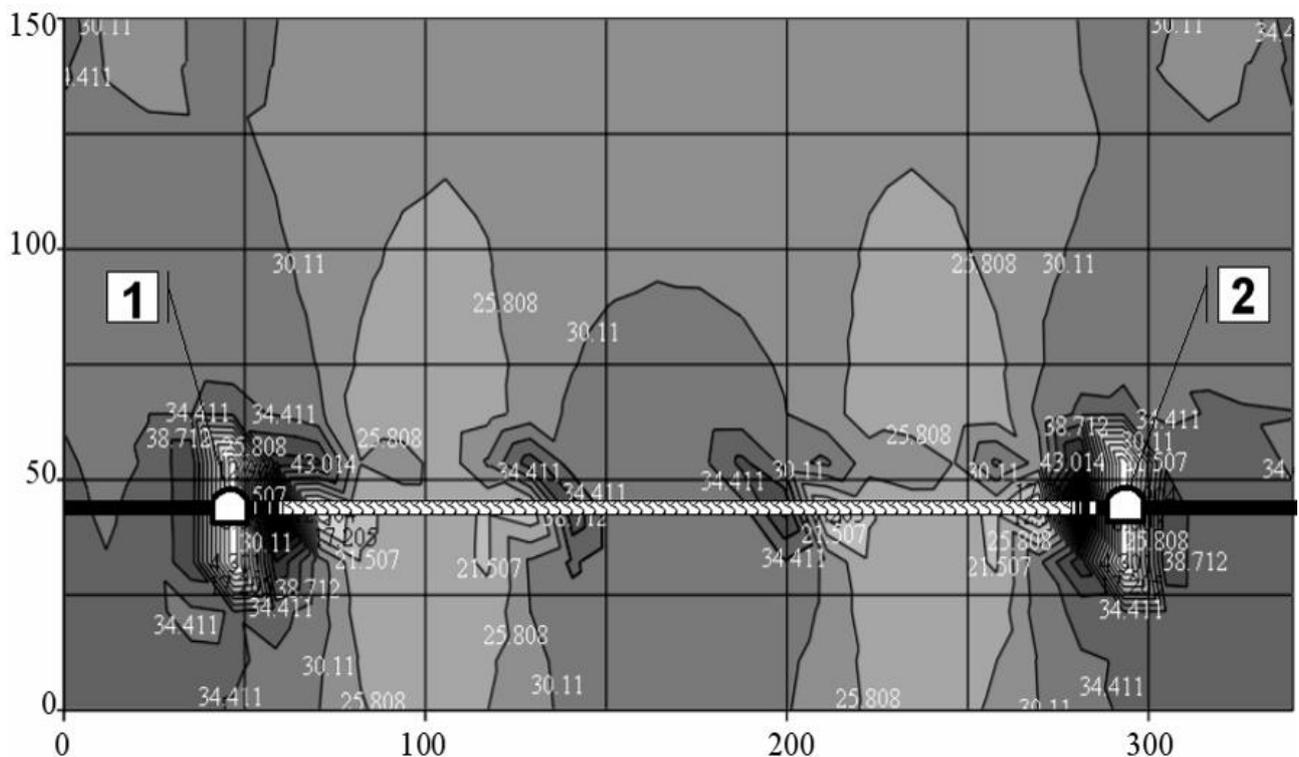


б)

Рисунок 4.9 – Автоматизированное построение расчетной схемы (а) и математическая обработка значений максимальных главных напряжений в MathCAD (б) для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг сближенных выработок



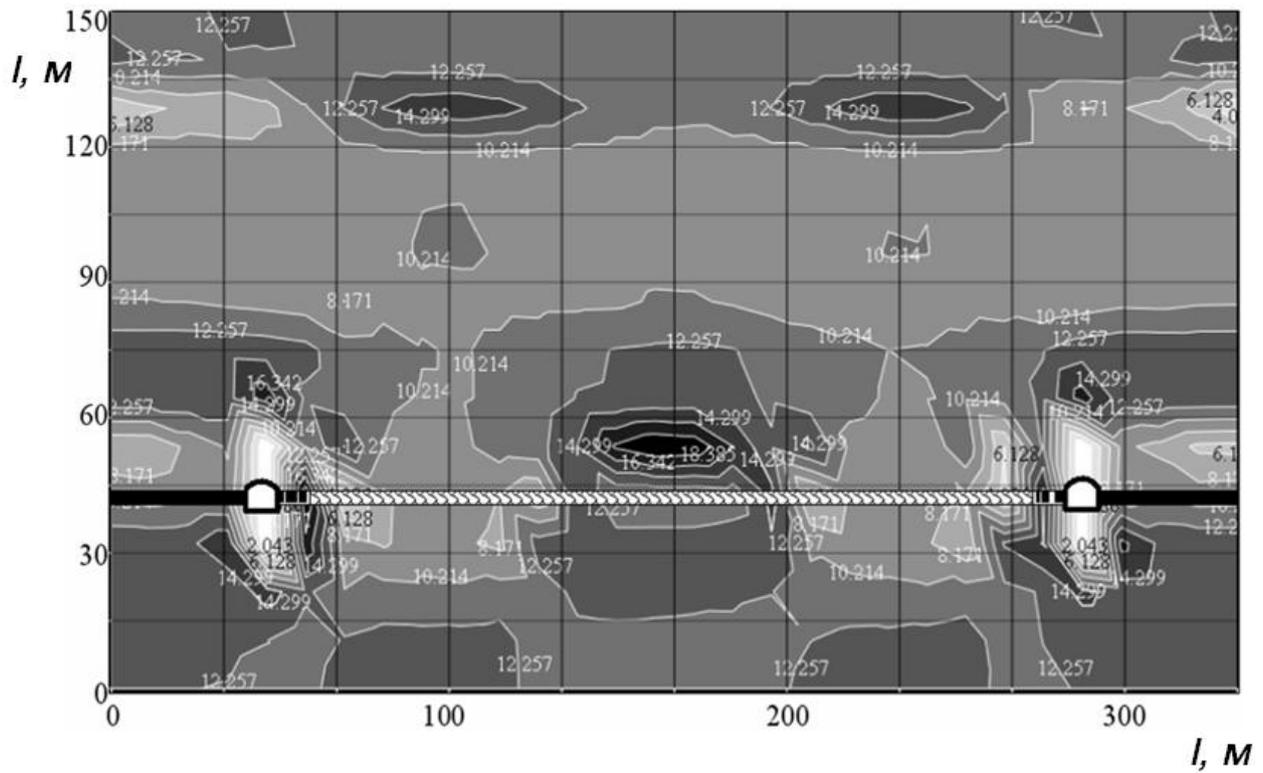
а)



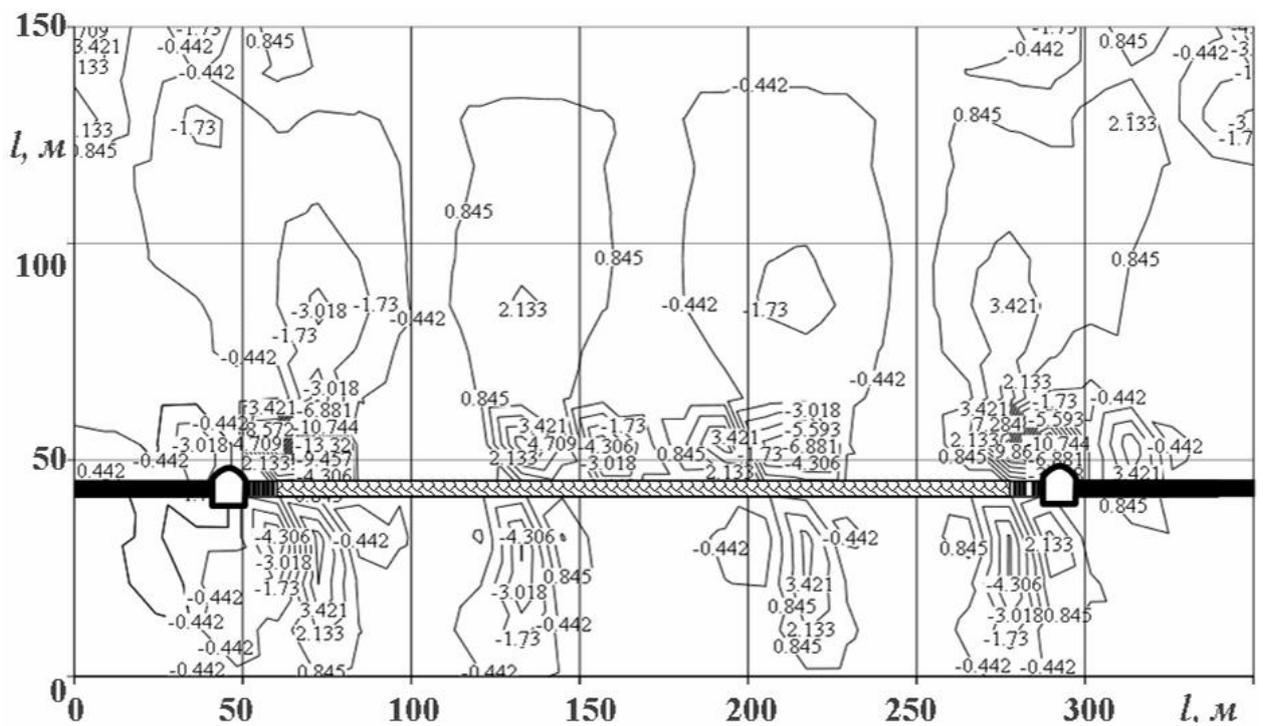
б)

1 – вентиляционный штрек; 2 – конвейерный штрек

Рисунок 4.10 – Применение методики для исследования состояния породного массива вблизи лавы: а – расчётная схема; б – карта максимальных главных напряжений σ_1 в выработанном пространстве после посадки основной кровли

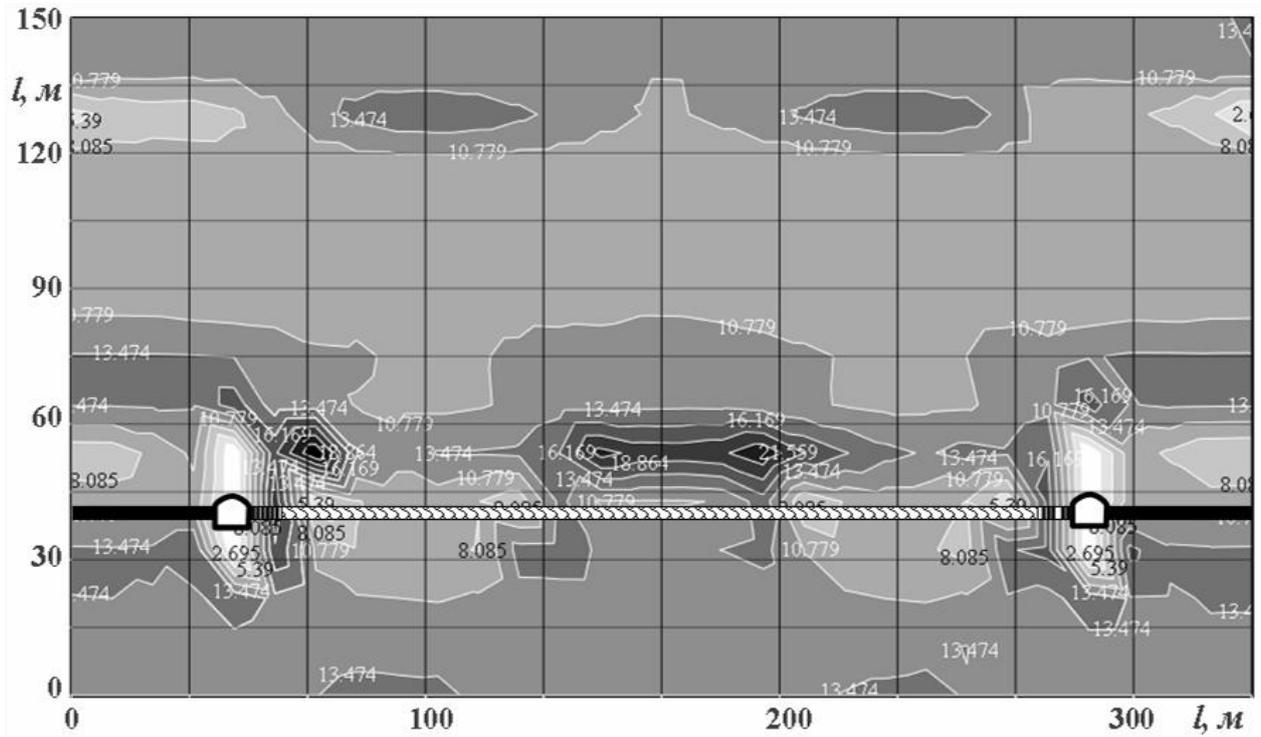


а)

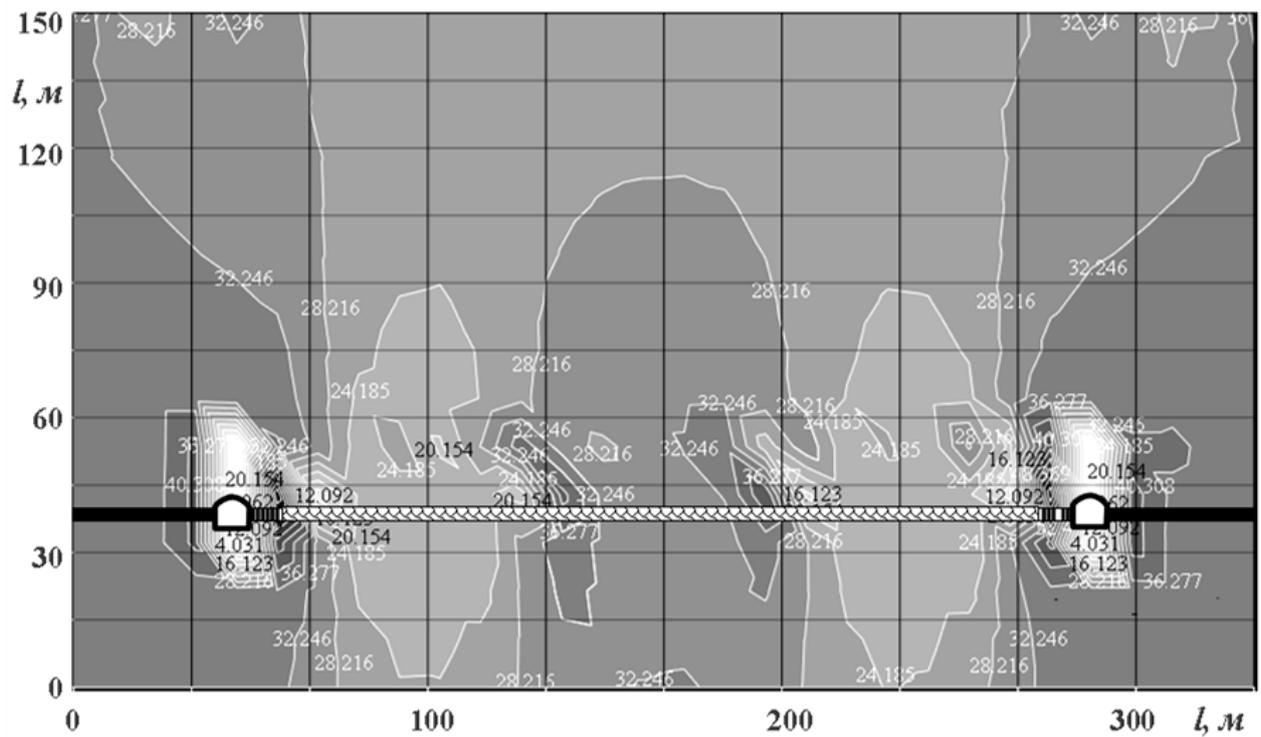


б)

Рисунок 4.11 – Определение полей минимальных главных напряжений σ_2 (а), касательных напряжений τ вокруг очистного забоя после прохода лавы, МПа



а)



б)

Рисунок 4.12 – Определение полей осевых напряжений σ_x (а) и σ_y (б) вокруг очистного забоя после прохода лавы, МПа

Породный массив, включающий водонасыщенные породы, рассматривается как единая гидрогеомеханическая система. Воздействие шахтных вод вызывает существенные деформации отдельных участков массива пород, набухание глинистых фракций и выщелачивание скальных и прочных осадочных пород, что можно задать как измененными физико-механическими свойствами пород, так и дополнительными их смещениями.

Постановка гидрогеомеханической задачи сводится к определению исходных параметров фильтрации и напряженного состояния массива в следующей последовательности: устанавливаются параметры естественного поля напряжений исследуемого участка; определяются физико-механические свойства горных пород, структура возможных фильтрационных потоков и их параметры; разрабатывается расчетная схема и выбирается геомеханическая модель массива с учетом гидрогеологии участка и конкретных граничных условий; выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния массива численными методами; производится корректировка расчетной схемы с введением данных натурных измерений. В соответствии с полученными результатами по определению зон разуплотнения и разрушения породного массива фильтрационные потоки рассчитываются по известным методикам и руководствам [4]. На основании этих данных осуществляется прогноз ожидаемых водопритоков и напряженно-деформированного состояния массива, разработка мероприятий по повышению устойчивости горнотехнических сооружений.

В алгоритм решения заложены упругая, деформационная упругопластическая модель среды и среда с разупрочнением как представляющие наибольший интерес для практического решения горных задач. Для описания этих моделей достаточно обычного набора механических характеристик, полученных при инженерно-геологических исследованиях. Упругая модель реализуется заложением прочных пород (метод фиктивных параметров) или частичным последовательным ее нагружением, но при одной итерации. Упругопластическое решение достигается методом последовательных итераций с полным или умышленно высоким нагружением.

Технология отработки косвенно учитывается последовательностью технологических операций, реальной для данных условий скоростью их изменения, например, шагом и

временем посадки непосредственной и основной кровли. Кроме этого, скорость протекания технологических процессов можно учесть по принципу обратной связи на основе визуальных наблюдений или экспериментальных измерений относительно стабильных стадий разрушения, определенных на основе данных геофизического контроля, в частности электрометрии.

4.5 Выводы по разделу

В условиях гидростатического сжатия горные породы могут быть подвержены любому напряженному состоянию, однако, при не равнокомпонентном напряженно-деформированном состоянии величина касательных напряжений ограничивается прочностными свойствами среды. Деформации горных пород под действием растягивающих напряжений особенно характерны для поверхностных зон сползающих откосов, а также для толщ горных пород, оседающих над выработанным пространствами при подземной выемке полезного ископаемого. В представленном комплексе метода конечных элементов предельные напряжения в области растяжения ограничиваются пределом прочности на растяжение. Реализация упругопластической модели среды достигается совмещением метода конечных элементов с модифицированным методом Ньютона-Рафсона (начальных напряжений). Наибольший интерес в плане исследования физических процессов разрушения породного массива вокруг геотехнических объектов представляет упругопластическая модель среды с разупрочнением за пределом прочности. Предельное напряжение в области сжатия ограничивается пределом прочности на сжатие (4.1), при $\varepsilon_I^y \leq \varepsilon_I \leq 3\varepsilon_I^y$ запредельная величина прочности определяется уравнением (4.2), при еще большей деформации – заменяется на остаточную прочность, равную $\sigma_1^{ост} = \sigma_1/3$.

Решение гидрогеомеханической задачи выполняется в следующей последовательности: определяются физико-механические свойства пород, структура фильтрационного потока и его параметры; разрабатывается расчетная схема и выбирается геомеханическая модель массива с учетом гидрогеологии участка и конкретных граничных условий; выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния массива; производится корректировка расчетной схемы с учетом данных натурных измерений.

Поскольку решение задач фильтрации с применением МКЭ может быть сведено с небольшой корректировкой к аналогичному решению задачи теории упругости для изотропной среды (механические параметры среды уже не учитываются, а вместо узловых сил и перемещений действуют узловые притоки и напоры) и учитывая факт, что в осадочных горных породах явление фильтрации возникает лишь тогда, когда величина градиента напора превышает начальный градиент, то решение фильтрационной задачи целесообразно выполнить в другой последовательности и в два этапа: сначала необходимо определить зоны разрушения элементов, а затем произвести расчет возможных водопритокков. Для данной технологии моделирования получены аналитические зависимости оценки накопления или высвобождения возможных объемов воды в зонах разрушения при изменяющейся величине приложенной нагрузки.

Разработана методика экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг геотехнических объектов, учитывающая изменения электропроводящих свойств геоматериалов под воздействием гидрогеологических факторов, отличающаяся автоматизированным вводом и обработкой исходной информации на ЭВМ в режиме реального времени при расчетах методом конечных элементов конкретных объектов на основе средних значений параметров собранного банка исходных данных для соответствующих горно-геологических условий и учетом стадии разрушения объекта на базе геомеханического мониторинга.

Учет гидрогеологических условий производится как на стадии постановки задачи МКЭ, так и в процессе ее решения. На стадии постановки задачи задаются гидростатические силы, которые заменяются эквивалентными контурными силами, приложенными вдоль границ выделенного фильтрационного потока. Замена объемных фильтрационных сил контурными приводит к удобным и простым техническим приемам учета силового воздействия подземных вод. Кроме силового воздействия учитывается существенное снижение прочности глинистых пород при водонасыщении. В результате решения конкретной горнотехнической задачи определяются: расположение и объем зон нарушения горного массива, образованных производством горных работ; зоны повышенных напряжений; водопроницаемость опасных зон горного массива; структура и параметры фильтрационного потока.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВОГО РЕЖИМА И ПЕРЕХОДНЫХ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ДОБЫЧНЫХ УЧАСТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

5.1 Геомеханические и фильтрационные процессы в породном массиве как основа формирования газового режима добычных участков

Повышение эффективности схем проветривания при ведении горных работ невозможно без изучения деформационных процессов, как одного из основных факторов, влияющих на газовыделение в выработки. Как показывает практика, частые нарушения газового баланса шахт и, как следствие, возникновение аварийных ситуаций связано именно с недооценкой влияния деформации горных пород на процессы фильтрации газа. При этом вклад напряженно-деформированного состояния породного массива в газодинамические процессы еще недостаточно учтен и аргументирован. Это, прежде всего, связано с недостаточной изученностью определяющих физических явлений, происходящих в реальной породной среде.

Многолетний опыт эксплуатации выемочных участков показывает, что вместе с разгрузкой толщи угля от напряжений происходит значительная активизация процесса газопереноса, влияющая на дегазацию и снижение давления газа в угольных пластах, попавших в зону разгрузки. Это, прежде всего, относится к месторождениям угля на больших глубинах, где при отсутствии надработки или подработки особенно заметно проявляются силы горного давления.

Вполне очевидным является то, что дегазация угольного пласта и снижение давления газа в нем не могут происходить сколько-нибудь заметно в результате только одного упругого сброса нагрузки на породы междупластья. Данное положение подтверждено результатами многочисленных натуральных экспериментов [16, 43], которые показали, что при защитной подработке или надработке угольных пластов, опасных по внезапным выбросам, значительное снижение давления газа в угле происходит практически почти сразу же после прохождения лавы, а в некоторых случаях – еще и до подхода лавы.

В прилегающем к добычному участку породном массиве происходят деформационные процессы – расслоение толщи, деформация изгиба слоев, а также множественные разрушения, которые в целом и определяют фильтрационную (газопроводящую) способность породной толщи. При подработке пород наличие такой деформационной картины подтверждается экспериментальными наблюдениями. По известным представлениям [16, 87] о сдвигениях толщи пород при выемке угольных пластов в подрабатываемом горном массиве по мере продвижения очистного забоя образуются три основные четко выраженные зоны: зона обрушения; зона деформации с разрывом сплошности; зона плавного оседания (прогиба). Они образуются за счет перераспределения напряжений и роста деформаций пород, которые вызывают раскрытие естественных и образование новых трещин, снижение прочностных свойств, смещение и обрушение налегающей толщи.

Разные авторы называют перечисленные зоны по-своему, например, первую зону называют зоной смятия, вторую – интенсивной трещиноватости, а третью – зоной затухания трещиноватости. Сдвигения и деформации подрабатываемого массива горных пород, вызывающие перетоки газа, характеризуются следующей картиной формирования указанных зон. По мере увеличения площади выработанного пространства прогиб кровли пласта растет, в процесс вовлекается все большее число слоев, происходит их сдвиг по плоскостям напластования, в толще появляются секущие трещины и трещины расслоения. В процессе сдвигения происходит изменение объема пород, которые в области повышенного (опорного) давления уплотняются, а в области обрушения разрыхляются и, увеличиваясь в объеме, заполняют выработанное пространство, создавая подпор вышележащим слоям. Наибольший приток газа наблюдается в основном из зоны интенсивной трещиноватости, в которой располагаются сообщающиеся между собой трещины. Анализ результатов натурных наблюдений и аналитические расчеты показывают, что расстояние по нормали от кровли разрабатываемого пласта до границ каждой из перечисленных выше зон можно определить аналитически, что подробно описано в работе [92]. Мощность междупластья, при которой допускается подработка выработок, принята равной $40 \cdot m$ и соответствует наименьшему значению относительных деформаций растяжения [53, 63].

Известно, что к основным факторам, оказывающим влияние на развитие геомеханических процессов и, соответственно процессов фильтрации газа в толще пород, относятся мощность, глубина и угол залегания пластов, система разработки, способ управления горным давлением, размеры выработанного пространства, полнота выемки полезного ископаемого, скорость подвигания очистной выработки, количество разрабатываемых пластов и порядок ведения горных работ в них, механические свойства и строение толщи вмещающих пород, а также степень их нарушенности и газоносность.

Помимо перечисленных одним из решающих факторов влияния деформаций на процесс газопереноса являются величины и соотношения компонент горного давления в массиве. Считается, что с глубиной в рассматриваемом массиве по мере уплотнения (уменьшении пористости), литификации, перекристаллизации пород и других подобных процессах горное давление возрастает [18]. Его рост приводит к сложноподвиженному состоянию в массиве, где поведение горных пород принято описывать обобщенным законом Гука.

Скорость подвигания очистной выработки в значительной мере определяет продолжительность и интенсивность процесса сдвижения. Регулировать сроки и продолжительность отдельных стадий сдвижения можно изменяя скорость подвигания, что существенно при подработке объектов, в эксплуатации которых имеются перерывы.

Рациональные технические решения с точки зрения управления газовыделением требуют учета закономерностей образования, скорости развития и смыкания газопроводящих трещин, мест образования коллекторов газа, зависимостей параметров трещин от параметров сдвижения, а также от параметров очистной выемки.

Напряженно-деформированное состояние угольного пласта и его газопроницаемость находятся в прямой зависимости от величины и ориентации трещин. Известны две причины трещинообразования – внешние воздействия и наличие газа в угле, которые существуют практически совместно на газоносных пластах. При изменении напряжений энергия, накапливаемая в устье трещины, приводит к ее прорастанию на некоторую величину по длине. Интенсивное прорастание трещин зависит от давления газа, заполняющего трещину, от свойств материала и уровня напряжений.

Исследованиями доказано, что в угольных пластах трещины направлены как перпендикулярно к обнаженной поверхности, так и параллельно ей. Если прорастание первых трещин непосредственно увеличивает транспортные каналы для миграции газа из пласта, то прорастание вторых повышает дебит выделяющегося из пласта газа только после выхода трещины на обнаженную поверхность. Оба вида трещин, образуя систему, способствуют дегазации пласта.

Концентрация напряжений в период выемки увеличивается в 1,5-2,5 раза, а максимум смещается к контуру очистной выработки от 2 до 0,5 м [44, 45]. В результате опускания кровли над призабойной частью лавы происходит усадка угольного пласта. При этом часть метана выделяется в очистной забой, а часть перемещается вглубь массива.

При увеличении длины подрабатываемого блока в процессе перемещения очистных работ увеличивается свободная длина консоли основной кровли, то есть образуется рычаг. При этом точкой опоры этого рычага является зона, расположенная в 9-12 м впереди забоя лавы. Чем больше длина консоли, тем больше зона частичной разгрузки впереди забоя лавы за зоной опорного давления. При очередном оседании кровли часть газа перемещается в забой, а другая часть – в зону разгрузки. Отсюда следует, что управлять газопереносом можно, регулируя опускание кровли путем изменения сопротивления крепи или путем увеличения скорости подвигания забоя.

При отсутствии технологических процессов в лаве газовыделение из угольного пласта происходит стабильно, в период выемки угля оно увеличивается незначительно, а после разгрузки и передвижения основных секций крепи выделение метана возрастает в 1,5-1,8 раз [44, 45]. Объясняется это интенсивным трещинообразованием вблизи очистной выработки за счет давления пород в период разгрузки крепи или раскрытия трещин при распоре.

Трещинообразование вблизи контура очистной выработки, развиваемое циклическим воздействием секций крепи на угольный пласт через боковые породы, способствует увеличению количества газа, выделяющегося из пласта. Причем рост газоотдачи не является монотонным. В период разгрузки секций (увеличения давления кровли на угольный пласт) газовыделение из угля снижается, а после распора увеличивается.

Интенсивность деформации призабойной зоны угольного пласта и газоотдача растут с увеличением диапазона и величины принудительных колебаний контура выработки под действием крепи [16]. К аналогичным выводам приходят исследователи при воздействии на угольный пласт знакопеременными нагрузками. В результате неоднократной разгрузки и распора крепи и соответствующей пригрузки и разгрузки приконтурной части угольного пласта происходят интенсивные процессы нарушения целостности породной толщи, причем трещиноватость распространяется в глубь массива. В зоне разрушения концентрация напряжений резко падает, а давление газа возрастает за счет подтока из окружающего массива в трещины. Вследствие роста трещиноватости краевой части угольного пласта улучшаются условия фильтрации, что приводит к уменьшению скорости нарастания газового давления.

При осуществлении дегазации необходимо использование максимального числа эксплуатационных трещин, являющихся основными газопроводниками [45], или возникающих в зонах деформаций напряжений растяжения при сдвигении подработанного или надработанного массива горных пород [121]. В этих зонах наблюдается падение давления, содержащегося в пласте газа, и его интенсивное газовыделение. Максимальные деформации сжатия пласта и давление в основном возникают за 10-15 метров от надрабатывающего забоя, а уже на расстоянии 45-50 метров деформации расширения пласта и дебит газа достигают максимальных значений, в то время, как давление газа падает. При этом установлено, что граница изменения скорости газовыделения практически соответствует границе деформаций расширения, а максимальные значения скорости газовыделения приурочены к точкам с максимальными деформациями.

С другой стороны некоторые ученые [69] рассматривают газопроницаемость массива с позиций преимущества для эффективной дегазации коротких радиальных трещин по сравнению с длинными тангенциальными, негативно влияющими на несущую способность массива. Они отмечают, что длинные трещины растут в основном в квазистатическом поле напряжений, а короткие – в динамическом.

Выбор правильных технологических решений при осуществлении дегазации углепородного массива зависит от целого

комплекса взаимодействующих факторов, недооценка роли хотя бы одного из них негативно сказывается на эффективности безопасной добычи угля. Причины частого нарушения газового режима на угольных шахтах связаны с тем, что не всегда в достаточной степени учитываются деформационные процессы, происходящие в массиве при ведении подготовительных и очистных работ. В процессе ведения горных работ в массиве формируется сложная картина деформаций, среди которых с позиций газопереноса нас интересуют предельные (или разрушающие), сопровождающиеся нарушением сплошности вследствие возникающих в горных породах новых поверхностей раздела и трещин.

Таким образом, результаты геомеханических исследований в шахтах при ведении очистных и подготовительных работ дают возможность использования их для определения параметров образующихся областей дренирования газа во вмещающих породах разрабатываемого пласта.

5.2 Источники формирования и причины нестабильности газового режима добычных участков угольных шахт

Разработку угольных пластов на высокопроизводительных шахтах Донбасса ведут, как правило, столбовыми системами разработки с управлением кровлей полным обрушением. Выбор данной системы объясняется широким распространением месторождений угля с пологим и слабонаклонным залеганием угольных пластов, обеспечением разделения по времени очистных и подготовительных работ, возможностью применения возвратноточных и комбинированных схем проветривания, минимизацией утечек свежей струи воздуха через выработанное пространство. Тем не менее, при интенсивном подвигании очистного забоя на опасных по газу шахтах часто происходит загазирование лавы и вентиляционных штреков. Это связано, прежде всего, с большими объемами выработанных пространств отработанных лав по всей длине выемочного столба и нестабильностью газовыделения в штреки по траектории движения вентиляционной струи. Наиболее опасными являются трудноуправляемые колебания содержания метана, которые вызваны сложными геомеханическими и фильтрационными процессами при разрушении породного массива, посадками основной кровли, недостаточной эффективностью

дегазации, сифлярами, открытием и закрытием регуляторов расхода воздуха и другими. Вследствие чего в горных выработках происходят интенсивные аэрогазодинамические процессы и резкие скачки концентрации метана (всплески) по траектории движения вентиляционной струи, которые нарушают установившийся газовый режим добычных участков.

Основным источником выделяющегося из выработанных пространств метана являются уголь и вмещающие горные породы. Выделение метана происходит за счет разности давлений газа во вмещающих горных породах и выработках. Это вызывает движение метана по направлению из разрушенных горных пород в выработанное пространство и в горные выработки.

Основная доля метана, выделяющегося в прилегающей к очистной выработке части выработанного пространства, накапливается за счет фильтрационного движения воздуха в виде утечек. Давление, под которым находится метановоздушная смесь в выработанном пространстве, близко к давлению воздуха в прилегающих выработках. При уменьшении этого давления метановоздушная смесь сжимается, а при увеличении происходит обратное явление – метановоздушная смесь расширяется и выделение метана из выработанного пространства увеличивается. При регулировании проветриванием на выемочном участке в результате изменения аэродинамического сопротивления регулятора расхода воздуха или вследствие резкого повышения давления в выработанном пространстве при обрушении кровли может произойти внезапное увеличение концентрации метана в выработках выемочного участка с превышением его допустимого значения.

С целью детального анализа причин неустойчивости газового режима добычных участков, работающих с применением мероприятий по дегазации угля и вмещающих пород, совместно с ИГТМ НАН Украины, изучен опыт работы на шахтах различных регионов Донбасса: ГП «Макеевуголь», «Донецкуголь», «Красноармейскуголь», «Луганскуголь» и «Краснодонуголь». Проведен анализ и обобщены данные по оценке метановыделения из кровли по результатам исследования 15 высокопроизводительных выемочных участков передовых шахт: «Красноармейская-Западная № 1», «Краснолиманская», им. А.Ф. Засядько, «Южнодонецкая № 3», «Самсоновская-Западная» (табл. 5.1). Шахты разрабатывают пласты на разных глубинах (до 1380 м) в

различных горнотехнических условиях и снабжены дегазационными системами. Однако, как видно из табл. 5.1, эффективность дегазации кровли низкая и колеблется в пределах от 4 до 46%.

Таблица 5.1 – Эффективность дегазации кровли скважинами

Шахта, лава	Метановыделение из кровли, I , м ³ /мин	Коэффициент дегазации кровли, k_d , %
<i>Шахта «Краснолиманская»</i>		
7-я южная лава уклона №1-бис пл. k_5	26,5	43,8
10-я южная лава южного уклона пл. k_5	10,2	16,7
11-я южная лава центрального уклона пл. l_3	13,0	27,7
<i>Шахта «Красноармейская-Западная № 1»</i>		
2-я южная лава блока №3	13,6	42
4-я южная лава блока №5	16,3	40
2-я северная лава бремсберга блока №5	19,4	11
1-я южная лава блока №2	13,1	4
1-я лава южной панели блока №8	16,2	9
2-я южная лава блока №2	24,4	38
<i>Шахта «Южнодонбасская №3»</i>		
23-я восточная лава пласта c_{11}	28,2	31,6
<i>Шахта «Самсоновская-Западная»</i>		
3-я западная лава пласта k_2^H	15,2	8,5
<i>Шахта им. А. Ф. Засядько</i>		
10-я западная лава пласта l_1	94,9	46,0
11-я западная лава пласта l_1	101,7	44,2
16-я западная лава пласта m_3	85,7	44,6
16-я восточная лава пласта m_3	54,6	40,3

Анализ показал, что при столбовой системе разработки и возвратном проветривании эффективность дегазации низкая, например, на шахте «Красноармейская-Западная № 1» в трех лавах составляет всего 4-11 %, а на шахте «Самсоновская-Западная» – 8,5 %. Низкая эффективность дегазации кровли скважинами объясняется тем, что скважины не могут дегазировать весь обрушающийся массив, а после прохода лавы они разрушаются и в неподдерживаемой части штрека не работают. Это связано, прежде всего, с несоответствием параметров дегазационных систем геомеханическим процессам в породном массиве и горнотехническим условиям разработки пластов. Допустимое содержание метана в

исходящих струях на всех участках обеспечивается преимущественно за счет высокой эффективности изолированного отвода метана из тупика вентиляционного штрека газоотсасывающими установками. Однако работы по уменьшению длины газоотсасывающего трубопровода и сооружение новой изолирующей перемычки ведутся в атмосфере с взрывоопасным содержанием метана, а остановка газоотсоса даже на незначительное время приводит к загазированию сопряжения лавы с вентиляционным штреком. Кроме того, отсасываемый метан выбрасывается в вентиляционную систему шахты за пределами выемочного участка, что создает опасность превышения предельно допустимых концентраций и вероятности возникновения всплесков содержания метана на исходящей струе выемочного участка.

Опыт шахты им. А. Ф. Засядько показал, что относительно высокая эффективность дегазации кровли может обеспечиваться средствами с выводом газа из шахты. При этом эффективность скважин, пробуренных навстречу очистному забою, может достигать 40-46 %.

Анализ эксплуатации дегазационных скважин при столбовых системах разработки показал, что интенсивное газовыделение из породного массива в скважины происходит тогда, когда выемочный столб примыкает к выработанному пространству ранее отработанной лавы. Результирующей величиной, характеризующей способность участков породного массива к газоотдаче, является газопиток в дегазационные скважины, который зависит от расстояния скважины до очистного забоя. При этом эффективность их работы зависит от вовлечения в дегазацию тех или иных источников газовыделения (газонасыщенных пластов-спутников, пористых песчаников). По дебиту и содержанию метана в скважинах можно судить о его возможном поступлении в горные выработки на различных участках штреков по длине выемочного столба.

Как известно, при отработке угольного пласта происходит осадка основной кровли, сопровождающаяся сдвижением толщи горных пород. Процесс сдвижения длится достаточно продолжительное время и, к тому же, неравномерно. Под действием высоких напряжений формируется нарушенная зона над горными выработками выемочного участка. Геомеханическое состояние породного массива в кровле вентиляционного штрека в зоне действия участков вентиляционных скважин изменяется в пространстве и во

времени. Эти изменения влияют на разрушение как локальных участков массива, так и протяженных, что, в свою очередь, существенно влияет на поступление газа в горные выработки.

В наиболее сложных условиях отрабатываются угольные пласты на шахте им. А.Ф. Засядько, относительная газообильность которой составляет 52,3 м³/т (табл. 5.2.), средняя абсолютная газообильность выемочных участков достигает 93,6 м³/мин (табл. 5.3).

Таблица 5.2 – Газообильность АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»

Категория по метану	Суфлярные выделения	Среднесуточная добыча шахты в 2006 году, т	Средняя абсолютная газообильность с учетом каптируемого метана, м ³ /мин	Расход метана, отсасываемый дегазационными установками, м ³ /мин	Относительная газообильность шахты, м ³ /т
опасная по внезапным выбросам	имеют место	8773	222,6	117,5	52,3

Примечание. Данные территориального управления Госпромгорнадзора по Донецкой области по результатам работы шахты в 2006 году.

Таблица 5.3 – Средняя абсолютная газообильность выемочных участков АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»

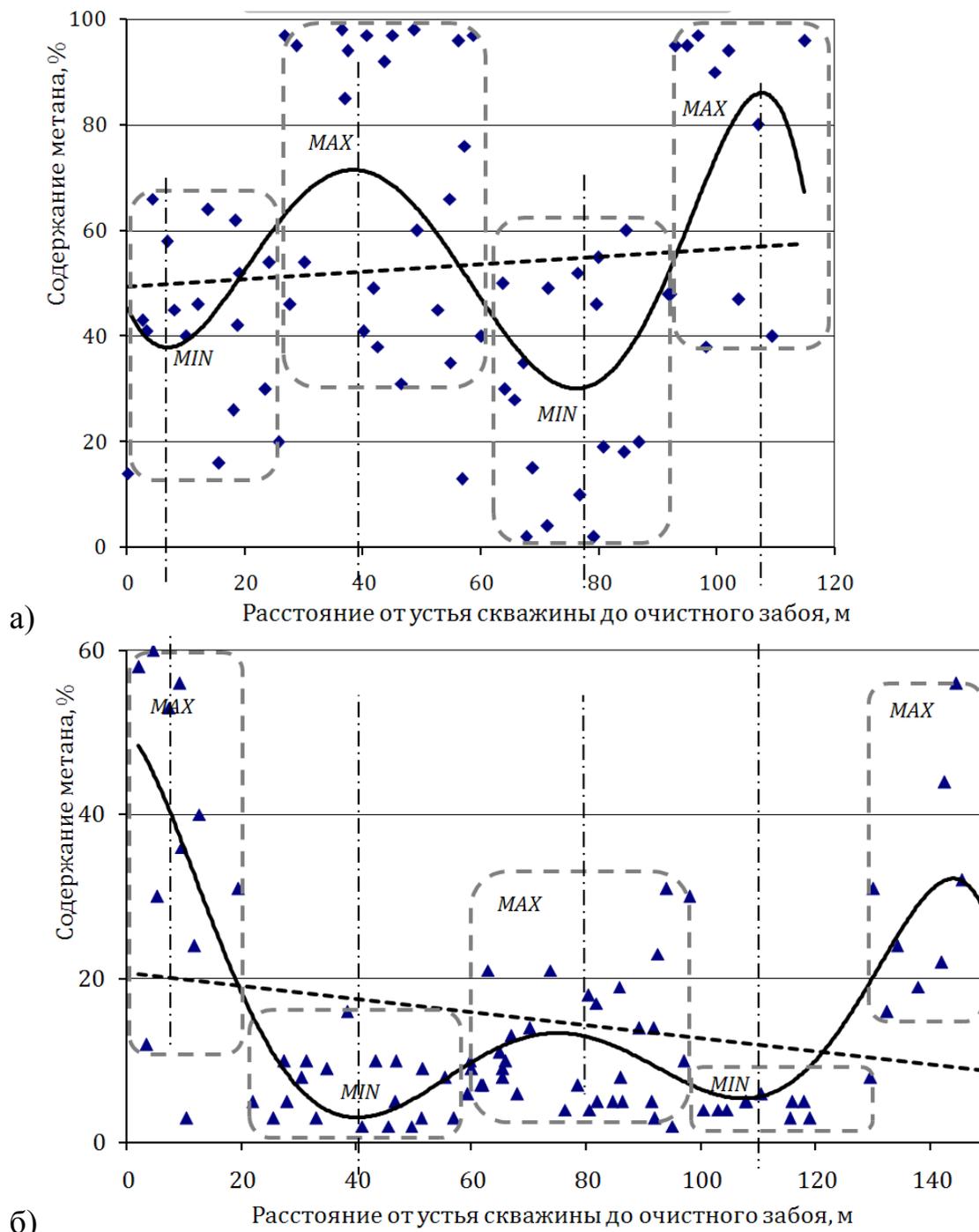
Пласт	Лава	Расход воздуха в исходящей струе, Q, м ³ /мин	Средняя добыча, А, т	І _{уч.ис.} ,	І _{д.с.} ,	І _{д.в.} ,	І _{и.от.} ,	І _{уч.д.} ,
				$\frac{м^3}{мин}$	$\frac{м^3}{мин}$	$\frac{м^3}{мин}$	$\frac{м^3}{мин}$	$\frac{м^3}{мин}$
<i>m₃</i>	17 запад	1919÷2140	2624	13,1	5,7	15,8	-	34,6
<i>m₃</i>	17 вост.	1572÷1577	929	3	18,7	-	-	21,7
<i>m₃</i>	15 вост.	1095÷2284	2322	8,5	27,7	29,6	-	65,8
<i>l₁</i>	13 вост.	2177÷3223	1699	14,4	24	6,8	-	45,2
<i>l₁</i>	12 запад	1384÷1745	2681	9,5	58,5	-	25,5	93,6
<i>l₄</i>	2 запад	549÷722	962	0,8	-	-	2,7	3,5
<i>l₄</i>	3 запад	1467÷1860	1341	5,9	-	-	-	5,9
<i>k₈</i>	12 вост.	688÷1394	876	6,8	10,7	-	-	17,5

В связи с этим на шахте проводится комплексная дегазация угольных пластов и вмещающих пород, которая предусматривает бурение около 200 скважин, расположенных через равные расстояния по длине одного выемочного столба. Как показал анализ, эффективность работы этих скважин зависит от расположения зон

разрушения в основной кровле на границе отработанной и работающей лав. Например, в ходе исследований содержания метана, поступающего из 157 дегазационных скважин в дегазационный трубопровод вентиляционного штрека 17 западной лавы пласта m_3 (наиболее опасного по метану) шахты А. Ф. Засядько, установлено, что дебит метана и его концентрация имеют ярко выраженный периодический характер (рис 5.1). Аппроксимация данных методом наименьших квадратов подтвердила неравномерный характер повышения и понижения концентрации метана в скважинах по длине выработки на различном расстоянии от очистного забоя. То есть скважины, находящиеся на участках 0-28 м, 63-94 м от очистного забоя (рис. 5.1, а) выделяют, в среднем, на 30 % меньше метана, чем на аналогичных участках, расположенных на расстояниях 28-63 м и 94-120 м. Следует отметить, что все эти скважины были направлены в сторону выработанного пространства.

Скважины, направленные по оси штрека (рис. 5.1, б), также имеют неравномерный характер повышения и понижения содержания метана в зависимости от их расположения относительно очистного забоя. Таким образом, мы видим чередование зон повышенного и пониженного выделения метана в пространстве над вентиляционным штреком, что связано с закономерностью самоорганизации породного массива вокруг протяженных подземных выработок, которая реализуется в виде квазипериодических геодилатационных полей и обусловлена саморазрушениями перенапряженных участков массива за счет рекомбинационной смены альтернативных квазистационарных равновесных состояний. Это свидетельствует о том, что на нестабильность газовыделения по длине вентиляционного штрека превалирующее влияние оказывают происходящие в породном массиве геомеханические процессы [24].

Сопряжение выработанного пространства с массивом отработываемого столба подвергается воздействию стационарного и динамического опорных давлений, которые также влияют на характер выделения метана. В зоне опорного давления лавы поры и трещины смыкаются, соответственно снижается концентрация метана в скважинах, направленных по оси выработки (рис. 5.1, б). За лавой наблюдается рост содержания метана в 6-11 раз в связи с активными разрушениями источников выделения свободного метана.



- ◆ - содержание метана в скважинах, направленных на выработанное пространство;
- ▲ - содержание метана в скважинах, направленных вдоль штрека;
- - тенденция общего изменения содержания метана;
- - регрессионная полиномиальная модель изменения содержания метана в скважинах вдоль штрека

Рисунок 5.1 – Анализ неустойчивости газовыделения на сопряжении отработанной и работающей лавы (вентиляционный штрек 17 западной лавы шахты им А.Ф. Засядько (по данным ИГТМ НАНУ): а – в выработанном пространстве; б – над вентиляционным штреком

Метан, который остался в горных породах над вентиляционным штреком, является потенциально опасным и может просачиваться в лаву, выработанное пространство или вентиляционный штрек, о чем свидетельствует общая тенденция снижения содержания метана в скважинах при подвигании лавы (удалении скважин от очистного забоя вдоль вентиляционного штрека), рис. 5.1, б. По всему исследуемому участку из скважин, расположенных по оси вентиляционного штрека, зафиксировано содержание метана в 2,9 раза меньшее, чем из скважин, направленных на выработанное пространство.

Таким образом, нестабильность газовыделения в горные выработки обусловлена сложными квазипериодическими дезинтеграционными геомеханическими процессами, что значительно усложняет решение задачи повышения эффективности способов управления проветриванием добычных участков и требует детального исследования напряженно-деформированного состояния газонасыщенного массива горных пород. Поскольку способы управления проветриванием должны оставаться эффективными при эксплуатации выработок в течение продолжительного времени, необходимо определять области разрушения породного массива и интенсивность фильтрации метана в выработки, которыми характеризуются все стадии отработки выемочного столба.

5.3 Разработка методики оценки условий и природы накопления газа метана в угольном забое и сопряженных горных выработках на основе метода радиационного контроля газа радона и продуктов его распада

Радон – это инертный газ (Rn , плотность 9,9 г/л, температура кипения $-61,8^{\circ}C$), не имеющий ни цвета, ни вкуса, ни запаха. Он не вступает в химические реакции ни с одним обычным веществом, очень редкий по распространенности в атмосфере и концентрации в воздухе, условно, в километровом слое воздуха его содержится примерно около 3 миллилитров чистого газообразного радона. Относительная плотность по отношению к плотности воздуха составляет 7,657, в связи с чем возможны накопления радона в подвалах, первых этажах зданий, нижних частях подземных выработок [105].

Радон является радиогенным газом, он образуется при распаде изотопов радия-226, радия-224 и радия-223, как продукт распада уран-ториевых рядов непрерывно генерируется в горных породах в процессе естественного самопроизвольного распада радиоактивных ядер, период полураспада таких ядер превышает $10^8 - 10^{10}$ лет, поэтому они не успели полностью распастись за время существования видимой части Вселенной. К радиоактивным элементам относятся изотопы урана-238, урана-236, урана-235, тория-232, калия-40 и др. (всего около двадцати изотопов). Кроме долгоживущих радиоактивных изотопов в природных условиях встречаются элементы со сравнительно малым временем жизни. Их наличие объясняется постоянным воспроизводством за счет распада более долгоживущих изотопов или ядерных реакций, осуществляющихся в естественных условиях [64, 105].

Следует отметить, что наиболее широко распространен в природе радиоактивный калий, по массе в земной коре в среднем содержится около 3 % калия, атомное соотношение изотопов радиоактивного калия-40 до нейтрального калия-39 равняется 0,0181 %. Калий-40 излучает β -частицы и γ -кванты в энергетическом соответствии 89 % и 11 %. Удельная активность природного калия – $29,6 \times 10^3$ Бк/кг. Вклад радиоактивного калия в общую радиоактивность по количеству излучений почти для всех пород на порядок, два превышает вклад элементов уран-радиевого и ториевого рядов, однако единичная мощность энергии излучения α -частиц значительно превосходит энергию β -частиц или γ -излучения.

Радон всегда присутствует в любом горном массиве, уменьшение его концентрации, например, за счет диффузии из массива в воздух постоянно компенсируется новой генерацией радона. Радон-222 образуется из радия-226, период полураспада которого весьма значителен и равен 1617 лет, поэтому образование радона-222 в среднем за время проведения горных технологических операций практически не изменяется. В свою очередь, радий пополняется за счет распада тория и так далее. Диффузия радона в горном массиве и его выделение с поверхности определяются эффективным коэффициентом диффузии, который зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются пористость, проницаемость и трещиноватость. Эти свойства среды существенно зависят от напряженно-деформированного состояния массива. Очевидно, что при сжатии массива проницаемость его снижается, а

при разгрузке увеличивается. Изотопы радия – твердые вещества, они не перемещаются в массиве, перемещается только инертный газ радон (смесь радона и торона), который имеет высокую проникающую способность и стремится заполнить любые пустоты, следовательно, динамические изменения концентрации радона в приповерхностном слое выработки будет однозначно отражать динамические изменения напряженно-деформированного состояния породного массива в значительном объеме.

Радон – не только радиогенный газ по происхождению, но и сам радиоактивный, довольно неустойчив: самый долгоживущий его изотоп радон-222 (радон) имеет период полураспада 3,8 суток, второй по «живучести» изотоп радон-220 (торон) – 54 секунды, а изотоп радон-219 вообще – 4 секунды. Радон-219 образуется в цепочке ядерных реакций при распаде урана-235, который в природных условиях встречается редко и в малых количествах, поэтому влиянием этого изотопа радона пренебрегают и при измерениях не учитывают. Радон-222 образуется в цепочке при распаде урана-238, радон-220 – член радиоактивного ряда урана-236, тория-232. По энергетической дозе излучения газ радон (радон-222) приблизительно в 20 раз более важен, чем торон (радон-220).

Распадаясь, радон и торон выделяют самые тяжелые α -частицы с энергией 5,49 и 6,29 МеВ соответственно, которые, попадая в организм человека, способны нанести его здоровью непоправимый вред, в то же время кожа человека задерживает проникновение радона. Мало того, распад радона сопровождается последовательно образованием в свою очередь радиоактивных изотопов полония-218 (RaA) с периодом полураспада 3,05 мин и энергией α -частиц 6,00 МеВ, свинца-214 (RaB) с периодом полураспада 26,8 мин, висмута-214 (RaC) с периодом полураспада 19,7 мин, полония-214 с периодом полураспада 164 мкс и энергией α -частиц 7,69 МеВ, распад торона – образованием радиоактивных изотопов полония-216 с периодом полураспада 0,15 с и энергией α -частиц 6,78 МеВ, свинца-212 с периодом полураспада 10,64 час, висмута-212 с периодом полураспада 60,6 мин и полония-212 с периодом полураспада 304 нс и энергией α -частиц 8,78 МеВ. Это основные продукты распада, кроме них еще излучаются α -, β -частицы и γ -кванты различных энергий, но в меньших количествах [64]. При контроле α -частиц, β -частицы и γ -кванты легко отсекаются прибором за счет их меньшей энергии.

Продукты распада радона и торона – твердые вещества, которые образуют так называемые аэрозоли – частицы настолько мелкие, что они могут очень долго находиться во взвешенном состоянии в воздухе и вместе с ним попадать в легкие, а при неблагоприятных условиях вызывать лейкемию или рак легких. Радон дает в среднем до 54 % той дозы облучения, которую регулярно получает каждый житель Земли, при этом реальные дозы могут весьма существенно (в несколько десятков раз) отличаться от усредненных.

Во многих странах установлены предельные величины среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона в воздухе для помещений, в среднем эти нормы колеблются в пределах от 100 до 200 Бк/м³. В соответствии с «Руководством по оценке и контролю радиационной обстановки на угольных шахтах. КД 12.5.005-94» и «Нормами радиационной безопасности НРБ-76/87» шахтеры угольных шахт Украины отнесены к ограниченной части населения (категория Б), для которой установлен предел дозы за календарный год, равный 0,5 бэр (биологический эквивалент рентгена или 5 МэВ) для всего тела. Нормативное годовое время облучения для шахтеров принято равным 1700 ч в год, а годовой объем вдыхаемого рудничного воздуха – 2500 м³/год. Указанный выше предел дозы не будет превышен, если среднегодовой уровень только одного опасного фактора на рабочем месте не превзойдет следующего значения: 110 Бк/м³ (в единицах величин «скрытой энергии» $3,84 \times 10^3$ МэВ/л) для α -частиц или 50 мкР/ч для β -частиц и γ -излучения [64, 105].

С одной стороны, радон это радиоактивный газ, который вследствие специфических особенностей (без цвета, вкуса и запаха, время полураспада 3,8 дня, мощный альфа-излучатель) представляет собой опасность для людей, особенно проживающих на нижних (первом и втором) этажах. С другой стороны, радон из-за своих уникальных особенностей является оптимальным индикатором при различных геологических и геотехнических исследованиях. При этом не требуются никакие дополнительные источники радона, а используется тот фоновый радон, который независимо от нас уже имеется в природных условиях, причем везде, без исключения.

В отличие от методик контроля напряженно-деформированного состояния и тектонического строения породного массива, которые в принципе известны [112], впервые предложена и разработана методика оценки условий и природы накопления газа метана в

угольном забое и сопряженных горных выработках на основе метода радиационного контроля инертного газа радона и продуктов его распада (RaA, RaB, RaC). Особенность методики заключается в том, что она учитывает факт идентичности условий накопления (а не образования) газов метана и радона в свободном пространстве, тогда как свойства их частично совпадают, а частично существенно различны. Кроме того, в настоящее время приборы радиационного контроля позволяют определять не только концентрации газов радона и торона, а и объемную активность (концентрации) дочерних продуктов распада радона-222 в воздухе.

Как и радон, газ метан (CH_4 , плотность 0,72 г/л, температура кипения – 164,5° С) не имеет ни цвета, ни вкуса, ни запаха. Относительная плотность составляет 0,554, в связи с чем возможны сосредоточения метана в верхних частях подземных выработок. Диффузионная способность метана в 1,6 раз больше, чем воздуха, вследствие чего он легко проникает через пористые перегородки. Метан вместе с воздухом горит и взрывается. В зависимости от соотношения концентраций метана и кислорода в воздухе возможны различные виды реакций при взрыве. Взрыв максимальной силы соответствует концентрации метана 9,5 %. Нижним концентрационным пределом взрывчатости метана (НПВ) обычно принято считать 5 %, а верхним пределом взрывчатости (ВПВ) – 16 %. При иных равных условиях наиболее легко загорается смесь воздуха с метаном при его содержании 7-8 %. Взрывом называют воспламенение, сопровождающееся ударной волной. Быстрый рост давления во фронте пламени рождает ударную волну, распространяющуюся со скоростью звука (330 м/с) [94].

Основная причина внезапных взрывов пылегазовых смесей в угольных шахтах – это накопление недопустимых концентраций газа метана или угольной пыли, которых можно избежать, если заранее выполнять профилактические работы, а также временно приостанавливать добычу, что и производится во всех странах мира, непосредственный повод для взрыва – искра, она может быть и естественного происхождения, но, чаще всего, возникает из-за грубого пренебрежения правилами безопасности. Взрывы пылегазовых смесей в принципе невозможны, если отсутствуют газ и угольная пыль в больших объемах. Внезапное накопление метана возможно также и в результате внезапного обрушения или выдавливания пород кровли горных выработок, выбросов угля и газа,

внезапных прорывов метана при проведении буровых работ, но, чаще всего, «всплески метана» возникают и при выполнении обычных технологических операций, поэтому их предупреждение или снижение их проявлений – весьма важная и актуальная задача. При этом, предложенная методика имеет принципиальное значение для определения времени и природы накопления газа метана.

Для понимания сути методики необходимо остановиться на основных концептуальных предпосылках.

1. Прежде всего, угольные месторождения осадочные по происхождению, достаточно метаморфизованные, поэтому как метан, так и радон в нетронутом углепородном массиве заполняет все свободное поровое пространство более или менее равномерно, в том или ином количестве.

2. Радон – весьма неустойчивый газ (период полураспада 3,8 суток для радона-222 и 54 секунды для радона-220 (торона)), поэтому его наличие (количество), прежде всего, характеризует или источник образования, или путь проникновения газа от источника, или то и другое в комплексе.

3. В современных приборах радиометрического контроля реализуют метод Маркова (Томаса или др.), для чего исследуемый воздух прокачивают в течение 5 мин через фильтр, например АФА-РСП10, со скоростью 10-40 л/мин, после чего дважды – с 1-й по 4-ю и с 7-й по 10-ю минуты после окончания отбора проб измеряют α -активность фильтра. Для определения объемной активности дочерних продуктов торона и внесения соответствующих поправок в значения объемной активности дочерних продуктов радона при необходимости производят третье (третье и четвертое) измерение активности фильтра в течение 30 мин через 5-24 ч после отбора пробы. Объемные активности вычисляют по известным формулам.

4. Поскольку газ радон имеет высокую проникающую способность и он прокачивается вместе с воздухом, то после прокачки сам радон на измерения уже не оказывает никакого влияния. Из-за отсечения по энергии β -частиц и γ -квантов, энергетически значимы остаются радиоактивные изотопы полония-218 (RaA) с периодом полураспада 3,05 мин и энергией α -частиц 6,00 MeV, полония-214 с условным суммарным периодом полураспада по цепочке уран-ториевого ряда 49,55 мин и энергией α -частиц 7,69 MeV, полония-216 с периодом полураспада 0,15 с и энергией α -частиц 6,78 MeV и полония-212 с условным суммарным

периодом полураспада по цепочке ториевого ряда 11,74 час и энергией α -частиц 8,78 MeV. Это основные временные и энергетические характеристики, по которым можно производить обратный отсчет времени для определения условий накопления смеси газов в целом.

5. Следует обратить особое внимание на тот факт, что изотопы полония-218 (RaA) имеют период полураспада 3,05 мин, а изотопы полония-216 – вообще 0,15 с, то есть, уже к началу первого измерения после начала прокачки (7-я мин) больше половины изотопов полония-218 и практически все изотопы полония-216, которые осели на фильтре, уже распались, поэтому существенную роль играют и более «долгоживущие» изотопы. Таким образом, чем больше RaA, тем «свежее» газ. Если первое измерение N_1 (число зарегистрированных импульсов за вычетом фона) и второе измерение N_2 (с 12-й по 15-ю мин после начала прокачки) близки по величине, то это значит, что газа радона не только на фильтре, но и в атмосфере уже практически нет, а остались только его твердые продукты распада, так называемые аэрозоли.

6. Для технологии предупреждения внезапных «всплесков» газа метана чрезвычайно важно заранее определить источники возможного поступления газа (угольный пласт, вмещающие породы, пласты-спутники, выработанное пространство, отслоения и пустоты). Метан из выработанного пространства, расслоений и пустот можно удалить во время ремонтной смены, однако определить доминирующие источники метана в работающем забое практически невозможно, поэтому газ радон может служить природным индикатором для газа метана: чем больше долгоживущих изотопов в отобранной пробе, тем более длительное время проходили процессы его накопления. Таким образом, в выработанном пространстве, завалах пород, суфлярах, где газы накапливались длительное время, будут преобладать газы с долгоживущими изотопами радона, а в газах, которые выделились непосредственно при разрушении угля и породы, еще сохранятся и короткоживущие изотопы.

Для проведения измерений использован радиометр эквивалентной равновесной объемной активности радона PГА-09МШ (совместная разработка ИГТМ НАН Украины и ЗАТ «Тетра» [55, 88], г. Желтые Воды), в комплект которого включен автоматизированный сигнализатор метана «Сигнал 5» (совместная разработка кафедры аэрологии и охраны труда НГУ Министерства образования Украины

и завода «Червоний металіст» [29], г. Конотоп), рис. 5.2. В основу аппаратуры заложено измерение эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона-222 и торона (радона-220) в воздухе, а также объемной активности (концентрации) дочерних продуктов распада (ОА ДПР) радона-222 Po-218 (RaA), Pb-214 (RaB), Bi-214 (RaC) при одновременном непрерывном контроле концентрации метана. При превышении допустимого уровня концентрации метана автоматически включается звуковой сигнал.

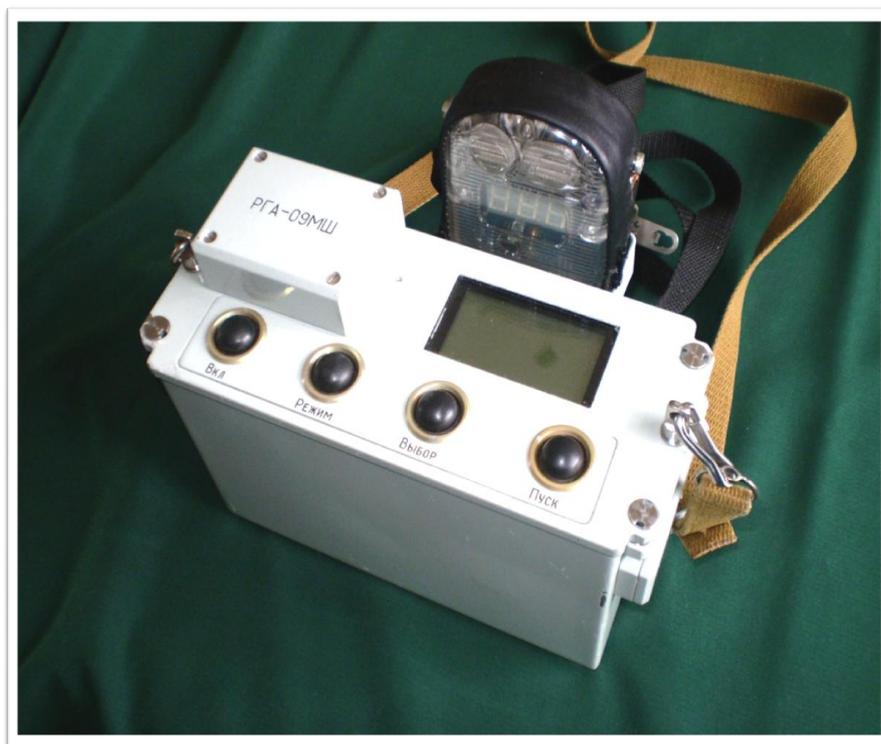


Рисунок 5.2 – Радиометр РГА-09МШ

Радиометр РГА-09МШ предназначен для проведения измерений в шахтах и рудниках, в том числе и в шахтах, опасных по газу или пыли. Аппаратура полностью экологически безопасна, поскольку она не использует никаких радиоактивных веществ, ничего не излучает ни в акустическом, ни в электромагнитном, ни в радиационном диапазонах волн, а использует лишь полупроводниковые датчики, которые чувствительны до излучения α -частиц. Узел селективного отбора аэрозолей обеспечивает отбор аэрозолей величиною частичек 0,7-1,0 мкм. Предел допускаемой основной относительной погрешности радиометра при измерении активности эталонного источника α -излучения типа 1П9 составляет $\pm 15\%$ при $P=0,95$, предел допускаемой основной относительной погрешности измерения активности радона и его дочерних продуктов – $\pm 30\%$.

Время измерения – 15 мин для метода Маркова, 35 мин для метода Томаса. Количество циклов работы после зарядки аккумуляторов достигает не меньше 40, емкость энергонезависимой памяти для сохранения результатов измерений – 100 измерений. Прибор позволяет запоминать и воспроизводить для анализа 12 параметров, характеризующих количество и состояние радона и торона. Основные информативные параметры: α -радиоактивность кратко- и долгоживущих изотопов, а также процентное содержание метана.

В табл. 5.4 приведены результаты измерений различных параметров радона, полученные на шахте им. А.Ф. Засядько с помощью разработанной аппаратуры, которые свидетельствуют, что наиболее опасными по радону являются исходящие вентиляционные потоки, водосборники, подвалы. Измерения проведены совместно сотрудниками шахты им. А.Ф. Засядько и ИГТМ НАНУ. В таблице выделены жирным шрифтом вертикальная колонка (результаты измерений с учетом торона) и две горизонтальные строчки (результаты измерений концентраций радона и метана).

В табл. 5.5 приведены результаты измерений, которые проведены в конвейерном ходе восточной уклонной лавы, пересекающем на своем пути два дизъюнктивных тектонических нарушения (вертикальные колонки, выделенные жирным шрифтом) и зону повышенного горного давления (выделена курсивом). Оба тектонических нарушения имеют по несколько разрывов, охватывают зоны вдоль выработки примерно 100 и 50 м соответственно по ходу выработки. Зона повышенного горного давления достигает 200 м, находится между тектоническими нарушениями. Выработка в зоне «задавлена», остаточная высота около 2 м, о чем свидетельствует увеличенная примерно в два раза скорость вентиляционного потока (1,2 м).

Следует особо подчеркнуть, в зоне повышенного горного давления в результате разрушения горных пород и развития систем трещиноватости не только выделяется повышенное количество радона, а и значительно преобладает количество короткоживущих изотопов над долгоживущими, то есть происходят процессы, сопровождающие увеличение интенсивности горного давления. В зонах тектонических нарушений содержание различных изотопов выравнивается, но сохраняется повышенное содержание радона и его изотопов.

Таблица 5.4 – Измерение прибором РГА-09МШ на шахте им. А.Ф. Засядько

Изм. величина	Подвал	Каб. гл. геолога. 3-й этаж			ВПС, на гор.	18 вост. вент. штрек		18 зап. конв. штрек		ЗКШ, гор. 1235 м	Заезд из ЗКШ на ВУ №12	ВПС №2	ВВС №1	Водо-сборник		
		8,166	8,153	5,444		12,24	10,88	25,85	10,88						28,58	34,02
Са, Бк/м ³	47,63	8,166	8,153	5,444	12,24	10,88	25,85	10,88	28,58	34,02	9,527	89,82	59,88	14,97	68,04	47,63
Св, Бк/м ³	22,81	5,023	4,968	4,674	3,976	1,884	9,557	7,464	6,069	5,372	5,023	48,62	22,11	3,976	13,39	21,62
Сс, Бк/м ³	16,87	4,193	10,00	4,346	2,128	0,000	5,853	6,488	1,213	0,000	3,913	38,37	13,53	1,568	1,652	15,48
Сдпр, Бк/м ³	23,62	5,202	5,146	4,841	4,118	1,951	9,898	7,731	6,286	5,563	5,202	50,35	22,90	4,118	13,87	22,39
Сдпт, Бк/м ³	0,00	0,000	0,102	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Лямбда, ч ⁻¹	1,689	0,971	0,995	0,256	3,229	7,419	2,647	0,712	5,726	8,278	1,392	1,315	2,651	4,291	6,333	1,866
F	0,418	0,536	6,255	0,749	0,283	0,151	0,322	0,598	0,185	0,138	0,460	0,472	0,322	0,232	0,172	0,396
Срад, Бк/м³	56,57	9,698	0,823	6,465	14,54	12,93	30,71	12,93	33,94	40,40	11,31	106,67	11,11	17,78	80,81	56,57
N ₁ , имп.	100,4	20,40	20,40	17,40	20,40	13,40	46,40	29,40	38,4	40,40	21,40	205,4	107,4	22,40	88,40	97
N ₂ , имп.	65,40	14,40	14,40	13,40	11,40	5,400	27,40	21,40	17,40	15,40	14,40	139,4	63,40	11,40	38,40	62
N ₃ , имп.	0,00	0,00	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Метан, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,27	0,12	0,19	0,16	0,30	0,47	0,09	0,20*	-
Час	-	-	-	-	16:04	08:45	09:23	09:50	11:00	10:37	10:15	09:20	-	-	13:18	-
Дата		30.07.08			01.08.08			31.07.08					01.08.08			24.10.08

Таблица 5.5 – Измерение прибором РГА – 09МПШ в выработке, которая пересекает два тектонических нарушения и зону повышенного горного давления

Изм. величина	Конвейерный ходок восточной уклонной лавы																Монт. ходок
	ПК 13	ПК 42	ПК 56	ПК 57	ПК 58	ПК 90	ПК 100	ПК 110	ПК 120	ПК 140	ПК 150	ПК 160	ПК 170	ПК 176	ПК 185		
Глубина, м	1082	1095	1102	1104	1105	1115	1119	1120	1125	1134	1139	1142	1144	1145	1149	1154	
Са, Бк/м ³	2,722	24,49	8,166	25,85	19,05	36,74	50,35	57,16	31,30	25,85	19,05	16,33	10,88	6,805	4,083	14,97	
Св, Бк/м ³	11,99	8,511	13,39	12,69	10,25	11,16	10,46	13,25	7,325	8,720	8,720	5,581	9,766	5,930	5,581	2,093	
Сс, Бк/м ³	13,47	4,909	13,98	9,25	8,07	5,487	1,869	3,731	2,121	4,874	6,275	3,164	9,181	5,534	5,687	0,000	
Сдпр, Бк/м ³	12,42	8,815	13,87	13,15	10,62	11,56	10,83	13,72	7,586	9,031	9,031	5,780	10,11	6,141	5,780	2,168	
Лямбда, ч ⁻¹	0,000	2,915	0,000	1,609	6,333	3,557	5,917	5,141	5,080	3,050	1,839	2,990	0,178	0,229	0,000	9,550	
F	3,844	0,303	1,430	0,428	0,172	0,265	0,181	0,202	0,204	0,294	0,399	0,298	0,782	0,760	1,192	0,122	
Срад, Бк/м ³	3,233	29,09	9,698	30,71	80,81	43,64	59,80	67,88	37,17	30,71	22,62	19,39	12,93	8,082	4,849	17,78	
N ₁ , имп.	36,40	42,40	4,40	55,40	88,40	59,00	67,00	80,00	44,00	44,00	39,00	28,00	36,00	22,00	19,00	17,00	
N ₂ , имп.	34,4	24,4	38,4	36,4	38,4	32,00	30,00	38,00	21,00	25,00	25,00	16,0	28,0	17,0	16,00	6,000	
Метан, %	0,15	0,20	0,1	0,00	0,20	0,28	0,32	0,33	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,33	0,27	0,24	
v _г , м/с	-	-	-	-	-	1,2	1,2	0,8	0,6	0,8	0,6	0,38	0,45	0,65	0,45	0,6	
	-	-	-	-	-	0,9	1,1	0,5	0,5	0,7	0,6	0,45	0,75	0,6	0,30	0,5	
Час	105	11:04	11:42	11:28	13:18	12:48	12:29	12:16	11:58	11:47	11:31	11:09	10:59	10:36	10:26	10:11	
Дата	01.08.08															17.09.08	

В табл. 5.6 приведены результаты содержания радона в конвейерном и вентиляционном штреках. Из-за влияния предыдущего выемочного столба содержание радона в вентиляционном штреке больше, чем его содержание в конвейерном штреке. Необходимо также отметить, что штрек на ПК 43 (жирный шрифт) пересекает тектоническое нарушение, но задолго до этого в штреке отмечается пониженное содержание радона за счет повышения горного давления и закрытия трещин (ПК 25, ПК 38 и ПК 41).

Таким образом, суть предложенной методики состоит в том, что с помощью радиометрического контроля в горных выработках определяются места повышенного, в сравнении с фоновым, поступления в рудничный воздух радона в смеси с метаном. Для проведения измерений радиометрического контроля применяется радиометр РГА-09МШ. Одновременно проводятся измерения содержания метана.

На рис. 5.3 показано относительное увеличение дебита метана R , поступившего в конвейерный ходок восточной лавы пласта l_4 вместе с продуктом распада радона ($Po-218$ с периодом полураспада 3,05 мин.), к его общему увеличению (определяется также по изотопам $Pb-214$ с периодом полураспада 26,8 мин. и $Bi-214$ с периодом полураспада 19,7 мин.)

$$R = \Delta q_r / \Delta q_i, \quad (5.1)$$

где Δq_r - увеличение дебита метана, который поступил вместе с $Po-218$; Δq_i - увеличение дебита метана, который поступил вместе с $Po-218$, $Pb-214$ и $Bi-214$.

Шахтные исследования позволили выявить места повышенного поступления в горные выработки радона с непродолжительным сроком пребывания в атмосфере в смеси с метаном в зонах тектонических нарушений. Это свидетельствует о текущей интенсивной десорбции метана и продуктов распада радона из подработанных пластов. Установлено, что в зоне тектонических нарушений (1200-1400 м, рис. 5.3) значение показателя R в 1,7-1,8 раз выше, чем в зонах опорного давления (500-800 м, 1500-1600 м, рис. 5.4).

Таблица 5.6 – Сравнительный анализ параметров радиометрии в конвейерном и вентиляционном штреках при их проходке (до сбойки)

Изм. величина	18 западный конвейерный штрек										18 западный вентиляционный штрек									
	ПК 11	ПК 15	ПК 25	ПК 38	ПК 41	ПК 43	ПК 12	ПК 15	ПК 18	ПК 21	ПК 24	ПК 27	ПК 30							
Са, Бк/м ³	40,82	32,66	14,97	8,166	4,083	17,69	20,41	9,527	5,444	38,10	38,10	23,13	4,083							
Св, Бк/м ³	6,906	8,301	7,953	3,488	1,535	3,628	7,325	6,976	8,022	10,11	8,720	6,627	6,627							
Сс, Бк/м ³	0,000	2,983	6,219	2,398	0,954	0,599	4,363	6,197	2,262	3,983	2,351	2,987	6,911							
Сдпр, Бк/м ³	7,153	8,598	8,237	3,613	1,590	3,757	7,586	7,225	8,309	10,47	9,031	6,864	6,864							
Лямбда, ч ⁻¹	7,623	4,554	1,370	2,081	2,577	6,017	2,773	0,567	0,000	4,295	5,230	3,866	0,000							
F	0,148	0,222	0,463	0,373	0,328	0,179	0,313	0,639	1,287	0,231	0,200	0,250	1,416							
Срад, Бк/м³	48,49	38,79	17,78	9,698	4,849	21,01	24,24	11,31	6,46	45,25	45,25	27,47	4,849							
N ₁ , имп.	49,80	47,80	33,80	16,00	7,40	23,40	36,00	27,00	27,00	57,00	53,00	36,00	22,00							
N ₂ , имп.	19,80	23,80	22,80	10,00	4,40	10,40	21,00	20,00	23,00	29,00	25,00	19,00	19,00							
Метан, %	-	-	-	0,18	0,18	0,12	0,26	0,25	0,27	0,46	0,45	0,38	0,28							
<i>v_e</i> , м/с	-	-	-	-	-	-	<u>1,38</u>	<u>1,57</u>	<u>1,12</u>	<u>0,50</u>	<u>0,59</u>	<u>0,30</u>	<u>0,97</u>							
Время	-	-	-	10:12	11:45	09:30	11:46	11:21	11:05	10:48	10:30	10:15								
Дата	15.09.08			03.12.08		05.12	16.09.08													

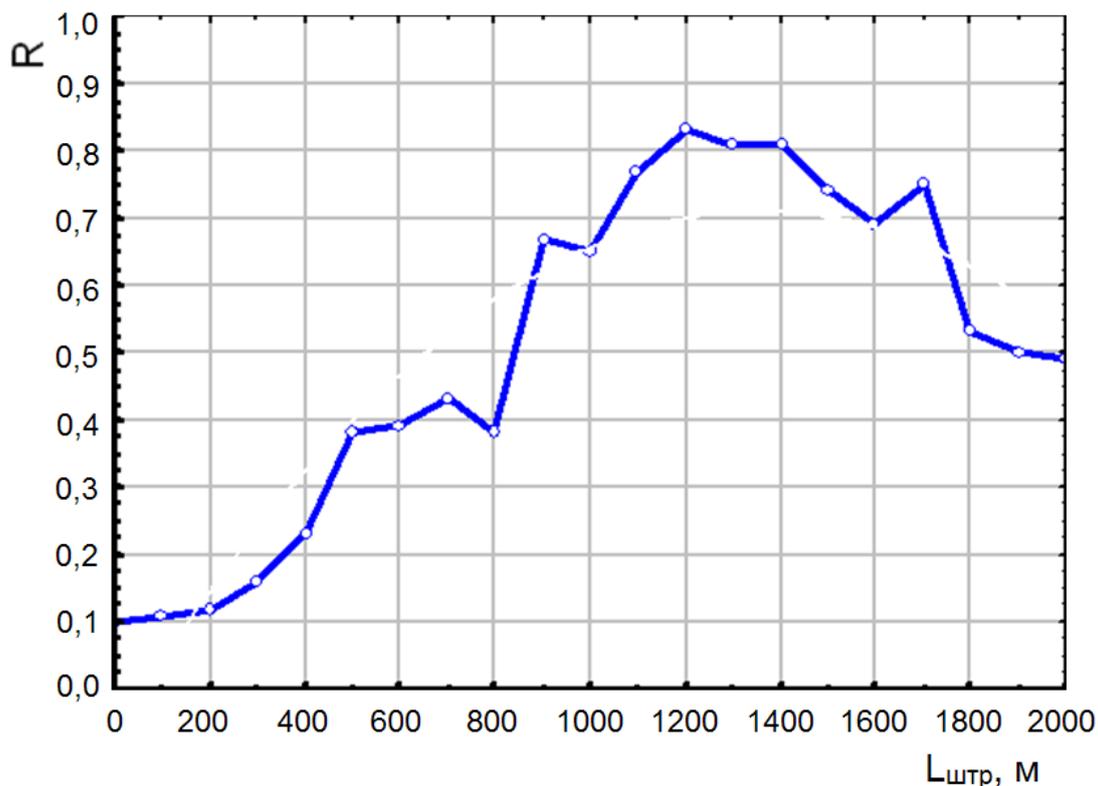


Рисунок 5.3 – Относительное увеличение дебита метана, поступившего вместе с продуктами распада радона

Разработанная методика определения мест интенсивного поступления радона позволяет заблаговременно обнаруживать участки горных выработок с повышенным выходом метана и своевременно предотвращать достижение недопустимых его концентраций при управлении проветриванием.

Разработанные методики определения аэрогазодинамических параметров в штреках, исследования переходных аэрогазодинамических процессов, включающие мониторинг динамики метановыделения при посадке основной кровли и учитывающие количество изотопов радона-222 и его идентификацию по продолжительности нахождения в шахтном воздухе, позволяют выявить места интенсивного поступления метана из выработанного пространства, потенциально опасные по метану участки горных выработок, а также заблаговременно прогнозировать газовую ситуацию на выемочном участке и снизить убытки от простоев, обусловленных газовым фактором.

5.4 Выводы по разделу

Загазирование лав и вентиляционных штреков на опасных по газу шахтах происходит при интенсивном подвигании очистного забоя и больших объемах выработанных пространств по всей длине выемочного столба. Наиболее опасными являются трудноуправляемые колебания содержания метана, которые вызваны сложными геомеханическими и фильтрационными процессами при разрушении породного массива, посадками основной кровли, недостаточной эффективностью дегазационных мероприятий, суфлярами, нарушениями вентиляционных режимов, связанных с открыванием и закрыванием регуляторов расхода воздуха. Вследствие этого в горных выработках происходят интенсивные аэрогазодинамические процессы и резкие скачки содержания метана (всплески) по траектории движения вентиляционной струи, которые нарушают установившийся газовый режим добычных участков.

Установлено, что переходные аэрогазодинамические процессы особо опасны (имеют максимальные значения градиентов) на сопряжениях лавы и подготовительных выработок, что требует применения принципиально новых способов и средств контроля и проветривания в целях обеспечения безопасности работ.

Анализ шахтных наблюдений показал, что нестабильность газовыделения в горные выработки обусловлена квазипериодическими дезинтеграционными геомеханическими процессами, что значительно усложняет решение задачи повышения эффективности способов управления проветриванием добычных участков и требует детального исследования напряженно-деформированного состояния газонасыщенного массива горных пород.

Для повышения безопасности работ разработаны способы предварительного радиометрического контроля активного перераспределения воздушных потоков на сопряжениях лавы за счет общешахтной депрессии. Впервые предложена и апробирована методика определения свойств метана в местах интенсивного его поступления из выработанного пространства и выявления потенциально опасных по метану участков горных выработок радиометрическим методом, отличающаяся определением и учетом количества коротко- и долгоживущих изотопов радона-222.

6 ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ ДОБЫЧНОГО УЧАСТКА

6.1 Переходные аэрогазодинамические процессы и управление проветриванием в вентиляционных сетях угольных шахт

Изучение и оценка переходных аэродинамических процессов в шахтных вентиляционных сетях представляют собой важную задачу, поскольку, зная параметры, характеризующие эти процессы, можно обоснованно разрабатывать регулирующие органы, регуляторы, систему сбора и обработки информации, а также в значительной мере предопределять параметры режимных датчиков контроля рудничной атмосферы.

Согласно литературным данным [10, 45, 58, 94, 114, 135, 136], протекающие в шахтной вентиляционной сети процессы в зависимости от их длительности можно разделить на быстротекущие переходные процессы установления давления, переходные аэродинамические процессы по дебиту воздуха и переходные газодинамические процессы по дебиту метана.

Наиболее быстротекущие процессы изменения давления приводят к появлению переходных процессов по дебиту воздуха, а последние – к появлению переходных газодинамических процессов.

Переходные аэро- и газодинамические процессы сами по себе не представляют особого интереса при нормальной эксплуатации шахт, поскольку доминирующий в обеспечении безопасных условий труда горнорабочих фактор – содержание метана в атмосфере очистного забоя и на исходящей струе участка определяется отношением выделившегося метана к дебиту воздуха. Если обеспечить выемочные участки шахт таким количеством воздуха, что при максимальной нагрузке выемочного оборудования метан, выделяющийся из отбитого угля, груди забоя, почвы и кровли призабойного и выработанного пространства образует в атмосфере выемочного участка концентрации, не превышающие допустимые «Правилами безопасности...», и поддерживать этот дебит воздуха, то изменения концентрации метана в атмосфере участка будут обусловлены только изменением газовыделения при технологических процессах в пределах выемочного участка. Однако даже в этом идеальном, с

точки зрения предотвращения дополнительных выделений метана, случае все же могут создаваться кратковременные колебания разности давления на участке, вызванные проходом транспорта через вентиляционные шлюзовые устройства, открыванием вентиляционных дверей и закорачиванием струи, а также другими причинами [21, 28, 51, 52, 81, 93, 120, 126]. По-видимому, не все они будут приводить к ощутимым переходным газодинамическим процессам.

Режим проветривания шахты – это непрерывный ряд отдельных переходных процессов, вызванных действиями регулирующих устройств, производственными возмущениями и реакциями на них вентиляционной системы. Поэтому для обеспечения безопасности работ и правильной оценки действия устройств регулирования при нормальных условиях их работы, а также их конструировании, настройке и эксплуатации необходимо знать характер переходных процессов, появляющихся в результате возмущений. Регулирующие устройства по всей шахте обычно действуют непрерывно, т. е. в системе всегда имеются возмущающие воздействия и, говоря об установившемся режиме, всегда следует иметь в виду режим возмущений [10]. Особенно важно знать переходные процессы для решения проблемы автоматизации проветривания, так как вся теория автоматического регулирования базируется на знании динамических свойств объекта автоматизации.

Необходимо анализировать переходные аэродинамические процессы при создании и уточнении сложных управляемых вентиляционных систем, в проектных и перспективных расчетах, связанных с развитием системы и исследованием ее устойчивости, текущих эксплуатационных расчетах, конструировании средств контроля и управления, а также при разработке принципиальной схемы диспетчеризации и автоматизации для заложения в эту схему временных и других функциональных зависимостей.

Инерционные свойства шахтных вентиляционных сетей можно определить непосредственными измерениями на конкретных объектах. Но практически не существует даже двух одинаковых шахт, в связи с чем такие измерения следует проводить в широких масштабах.

Наличие различных видов движения воздуха в шахтной вентиляционной сети затрудняет расчеты даже установившихся режимов, в связи с чем наряду со строгими, научно обоснованными

аналитическими методами в ряде случаев применяются приближенные методы, а иногда даже моделирование шахтных вентиляционных сетей. Поэтому для решения поставленной задачи целесообразно использовать методы непосредственного аэродинамического эксперимента, теоретических выкладок и наиболее разработанные и апробированные методы моделирования переходных аэродинамических процессов с применением пакета Mathcad и моделирования объекта управления с применением пакета Matlab.

Исследованию подлежат выемочные участки и шахтные вентиляционные сети в целом. На выемочных участках регистрируется изменение давления, дебита воздуха и концентрации метана во времени после скачкообразного возмущения, единичного импульса возмущения, серии импульсных возмущений одного знака и импульсных возмущений разных знаков. Чтобы получить достаточную точность замеров (в особенности барометрических), необходимо выбрать участок с обратным порядком отработки возможно большей длины.

Для определения инерционных свойств шахтной вентиляционной сети в целом достаточно установить характер изменения давления и дебита воздуха во времени при скачкообразных возмущениях. Наиболее удобны для этих целей шахты с центральной схемой проветривания, центрально-сдвоенным расположением стволов и различной длины сети горных выработок [1, 2, 10, 58, 94].

Шахтным исследованиям должна предшествовать проработка аналитического аппарата и методов моделирования с тем, чтобы натурные наблюдения могли быть выполнены с наибольшим эффектом и послужили критерием оценки достоверности аналитического аппарата и моделирования.

Логическим завершением работ по исследованию инерционных свойств шахтной вентиляционной сети должны быть рекомендации по управлению проветриванием выемочного участка, имеющего разнесенные источники выделения метана: концентрированный источник – забой работающего выемочного агрегата, рассредоточенное выделение – по длине лавы из груди забоя, почвы и кровли призабойного и выработанного пространства, а также рассредоточенное по длине вентиляционного штрека – выделение метана из выработанного пространства.

Для решения этого вопроса, оценивая специфику аэрогазодинамических процессов и инерционных свойств призабойного пространства, с одной стороны, и специфику аэрогазодинамических процессов и инерционных свойств выработанного пространства, с другой, необходимо получить хотя бы приближенное их описание.

Шахтная вентиляционная сеть представляет собой нелинейную многосвязную систему с распределенными параметрами, отдельные элементы которой (выработанные пространства) имеют случайное строение.

Разработка системы автоматического контроля и управления шахтным вентиляционным комплексом выдвинула на первый план необходимость исследовать динамические свойства шахтной вентиляционной сети, так как знание последних – это знание объекта регулирования и управления.

Для того, чтобы рационально управлять режимами проветривания, нельзя опираться на прогнозы, носящие качественный характер. Необходимо максимально приблизить идеализированные расчетные схемы к тем особенностям реального объекта, которые влияют на формирование аэрогазодинамической обстановки в шахте. Для исследования переходных аэрогазодинамических процессов при регулировании проветривания и управлении им следует использовать сложные методы расчета, реализуемые на компьютерах.

Одним из основных путей повышения эффективности вентиляции является создание систем управления проветриванием. Значительный вклад в развитие теории аэрогазодинамических процессов, протекающих в шахтной вентиляционной сети, внесен МакНИИ [1, 13, 54, 78]. Решен ряд важных задач, связанных с процессами распространения газа в вентиляционных потоках, выявлена связь между параметрами вентиляционной сети и эффективностью управления газовым режимом в шахтах, определен характер переходных процессов при изменении аэродинамического сопротивления регулирующих устройств.

Разработаны математические модели неустановившегося движения метановоздушных смесей в выработках и выработанном пространстве, отражающие физику аэрогазодинамических процессов и имеющие большое практическое значение для прогнозирования газовой выделения из выработанного пространства [2, 28].

В работах [2, 9, 21, 120] дана зависимость дебита метана на выемочном участке от величины изменения давления и параметров выработанного пространства, что позволяет прогнозировать содержание метана в процессе регулирования расхода воздуха. Однако не учтены переходные процессы по воздуху и аэродинамические параметры регуляторов расхода воздуха, что не позволяет прогнозировать процессы при кратковременных нарушениях вентиляционного режима.

Предложенные методы математического описания выемочных участков [2] как объектов регулирования проветривания, основанные на однофакторном активном эксперименте, малопригодны для практического использования в системах диспетчерского управления проветриванием газовых шахт, поскольку не устанавливают непосредственных связей между параметрами регулирования и переходного газодинамического процесса.

Определение аэрогазодинамических характеристик выемочных участков ряд авторов рекомендует производить по данным нормальной эксплуатации с использованием метода статистической динамики [2, 114.120], что позволяет рассчитывать необходимые значения расхода воздуха при управлении проветриванием. При определении параметров регулирующих воздействий с учетом переходных газодинамических процессов при оперативном управлении проветриванием газовых шахт, методы статистической динамики нуждаются в дополнительном развитии и требуют промышленной проверки с помощью разработанных к настоящему времени более совершенных средств автоматического контроля параметров рудничной атмосферы.

Изучению аэрогазодинамических процессов на выемочных участках, как объектах управления проветриванием, большое внимание уделяется также и зарубежными учеными [134-136]. В работах [1, 2, 10, 94] представлена математическая модель процесса поступления метана из выработанного пространства в действующие горные выработки. Предложено дифференциальное уравнение и его решение при скачкообразных возмущениях по воздуху (давлению). Отмечено, что при скачкообразных изменениях расхода воздуха функция, описывающая переходной процесс по метану, имеет один экстремум. Приведено экспериментальное подтверждение полученных теоретических кривых переходных процессов при различных вариантах расположения источников метановыделения и

регуляторов расхода воздуха. Однако предложенные математические модели переходных процессов по метану не включают аэродинамические параметры регулирующих органов, что не позволяет получить описание переходных процессов при различных градиентах изменения расхода воздуха.

В работе [114] описан метод оптимального управления воздухо-распределением в вентиляционной сети шахт, который позволяет определить режим работы вентилятора и величины аэродинамических сопротивлений регулирующих устройств, обеспечивающих требуемое воздухо-распределение. Решение задачи производится путем расчета естественного воздухо-распределения, для чего необходимо знать трудноопределяемые и изменяющиеся во времени параметры вентиляционной сети. Предложен алгоритм автоматического управления проветриванием, который позволяет по текущей информации, коэффициентам взаимосвязанности ветвей, характеристикам регулирующих органов и математическим моделям газодинамических процессов на участках производить оптимальное управление воздухо-распределением. Данный алгоритм нуждается в корректировке исходных данных в процессе эксплуатации при изменении топологии и параметров вентиляционной системы шахты.

Интенсивно проводятся исследования по оперативному контролю и управлению проветриванием шахт за рубежом. В Англии проведены исследования по автоматизации вентиляции шахт с целью поддержания необходимых скорости движения содержания воздуха, метана, температуры и влажности. Опыт, накопленный при внедрении автоматизации на шахтах Waterchel и Manton, оценивается как положительный и перспективный. Расчет управляющих воздействий производится на математической модели вентиляционной системы шахты. Для разработки математической модели требуется исходная информация о параметрах вентиляционной системы, которая требует постоянной корректировки.

На шахте № 2 Восточной угольной корпорации США смонтирован опытный образец системы контроля и управления проветриванием, разработанной университетом штата Западная Вирджиния. Система предназначена для измерения содержания метана, расхода воздуха, депрессии ветвей, окиси углерода, дыма, температуры и относительной влажности, ввода информации в

вычислительный комплекс и управления с помощью телемеханики подземными регуляторами.

Расчет параметров управления для обеспечения требуемого режима проветривания производится также на математической модели вентиляционной системы шахты, для составления и постоянной корректировки которой необходимо большое количество технических средств контроля параметров шахтной сети.

6.2 Математическое моделирование переходных аэрогазодинамических процессов в шахтных вентиляционных сетях

Безопасность ведения горных работ во многом определяется эффективностью работы вентиляционной системы опасных по газу угольных шахт. Вопросам управления проветриванием шахт с учетом динамики поступления метана постоянно уделяется внимание научно-исследовательскими, проектно-конструкторскими, учебными учреждениями как в Украине, так и за рубежом.

Усилиями ряда организаций (НГУ, ИГТМ АН Украины, ДонНТУ, МакНИИ и др.) была создана подсистема диспетчерского контроля и управления проветриванием угольных шахт «АТМОС», которая позволяет перераспределять воздух по горным выработкам в зависимости от газовой обстановки на добычных участках [21].

Проведенными ранее исследованиями установлено [1, 2], что на величину и длительность всплеска концентрации метана, выделяющегося из выработанного пространства в призабойное, влияет изменившаяся при регулировании расхода воздуха на выемочном участке депрессия, которая способствует более интенсивному вымыванию метана из выработанного пространства. Причем дебит метана из выработанного пространства определяется многими факторами, в том числе его объемом в зонах обрушения и развития трещин [102].

В установившемся режиме проветривания газовая обстановка на исходящей из лавы струе воздуха определяется выражением:

$$C = \frac{q_{уч}}{q_{уч} + Q} \cdot 100, \%, \quad (6.1)$$

где C - содержание метана в исходящей струе, %; Q - расход воздуха на выемочном участке, $\text{м}^3/\text{с}$; $q_{уч}$ - дебит метана на выемочном участке, $\text{м}^3/\text{с}$.

Дебит метана на выемочном участке составляется слагаемыми по первичным источникам газопоступления:

$$q_{уч} = q_y + q_{он} + q_k + q_{кп} + q_n + q_{вп}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6.2)$$

где q_y - газовыделение из отбитого угля, находящегося в пределах лавы (на конвейере и погрузочном пункте), $\text{м}^3/\text{с}$; $q_{он}$ - газовыделение из обнаженной поверхности пласта, $\text{м}^3/\text{с}$; q_k - газовыделение из зоны работы комбайна (зоны разрушения), $\text{м}^3/\text{с}$; $q_{кп}$ - газовыделение из кровли и почвы призабойного пространства, $\text{м}^3/\text{с}$; q_n - газопоступление со свежей струей воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; $q_{вп}$ - газовыделение из выработанного пространства, $\text{м}^3/\text{с}$.

Анализ исследований газодинамических явлений на угольных шахтах [10, 34, 51, 52, 94] показывает, что протекающие на выемочном участке переходные процессы в своей основе имеют быстroteкущие процессы изменения давления, которые вызывают появление переходных процессов по дебиту воздуха, а последние – появление переходных газодинамических процессов. С другой стороны, известно [28], что возмущения по перепаду давления, возникающие в процессе управления проветриванием, могут привести к появлению переходных газодинамических процессов, опережающих переходные процессы по дебиту воздуха, вызванные реакцией выработанного пространства на быстroteкущие переходные процессы по давлению.

Расход воздуха на выемочном участке в свою очередь характеризуется рядом факторов, которые, в конечном итоге, оказывают влияние на переходные газодинамические процессы. К таковым относятся инерционные свойства воздушного потока, которые отражают факт рассеяния энергии на преодоление аэродинамического сопротивления, а также ее накопление, обусловленное инерционностью и сжимаемостью воздушной среды. Мерой инерционности последней является акустическая масса, а упругие свойства воздушного потока, т.е. его сжимаемость, или податливость, учитываются акустической гибкостью.

Инерционные свойства воздушного потока приводят к тому, что при регулировании расхода воздуха давление, распространяясь со

скоростью звука от источника возмущения, в нашем случае исполнительного устройства регулятора расхода воздуха, и опережая скорость движения воздуха, может привести к всплеску содержания метана в зоне очистного забоя.

Режим проветривания шахты – это непрерывный ряд отдельных переходных процессов, вызванных действиями регулирующих устройств, производственными возмущениями и реакциями на них вентиляционной системы. Поэтому для обеспечения безопасности работ и правильной оценки действия устройств регулирования при нормальных условиях их работы, а также их конструирования, настройки и эксплуатации необходимо знать характер переходных процессов, появляющихся в результате возмущений.

В вентиляционной системе всегда имеются возмущающие воздействия и, говоря об установившемся режиме, всегда следует иметь в виду режим возмущений. Особенно важно знать переходные процессы для решения проблемы автоматизации проветривания, так как вся теория автоматического регулирования базируется на знании динамических свойств объекта автоматизации.

Известно, что непрерывная подача завышенного количества воздуха, рассчитанного на максимально возможное газовыделение на участках, экономически нецелесообразна и во многих случаях технически неосуществима, в связи с чем целесообразно регулировать дебит воздуха в шахтной вентиляционной сети по газовому фактору.

Изучение характера поведения вентиляционной сети газовой шахты при различных видах возмущений позволяет выявить возможные пути оперативного управления проветриванием шахт с целью создания безопасных комфортных условий труда горнорабочих и обеспечения экономичности проветривания шахт [2].

Для исследования переходных аэродинамических процессов в вентиляционной сети уравнения неустановившегося движения должны учитывать распределенный характер параметров сети, т. е. быть уравнениями в частных производных, учитывать инерционные и упругие свойства воздуха и его утечки, играющие существенную роль в проветривании. Кроме того, эти уравнения должны быть «решаемы», что очень трудно, так как шахтная вентиляционная сеть – это разветвленная нелинейная многосвязная система и уравнения, полученные для одной выработки, из-за сложности и недостаточной исследованности краевых условий не могут быть механически

использованы для описания динамических процессов группы разветвленных выработок.

Уравнения должны учитывать инерционные свойства воздушного потока, а также отражать не только факт рассеяния энергии на преодоление аэродинамического сопротивления, но и накопление ее, обусловленное инерционностью и сжимаемостью воздушной среды.

Изменение расхода воздуха при аналитическом и экспериментальном определении параметров переходных процессов по метану принято считать скачкообразным или ступенчатым, т.е. переходными процессами по воздуху и давлению пренебрегают.

Анализ переходных процессов на выемочных участках показал, что переходной процесс по давлению может длиться несколько секунд, а по воздуху до нескольких минут [28].

При резком изменении сопротивления выемочного участка (открывание или закрывание вентиляционной двери, посадки основной кровли и др., см. раздел 5) происходит резкое изменение дебита метана, влияющее на его концентрацию в исходящей струе участка. Это можно объяснить тем, что после переходного процесса по давлению происходит быстрое изменение объема газа в выработанном пространстве, вызывающее резкое изменение дебита метана. Переходной процесс по воздуху к этому времени еще не закончился и создается ситуация, при которой новому значению дебита метана соответствует предыдущий расход воздуха.

Конечная цель управления воздухораспределением – обеспечение безопасных режимов проветривания выемочных участков, регламентированных «Правилами безопасности...».

Дебит воздуха при переходном процессе в контролируемой точке при управлении вентиляционным режимом добычного участка может быть определен по зависимости, приведенной в работе [28]:

$$Q_i = Q_0 \pm \Delta Q \cdot \{1 - \exp[-\beta \cdot (t - t_3) \cdot (1 - \text{sign}(t_3 - t))]\}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6.3)$$

где Q_0 - начальный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔQ - величина изменения дебита воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; β - коэффициент, определяемый по результатам эксперимента, с^{-1} ; $\beta = 1/T$, где T - постоянная времени переходного процесса, с ; t_3 - время задержки начала переходного процесса, $t_3 = l/c$, где l – расстояние от регулятора расхода воздуха до контролируемой точки, м , c – скорость звука, $\text{м}/\text{с}$. Знак «+» или «-» перед ΔQ –

увеличение или уменьшение расхода воздуха в процессе регулирования, соответственно.

На шахтах Украины широко распространена схема проветривания с последовательным разбавлением вредностей и отводом исходящей струи на массив угля при восходящем проветривании лавы, возвратноточным движением свежей и исходящей вентиляционных струй добычного участка. Такая схема проветривания, при основном газовыделении из спутников, обуславливает наличие выработанных пространств с высокой газонасыщенностью, что ограничивает нагрузку на очистной забой в условиях существенного газовыделения из выработанного пространства из-за появления всплесков концентрации метана в верхней части лавы при управлении воздухораспределением [114]. Исходя из вышеизложенного, в работе рассматриваются наиболее неблагоприятные для регулирования расхода воздуха по газовому фактору выемочные участки, обрабатываемые обратным ходом с возвратноточной схемой проветривания и высокой газонасыщенностью выработанных пространств.

Рассмотрим влияние на газодинамический процесс на выемочном участке двух условных групп факторов.

В первую группу включаются источники газопоступления в призабойное пространство $q_{np} = q_y + q_{on} + q_k + q_{kn}$ и газопоступление со свежей струей q_n , позволяющие получить аналитическое описание газодинамических процессов, включающее относительно легко определяемые горно-геологические, технологические, аэродинамические параметры, а во вторую группу – газовыделение из выработанного пространства $q_{вн}$, аналитическое описание которого содержит трудно определяемые параметры.

Представлено аналитическое описание газодинамических процессов в призабойном пространстве выемочного участка по источникам поступления метана [51, 52]. Для рассмотрения источника газопоступления из отбитого угля примем схему со следующими допущениями: за период пребывания в лаве интенсивность газовыделения из единицы объема (массы) отбитого угля не изменяется; процесс рассматривается как стационарный, несмотря на то, что уголь движется на конвейере и выносится за пределы лавы на погрузочный пункт откаточного штрека. Это допущение справедливо при добыче угля комбайном, т.к. каждая

порция удаляемого угля тут же заменяется новой, выделившийся в атмосферу лавы метан перемешивается равномерно в сечении лавы, поступающий в лаву воздух не содержит метана.

Известно, что газовыделение из отбитого угля определяется средней скоростью дегазации $\varphi = d\omega/dt$, определяемой по разности газоносностей при сорбционном равновесии ω_0 и остаточной газоносности ω_i за рассматриваемый промежуток времени τ_i [104]:

$$\varphi = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0 - \omega_i}{\tau_i} . \quad (6.4)$$

При условии непрерывной работы выемочного комбайна его производительность обычно определяется [104]:

$$p = \frac{m \cdot \gamma \cdot r \cdot x}{t} , \quad (6.5)$$

где γ – плотность угля в массиве, т/м³; m – мощность угольного пласта, м; r – величина захвата выемочной машины, м; x – координата нахождения комбайна в лаве; t – время работы выемочной машины, с.

Тогда выделение метана в единицу времени составит:

$$q_{CH_4} = \varphi \cdot p . \quad (6.6)$$

Поскольку координата x нахождения комбайна в лаве изменяется в пределах $0 \leq x \leq l$, где l – длина лавы, то время перемещения добытого угля от точки нахождения комбайна до пункта погрузки на откаточном штреке составит $t = x/v$, где v – средняя скорость перемещения угля по конвейеру, м/с. Тогда масса угля, находящегося в призабойном пространстве лавы составит:

$$M = p \cdot \frac{x}{v} , \quad (6.7)$$

а газовыделение из него в единицу времени:

$$q_{(t)} = p \cdot \frac{x}{v} \cdot \varphi . \quad (6.8)$$

В соответствии с принятыми допущениями, что поступающий в лаву воздух чист, а выделившийся из угля метан равномерно перемешивается в призабойном пространстве, из условия сохранения

количества вещества можно записать следующее дифференциальное уравнение баланса газа в призабойном пространстве в процессе регулирования (изменения расхода воздуха):

$$q \cdot dt - (Q_{\text{в}} + q) \cdot C_{\text{м}} \cdot dt = V \cdot dC_{\text{м}}, \quad (6.9)$$

где $q \cdot dt$ - количество метана, выделившегося в призабойное пространство из движущегося на конвейере угля за время dt ; $(Q_{\text{в}} + q) \cdot C_{\text{м}} \cdot dt$ - количество метана, вынесенное исходящей струей из лавы за время dt ; $V \cdot dC_{\text{м}}$ - изменение количества метана в объеме призабойного пространства лавы.

Интегрируя уравнение (6.9) при начальном условии $t=0$ и $C = C_0$ получим:

$$C_{\text{м}} = C_{\text{л}} + (C_0 - C_{\text{л}}) \cdot \exp\left(-\frac{Q_{\text{в}} + q}{V} \cdot t\right), \quad (6.10)$$

где $C_{\text{л}} = \frac{q}{Q_{\text{в}} + q}$ - концентрация метана в любой точке по длине лавы $0 \leq x \leq l$.

Максимальное значение концентрации метана $C_{\text{лmax}}$ будет в точке $x=l$ (при работе комбайна у сопряжения лавы с вентиляционным штреком). С учетом принятого условия, что поступающий в лаву воздух не содержит метана ($C_0 = 0$), получаем:

$$C_{\text{лmax}} = \frac{q}{Q_{\text{в}} + q} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{Q_{\text{в}} + q}{V} t\right)\right]. \quad (6.11)$$

При изменении расхода воздуха по экспоненциальному закону (6.3) дебит метана из отбитого угля в призабойное пространство составит:

$$q_y = \frac{qQ_i}{Q_i + q} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{Q_i + q}{V} \cdot t\right)\right] \quad (6.12)$$

Метановыделение в призабойное пространство из обнаженной поверхности пласта зависит от многих природных горно-геологических и горнотехнических факторов, характеризующих разрабатываемый пласт. При рассмотрении фактора метановыделения из обнаженной поверхности пласта примем следующие допущения: комбайн в лаве не работает; свежий воздух, поступающий в лаву, метана не содержит; нарастание метана по

длине лавы равномерное, газовыделение с единицы обнаженной поверхности пласта в момент ее обнажения q_0 , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Тогда газопоступление по длине лавы составит:

$$q_L = q_0 \cdot m \cdot l, \quad (6.13)$$

где m - мощность угольного пласта, м; l - длина лавы, м.

Уравнение баланса метана с учетом выноса его на вентиляционный штрек:

$$q_L \cdot dt - (Q_B + q_L)dt \cdot C'_M = V \cdot dC'_M, \quad (6.14)$$

где $q_L \cdot dt$ - количество метана, выделившееся в лаву из обнаженной поверхности пласта за время dt ; $(Q_B + q_L)dt \cdot C'_M$ - количество метана, вынесенного исходящей струей воздуха за время dt ; $V \cdot dC'_M$ - изменение количества метана в объеме лавы.

Решение уравнения (6.14) при начальных условиях $t=0$; $C = C_0 = 0$ имеет вид:

$$C'_M = C_M \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{Q_B + q_L}{V} t\right) \right], \quad (6.15)$$

где $C_M = \frac{q_L}{Q_B + q_L}$, - концентрация метана по длине лавы $0 \leq x \leq l$.

При изменении расхода воздуха на выемочном участке, составляющая дебита метана из обнаженной поверхности пласта в исходящей вентиляционной струе составит:

$$q_{on} = \frac{q_L Q_i}{Q_i + q_L} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{Q_i + q_L}{V} \cdot t\right) \right]. \quad (6.16)$$

В зоне работы выемочного комбайна, при естественном воздухо-распределении по сечению лавы, концентрация метана может превысить допустимые «Правилам безопасности...» нормы. Неравномерность распределения метана в зоне работы комбайна зависит от скорости движения воздушной струи на комбайновой дороге, газоносности пласта, типа выемочной машины, схемы ее работы и т. д. Поэтому, при рассмотрении газопоступления из зоны работы комбайна примем следующие допущения: рабочий процесс комбайна непрерывный с постоянной скоростью резания угля; поступающий в лаву воздух не содержит метана.

При непрерывной работе выемочного комбайна в очистном забое интенсивность газовыделения из зоны разрушения угля определяется по формуле:

$$q_K = \frac{m \cdot r \cdot \gamma \cdot l \cdot \omega_0}{t} . \quad (6.17)$$

Тогда уравнение газового баланса в объеме призабойного пространства по фактору газовыделения из зоны работы комбайна запишем в виде дифференциального уравнения:

$$q_K \cdot dt - (Q_B + q_K) \cdot C_K dt = V \cdot dC_K , \quad (6.18)$$

где $q_K \cdot dt$ - количество метана, выделившегося в лаву из зоны разрушения угля за время dt ; $(Q_B + q_K) \cdot C_K dt$ - количество метана вынесенного из лавы за промежуток времени dt ; $V \cdot dC_K$ - изменение количества метана в объеме лавы.

Решение уравнения (6.18) при начальных условиях $t = 0$; $C = C_0 = 0$ (с учетом принятых допущений) будет иметь вид:

$$C_K = C'_K \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{Q_B + q_K}{V} t\right) \right] , \quad (6.19)$$

где $C'_K = \frac{q_K}{Q_B + q_K}$ - концентрация метана, выделившегося при работе комбайна.

Дебит метана из зоны работы комбайна в призабойное пространство во время регулирования расхода воздуха составит:

$$q_K = \frac{q_K Q_i}{Q_i + q_K} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{Q_i + q_K}{V} \cdot t\right) \right] . \quad (6.20)$$

При рассмотрении вопроса газопоступления в призабойное пространство со свежей струей воздуха и поступления газа из почвы и кровли пласта примем следующие допущения: в лаве нет газовыделения из отбитого угля (комбайн в лаве не работает); отсутствует газовыделение из линии обнаженной поверхности пласта (забой давно остановлен и дегазирован); почва и кровля призабойного пространства также не являются источниками метановыделения (разрабатывается одиночный пласт, пластов-спутников нет). В этом случае, ввиду отсутствия источников метановыделения в призабойное пространство, концентрация на

исходящей струе выемочного участка будет определяться только метаном, поступающим со свежей струей с выработок, расположенных по ходу струи до рассматриваемого очистного забоя.

В этом случае концентрация метана в исходящей вентиляционной струе выемочного участка

$$C_n = \frac{q_n}{Q_v + q_n}, \quad (6.21)$$

где q_n - дебит метана, поступающего в забой со свежей струей; Q_v - расход поступающего на участок воздуха.

При экспоненциальном законе изменения расхода воздуха при его регулировании дебит метана на выемочном участке составит:

$$q_n = C_n \cdot Q_i. \quad (6.22)$$

Вследствие закона неразрывности струи количество метана, содержащееся в объеме лавы V будет равным

$$q_n = C_n \cdot V. \quad (6.23)$$

Рассмотрим случай совместного влияния на неустановившийся газодинамический процесс газопоступления со свежей струей и равномерно распределенного по длине лавы метановыделения $q_{он}$, представляющего собой суммарное газовыделение из почвы, кровли и плоскости пласта (то есть, источников с независимым от резкого изменения перепада давления в лаве). При рассмотрении примем допущения, что комбайн в лаве не работает и угля на конвейере нет. Тогда из условия сохранения количества газа можно записать следующее дифференциальное уравнение баланса газа в призабойном пространстве

$$V \cdot dC'_m = (q_{кн} \cdot x + C_n \cdot Q_v) \cdot dt - (Q_v + q_{кн}) \cdot C'_m dt, \quad (6.24)$$

где $(q_{кн} \cdot x + C_n \cdot Q_v) \cdot dt$ - количество метана, поступившее в лаву за время dt из почвы, кровли и пласта ($q_{кн} \cdot x \cdot dt$) и со свежей струей воздуха ($C_n \cdot Q_v \cdot dt$); $(Q_v + q_{кн}) \cdot C'_m dt$ - количество метана, вынесенное струей воздуха из лавы за время dt ; $V \cdot dC'_m$ - изменение количества метана в объеме лавы.

Решение уравнения (6.24) при начальных условиях $t=0$; $C=C_o$ имеет вид

$$C'_m = C_l + (C_o - C_l) \cdot \exp\left(-\frac{Q_e + q_{kn} \cdot x}{V} \cdot t\right), \quad (6.25)$$

где $C_l = \frac{q_{kn} \cdot x + C_n \cdot Q_e}{Q_e + q_{kn} \cdot x}$ - концентрация метана по длине лавы, об. %, при $0 \leq x \leq l$.

Максимальное значение концентрации метана будет на сопряжении лавы с вентиляционным штреком в точке $x=l$, тогда

$$C'_{m \max} = \frac{q_{kn} \cdot l + C_n \cdot Q_e}{Q_e + q_{kn} \cdot l} + (C_{mo} - \frac{q_{on} \cdot l + C_n \cdot Q_e}{Q_e + q_{kn} \cdot l}) \cdot \exp\left(-\frac{Q_e + q_{nk} \cdot x}{V} \cdot t\right). \quad (6.26)$$

При изменении расхода воздуха по экспоненциальному закону (6.3), дебит метана в исходящей струе во время переходного процесса составит

$$q_l + q_n = \left\{ \frac{q_{kn} \cdot l + C_n \cdot Q_i}{Q_i + q_{kn} \cdot l} + \left[C_{mo} - \frac{q_{kn} \cdot l + C_n \cdot Q_i}{Q_i + q_{kn} \cdot l} \right] \right\} \cdot \exp\left(-\frac{Q_i + q_{kn} \cdot l}{V} \cdot t\right) \cdot Q_i \quad (6.27)$$

Следуя принципу суперпозиции, в соответствии с формулами (6.3, 6.12, 6.16, 6.20, 6.27) получим формулу для определения величины газовыделения в призабойном пространстве при изменении расхода воздуха

$$q_{np} = \left\{ C'_x + (C_o - C_x) \cdot \exp\left[-(q_{np} + Q_i) \cdot t/V\right] \right\} \cdot Q_i, \quad (6.28)$$

где $C'_x = \frac{q_{np} + C_n \cdot Q_i}{q_{np} + Q_i}$ - концентрация метана в любой точке лавы при переходном процессе.

Определение зависимости дебита метана из выработанного пространства от давления, расхода воздуха и параметров регулятора в процессе регулирования рассмотрим на примере выемочного участка, отрабатывающего длинный столб обратным ходом (рис. 6.1).

Депрессия на вентиляционном штреке между сечениями 1-1 и 2-2 при установившихся режимах проветривания затрачивается на перемещение воздуха по выработке и преодоление сопротивления регулятора:

$$h_{1-2} = P_c - P_p = r l_e Q_0^2 + h_p; \quad (6.29)$$

$$h'_{1-2} = P'_c - P'_p = rl_в Q_1^2 + h'_p, \quad (6.30)$$

где P_c, P'_c - давление в сопряжении лавы с вентиляционным штреком (точка «с») до и после открывания двери регулятора расхода воздуха, Па; P_p, P'_p - давление в сопряжении участкового вентиляционного и главного вентиляционного штреков (точка «р») до и после открывания двери, Па; r - удельное аэродинамическое сопротивление вентиляционного штрека, Па·с²/м⁷; $l_в$ - расстояние от регулятора расхода воздуха до сечения 2-2, м; Q_0, Q_1 - расход воздуха до и после регулирования, м³/с; h_p, h'_p - депрессия на РРВ до и после регулирования, Па.

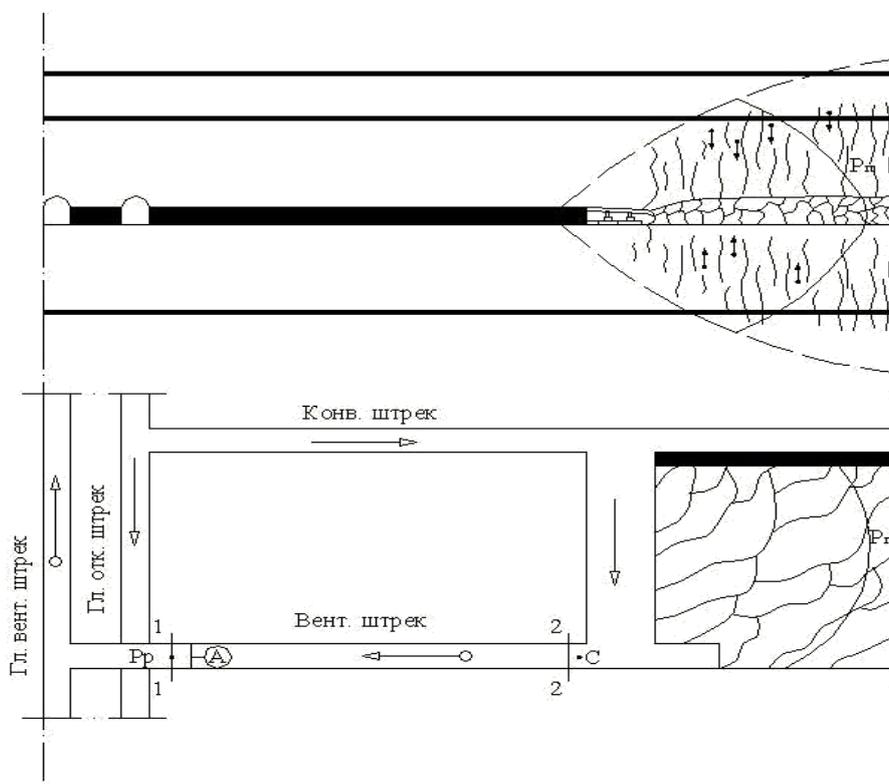


Рисунок 6.1 – Расчетная схема выемочного участка

Вычитая из (6.30) уравнение (6.29), получим величину изменения давления в сечении 2-2, вызванную регулированием расхода воздуха

$$-(\Delta P_c - \Delta P_p) = rl(Q_1^2 - Q_0^2) + \Delta h_p. \quad (6.31)$$

При регулировании расхода воздуха на крыльях разветвленной вентиляционной сети (к главным штрекам примыкает несколько

выемочных участков) изменениями депрессий в местах сопряжения участков штреков с главными можно пренебречь. В этом случае $\Delta P_p = 0$. Если ΔP_p имеет значимую величину, то его необходимо учитывать. Для удобства дальнейшего изложения принимаем $\Delta P_c - \Delta P_p = \Delta P$.

С другой стороны, изменение давления в сечении 2-2 можно определить по параметрам выработанного пространства. Для этого примем, что в выработанном пространстве существует эквипотенциальная поверхность, на которой давление метана не зависит от давления в лаве, т.е. $P_n = \text{const}$ и режим движения газа в выработанном пространстве ламинарный, тогда:

$$P_v - P_c = r_{\text{внл}} \cdot q_0, \quad (6.32)$$

$$P_v - P_c' = r_{\text{внл}} \cdot q_1, \quad (6.33)$$

где $r_{\text{внл}}$ - сопротивление выработанного пространства при ламинарном режиме фильтрации, $\text{Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$; q_0, q_1 - дебит метана до и после регулирования, $\text{м}^3 / \text{с}$.

Вычитая (6.32) из (6.33), получим:

$$\Delta P = P_c - P_c' = r_{\text{внл}} \cdot (q_1 - q_0). \quad (6.34)$$

Продифференцировав это уравнение по времени, получим скорость изменения дебита метана от изменения давления в сечении 2-2

$$\frac{dP}{dt} = r_{\text{внл}} \cdot \frac{dq}{dt}. \quad (6.35)$$

Главной характеристикой регулятора расхода воздуха является пропускная способность РРВ [120], определяемая из зависимости

$$K_p = \frac{Q}{\sqrt{h_p}}, \text{ м}^3 / \text{с} \cdot \text{Па}^{0,5}, \quad (6.36)$$

где Q - расход воздуха через РРВ, $\text{м}^3 / \text{с}$; h - перепад давления на исполнительном органе регулятора, Па ;

откуда изменение депрессии на РРВ при регулировании

$$\Delta h_p = \frac{1}{K^2} \cdot (Q_1^2 - Q_0^2), \text{ Па}. \quad (6.37)$$

После перехода от приращений к дифференциалу выражения (6.31) с учетом (6.37) и падения давления на элементе инерционности, получим:

$$-\frac{dP}{dt} = r \cdot l \cdot 2 \cdot Q \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{K_p^2} \cdot 2 \cdot Q \frac{dQ}{dt} + \lambda \cdot L_a \frac{dQ}{dt},$$

$$-\frac{dP}{dt} = \left(r \cdot l + \frac{1}{K_p^2} \right) \cdot 2 \cdot Q \frac{dQ}{dt} + \lambda \cdot L_a \frac{dQ}{dt}, \quad (6.38)$$

где $L_a = \frac{\rho \cdot l}{S}$ - акустическая масса воздуха, Па·с²/м³; ρ - плотность воздуха, Па·с²/м²; l - длина выработки, м; S - площадь поперечного сечения выработки, м²; $\lambda = c/l$, где c - скорость распространения звука в воздухе, м/с.

Во время переходного процесса происходит изменение массы воздуха в самом объеме выработки за счет сжимаемости, что согласно [29] учитывается акустической гибкостью. Расход воздуха через сечение 2-2 состоит из расхода, протекающего через сечение 1-1 и объема воздуха, накопленного за счет сжимаемости,

$$Q = Q_{I-I} + C_a \cdot \frac{dP}{dt}, \quad (6.39)$$

где $C_a = \frac{S \cdot l}{\rho \cdot c^2}$ - акустическая гибкость воздуха, м³/Па;

Так как время переходного процесса по давлению гораздо меньше, чем по воздуху, в первом приближении будем считать $Q_{I-I} = \text{const}$

Продифференцировав (6.39) по времени и подставив в (6.38), имеем

$$-\frac{dP}{dt} = \left[\left(r \cdot l + \frac{1}{K_p^2} \right) \cdot 2 \cdot Q \right] \cdot C_a \cdot \frac{d^2 Q}{dt^2}. \quad (6.40)$$

Уравнение (6.40) является однородным дифференциальным уравнением второго порядка, корни которого равны:

$$y_1 = \frac{dP}{dt} = 0; \quad y_2 = \frac{dP}{dt} = \frac{1}{2 \cdot \left(r \cdot l + \frac{1}{K_p^2} \right) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a}.$$

Решение уравнения (6.40) имеет вид:

$$\Delta P(t) = C_1 \cdot e^{y_1 t} + C_2 \cdot e^{y_2 t} .$$

Постоянные интегрирования определяются из начальных условий: в начальный момент времени изменение давления равно нулю, т.е. при $t=0$, $\Delta P_{t=0} = 0$, после переходного процесса при $t = \infty$, $\Delta P_{t=\infty} = \Delta P$.

С учетом граничных условий

$$\Delta P(t) = \Delta P \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{1}{2 \cdot (r \cdot l + \frac{1}{K_p^2}) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a} \cdot t \right) \right] . \quad (6.41)$$

Абсолютное значение давления состоит из исходного значения P_0 и приращения давления $\Delta P(t)$, вызванного регулированием

$$P = P_0 + \Delta P(t) . \quad (6.42)$$

Данное уравнение описывает переходной процесс по давлению при регулировании расхода воздуха на выемочном участке.

Продифференцировав (6.41) по времени и подставив в (6.35), имеем:

$$r_{\text{впл}} \cdot \frac{dq}{dt} = \frac{\Delta P}{2 \cdot (r \cdot l + \frac{1}{K_p^2}) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a} \cdot \exp \left(\frac{1}{2 \cdot (r \cdot l + \frac{1}{K_p^2}) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a} \cdot t \right) . \quad (6.43)$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$q = \frac{\Delta P}{r_{\text{впл}}} \cdot \exp \left(\frac{1}{2 \cdot (r \cdot l + \frac{1}{K_p^2}) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a} \cdot t \right) + C . \quad (6.44)$$

Постоянную интегрирования определим из начальных условий при $t=0$, $q=q_0$

$$q_0 = \frac{\Delta P}{r_{внл}} + C; \quad C = q_0 - \frac{\Delta P}{r_{внл}}. \quad (6.45)$$

С учетом постоянной интегрирования при ламинарном режиме фильтрации дебит метана во время регулирования изменяется по зависимости:

$$q_l = q_0 + \frac{\Delta P}{r_{внл}} \cdot \left[\exp \left(\frac{1}{2 \cdot (r \cdot l + \frac{1}{K_p^2}) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a} \cdot t \right) - 1 \right]. \quad (6.46)$$

Если принять режим движения газа в выработанном пространстве турбулентным, уравнения (6.32) и (6.33) запишутся так:

$$P_c - P_a = r_{вн} \cdot q_0^2; \quad P_c - P_a' = r_{вн} \cdot q_1^2, \quad (6.47)$$

а уравнение (6.35) примет вид:

$$\frac{dP}{dt} = r_{вн} \cdot 2 \cdot q \cdot \frac{dq}{dt}. \quad (6.48)$$

Продифференцировав (6.42) по времени и подставив в (6.48), получим:

$$r_{вн} \cdot q \cdot \frac{dq}{dt} = - \frac{\Delta P}{2 \cdot (r \cdot l + \frac{1}{K_p^2}) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a} \cdot \exp \left(\frac{1}{2 \cdot (r \cdot l + \frac{1}{K_p^2}) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a} \cdot t \right). \quad (6.49)$$

Интегрируя это уравнение, имеем:

$$r_{вн} \cdot q^2 = \Delta P \cdot \exp \left(\frac{1}{2 \cdot (r \cdot l + \frac{1}{K_p^2}) \cdot C_a \cdot Q + \lambda \cdot L_a \cdot C_a} \cdot t \right) + C. \quad (6.50)$$

Постоянную интегрирования определим из начальных условий, на начальный момент ($t=0$) дебит метана равен установившемуся значению до переходного процесса ($q = q_0$)

$$q_0^2 = \frac{\Delta P}{r_{en}} + C .$$

С учетом постоянной интегрирования при турбулентном режиме фильтрации зависимость дебита метана во времени от давления, расхода воздуха и параметров регулятора имеет вид:

$$q_{en} = \left[q_0^2 \pm \Delta P / r_{en} \cdot \exp\left(2 \cdot (r \cdot l + 1 / K_p^2) \cdot C_a \cdot Q_i + \lambda \cdot L_a \cdot C_a\right) \cdot t - 1 \right]^{0.5} . \quad (6.51)$$

Проведенные исследования позволяют аналитически описать переходные аэродинамические процессы на выемочном участке угольной шахты с учетом падения давления на элементе инерционности, изменения массы воздуха в самом объеме выработки за счет сжимаемости при изменении расхода воздуха, протекающего через данный участок.

Таким образом, в результате аналитических исследований получила дальнейшее развитие математическая модель вентиляционной сети добычного участка угольной шахты как объекта управления, которая включает аналитическое описание газодинамических процессов по источникам их поступления и отличается одновременным учетом динамических и инерционных свойств воздушного потока, что позволяет прогнозировать величину всплеска концентрации метана при управлении проветриванием на выемочном участке.

6.3 Экспериментальное исследование переходных аэродинамических процессов на выемочных участках

Инерционные свойства шахтных вентиляционных сетей можно определить непосредственными измерениями на конкретных объектах. Но практически не существует одинаковых добычных участков в пределах одной шахты с точки зрения протекающих на них аэрогазодинамических процессов, в связи с чем такие измерения проводят в широких масштабах. На выемочных участках регистрируются изменения давления, расходы воздуха и

концентрации метана во времени после скачкообразного возмущения, единичного импульса возмущения, серии импульсных возмущений одного знака и импульсных возмущений разных знаков.

Для определения инерционных свойств шахтной вентиляционной сети в целом достаточно установить характер изменения давления и дебита воздуха во времени при скачкообразных возмущениях. Для решения этого вопроса, оценивая специфику аэрогазодинамических процессов и инерционных свойств призабойного пространства, с одной стороны, и специфику аэрогазодинамических процессов и инерционных свойств выработанного пространства, с другой, необходимо получить хотя бы приближенное их описание.

Натурные эксперименты по исследованию переходных аэрогазодинамических процессов были проведены в условиях 2-ой и 3-ей западных лав пласта l_4 акционерного предприятия «Шахта им. А. Ф. Засядько». Вентиляционные двери установлены на выходе из вентиляционного и конвейерного штреков.

Результаты экспериментальных исследований газовой динамики выемочных участков при кратковременном открывании транспортной двери регулятора расхода воздуха приведены в табл. 6.1. Переходные характеристики по давлению, расходу воздуха, дебиту и концентрации метана при открытии и закрытии РРВ показаны на рис. 6.2. Скачкообразное изменение сопротивления участковых регуляторов расхода воздуха приводит к изменению давления на сопряжении лав со штреками на 200 Па в течении 1-2 с (рис. 6.2, а), что на некоторых участках приводило до четырехкратного увеличения дебита метана (рис. 6.2, б), и соответственно, к всплескам его концентрации в исходящих струях участков (рис. 6.2, в).

Анализ результатов натурального эксперимента показал, что скорость изменения дебита воздуха на сопряжении лавы с вентиляционным штреком и на выходе из участка различна. Переходной процесс по воздуху на участке начинается со сдвигом на промежуток времени, равный длительности переходного процесса по давлению между источником возмущения (исполнительным устройством регулятора расхода воздуха) и точкой определения переходного процесса по воздуху.

Возникновение всплеска концентрации метана в исходящей струе участка (рис. 6.2, г) связано с активным участием в системе проветривания выработанных пространств, куда газ поступает из

близлежащих пластов-спутников. Увеличение подачи воздуха на участок сопровождается увеличением дебита утечек, движущихся сквозь выработанное пространство.

Таблица 6.1 – Результаты экспериментальных исследований газовой динамики выемочных участков при кратковременном открывании транспортной двери регулятора расхода воздуха

Время, с	Лавы № 3 зап. пл. l_4 $L_{штр}$ = 200 м; $L_л$ = 260 м; $S = 16,1 \text{ м}^2$; $m = 0,95 \text{ м}$; $r = 0,17 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$			Лавы № 2 зап. пл. l_4 $L_{штр}$ = 70 м; $L_л$ = 270 м; $S = 16,1 \text{ м}^2$; $m = 0,90 \text{ м}$; $r = 0,099 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$		
	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	Концентрация метана, об. %	Давление воздуха, ГПа	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	Концентрация метана, об. %	Давление воздуха, ГПа
0	22,20	0,37	1129,50	9,20	0,26	1127,40
2	22,20	0,37	1127,70	9,20	0,26	1126,30
4	22,40	0,38	1127,70	9,25	0,27	1126,30
6	22,45	0,39	1127,70	9,30	0,27	1126,20
10	22,50	0,42	1127,70	9,38	0,31	1126,30
30	22,90	0,44	1127,70	9,60	0,33	1126,30
60	23,35	0,43	1127,60	10,10	0,32	1126,20
120	24,20	0,42	1127,60	10,50	0,31	1126,30
180	25,00	0,41	1127,70	11,10	0,30	1126,50
360	25,60	0,39	1127,70	11,60	0,28	1126,30
720	26,00	0,39	1127,70	11,90	0,27	1126,40
1080	26,00	0,39	1127,80	12,00	0,27	1126,40
1200	26,00	0,38	1127,80	12,00	0,27	1126,30

Примечание. $L_{штр}$ - длина штрека от лавы до вентиляционной двери, м; $L_л$ - длина лавы, м; S - сечение бортового штрека, м^2 ; m - мощность угольного пласта, м; r - аэродинамическое сопротивление бортового штрека, $\text{Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$.

Под влиянием возросшей депрессии утечки более интенсивно «промывают» выработанное пространство, в результате чего на вентиляционный штрек выносятся дополнительное количество газа, вызывая всплески дебита и концентрации метана.

На параметры всплеска, величину и длительность, по-видимому, влияет и увеличившаяся депрессия, способствующая более интенсивному отсосу метана из выработанного пространства каналов и трещин, по которым он фильтруется из спутников. Следствием

резкого увеличения дебита утечек является повышение степени турбулизации струек воздуха внутри выработанного пространства, что приводит к более интенсивному перемешиванию и выносу газа.

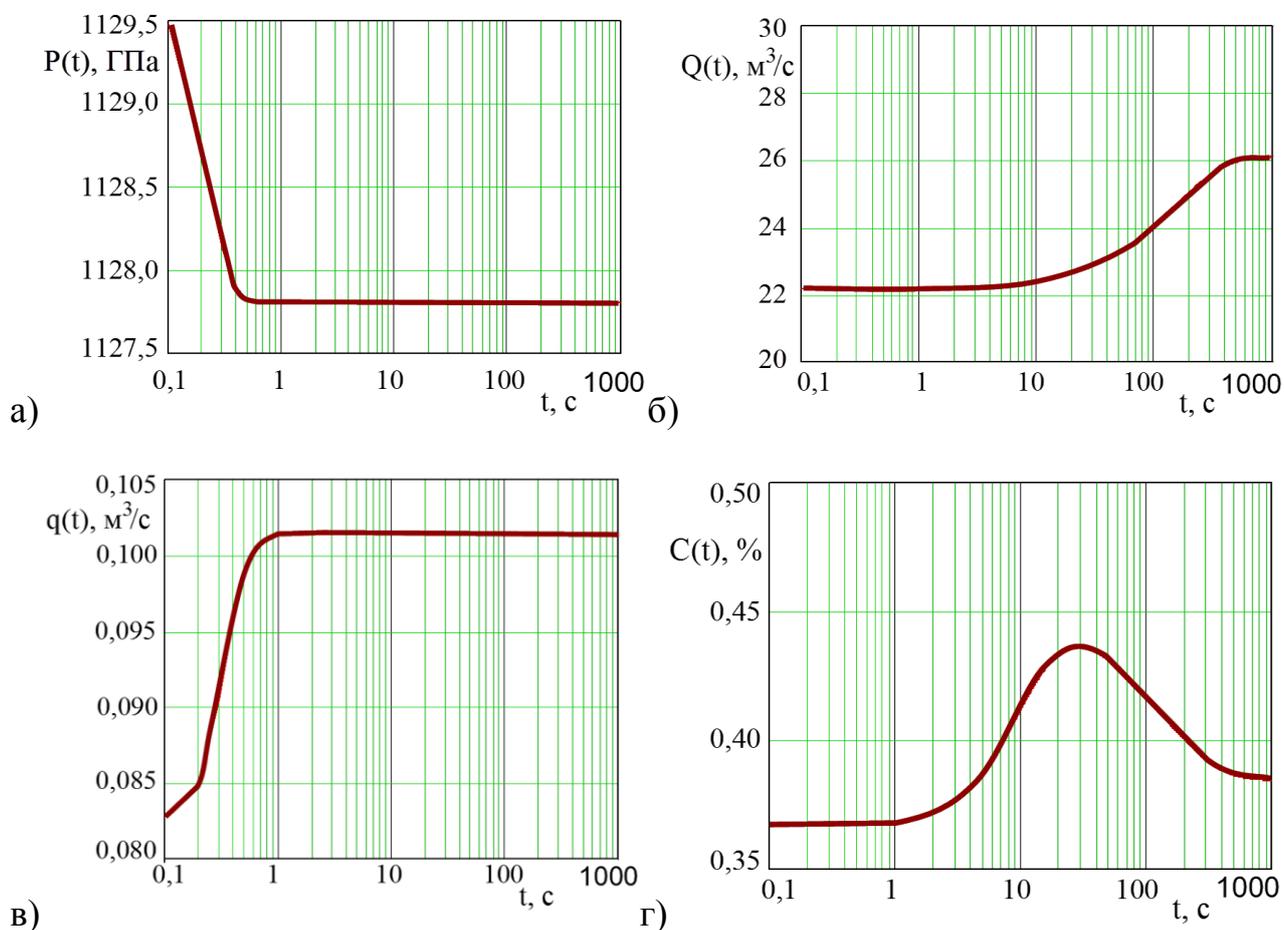
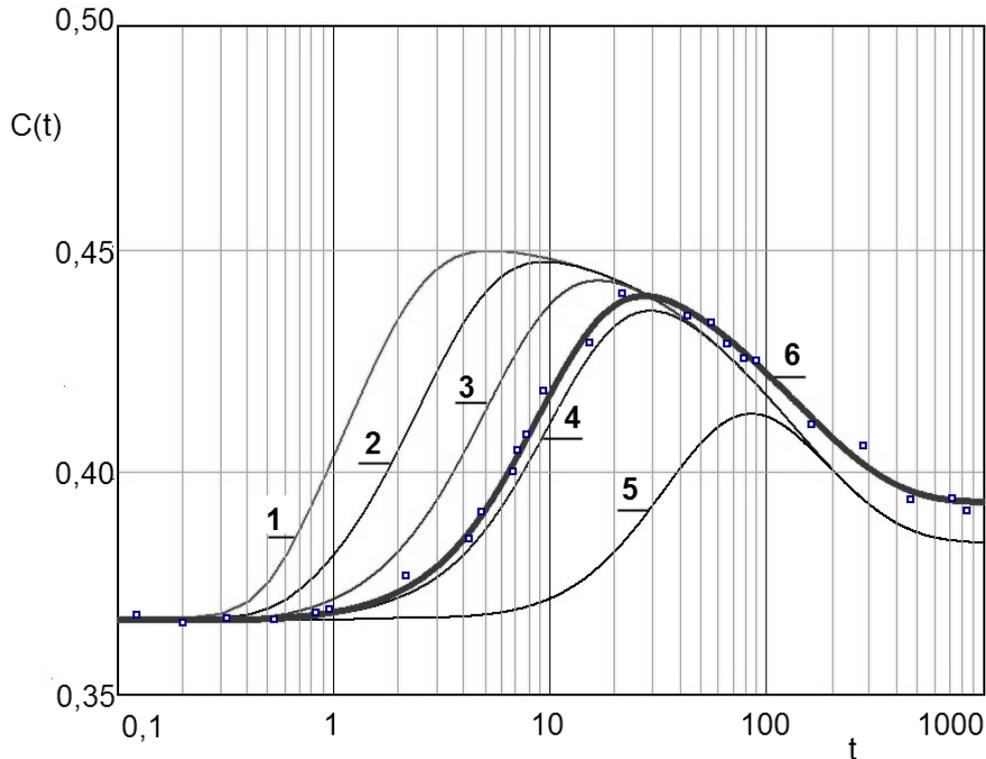


Рисунок 6.2 – Переходные характеристики: а – по давлению; б – по расходу воздуха; в – по дебиту метана; г – по концентрации метана

Для исследования характера изменения величины всплеска концентрации метана от акустических свойств заключенного в выработках добычного участка объема воздуха, произведен расчет газодинамических параметров на математической модели для условий третьей западной лавы пласта l_4 при одинаковом факторе влияния и последующее сравнение с результатами натурного эксперимента (рис. 6.3). Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что по мере отработки столба обратным ходом величина максимума содержания метана увеличивается. На основе обработки этих результатов была получена качественная характеристика влияния акустических параметров воздушного потока на величину всплеска содержания метана.



1-5 – данные математического моделирования при длине вентиляционного штрека 50 м, 100 м, 200 м, 400 м и 1500 м соответственно; 6 – по данным шахтного эксперимента (длина штрека 200 м).

Рисунок 6.3 – Зависимость относительного всплеска содержания метана от длины вентиляционного штрека

Установлена зависимость относительной величины всплеска содержания метана от расстояния до источника возмущения воздушного потока, учитывающая его акустические свойства (рис. 6.4), которая описывается зависимостью

$$W = 1,18 \cdot \exp(-0,07L_{штр}) . \quad (6.52)$$

где $L_{штр}$ – длина штрека.

Анализ полученной зависимости свидетельствует о том, что при принятой на шахте системе разработки обратным ходом столбами длиной порядка 2000 м, величина всплеска содержания метана по мере отработки столба может возрасти до 30 % при одном и том же возмущающем факторе.

Установлено, что амплитудное значение концентрации метана при переходном аэрогазодинамическом процессе в горной выработке прямо пропорционально зависит от инерционных параметров

газовоздушного потока и обратно пропорционально от длины выработки. Достоверность подтверждается корректной постановкой задач, принятыми физическими предпосылками, которые базируются на фундаментальных законах аэрогазодинамики, согласованностью результатов математического моделирования газовой динамики с результатами шахтных исследований в действующих горных выработках.

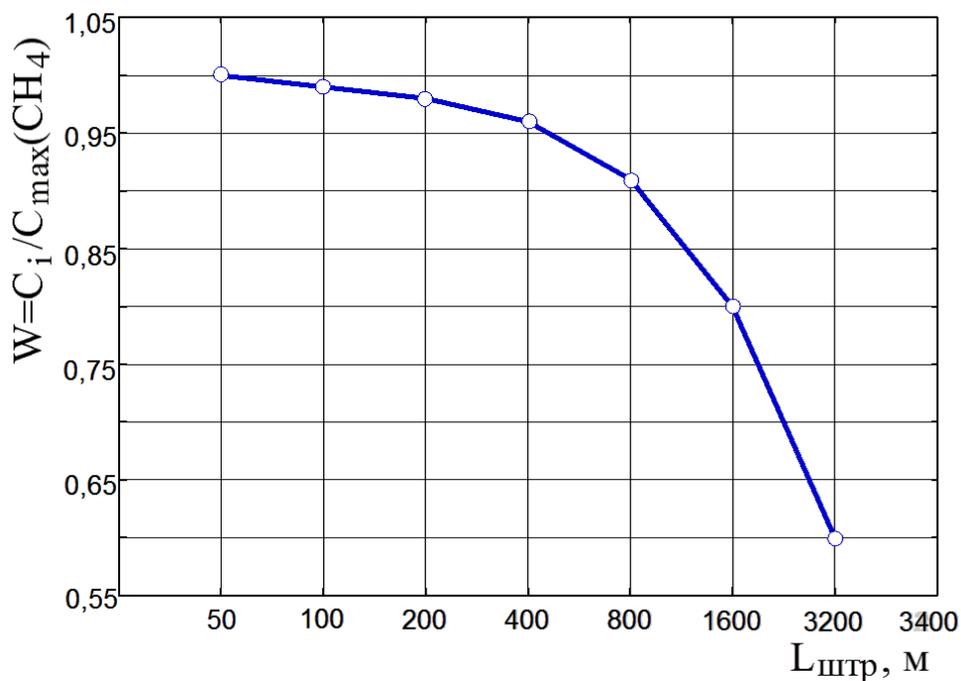


Рисунок 6.4 – Зависимость относительной величины всплеска концентрации метана от длины вентиляционного штрека

Таким образом, в результате аналитических и экспериментальных исследований установлена зависимость величины всплеска содержания метана на выемочном участке от расстояния до источника возмущения воздушного потока, учитывающая его акустические свойства.

Результаты проверки на натурном объекте полученных аналитических зависимостей подтвердили их достоверность, сходимость расчетных параметров аэрогазодинамических процессов на добычном участке при регулировании расхода воздуха с результатами шахтного эксперимента.

Проведенные исследования переходных газодинамических процессов с учетом пропускной способности исполнительного устройства регулятора расхода воздуха позволяют прогнозировать

величину всплеска концентрации метана и по результатам натурального эксперимента определять качественные характеристики проветривания при регулировании расхода воздуха на выемочном участке угольной шахты.

6.4 Разработка математической модели управления проветриванием добычного участка угольной шахты

Проектирование оперативного управления проветриванием добычного участка базируется на математическом описании динамических свойств вентиляционной сети участка как объекта управления. При этом нет необходимости знать характер переходных газовых режимов во всех точках выработок и выработанного пространства. Достаточно иметь интегральные характеристики переходных аэрогазодинамических процессов в заданных пунктах схемы проветривания участка (например, в исходящей струе участка и на выходе из лавы).

Эти характеристики могут быть определены из решения уравнений аэрогазодинамики (6.3, 6.48, 6.51). Если ограничиться задачей синтеза системы регулирования содержанием метана на исходящей струе участка, можно получить математическое описание схемы проветривания участка, рассматривая ее как объект с сосредоточенными параметрами со следующими выходными переменными: Q – расход воздуха, C – концентрация метана в исходящей струе участка.

В соответствии с [1, 2, 114] для анализа и синтеза автоматического управления наиболее приемлемым является способ поэлементного математического описания систем.

Выразим зависимости (6.3, 6.48, 6.51) через передаточные функции. Произведем сравнение экспериментальной переходной характеристики штрека по воздуху и переходной характеристики модели штрека по воздуху при нулевых начальных условиях.

Математическая модель штрека представлена в виде передаточной функции как отношение количества воздуха на выходе ($Q_{вых}$) к количеству воздуха на входе ($Q_{вх}$).

$$W_{(Q)} = \frac{Q_{вых}}{Q_{вх}}, \quad W_{(Q)} = \frac{K_Q}{T_Q \cdot p + 1} \exp(-tz \cdot p). \quad (6.53)$$

Это инерционное звено первого порядка с запаздыванием. Постоянная времени запаздывания $t_c = l/c$ (l – длина штрека, м; c – скорость распространения звука, м/с).

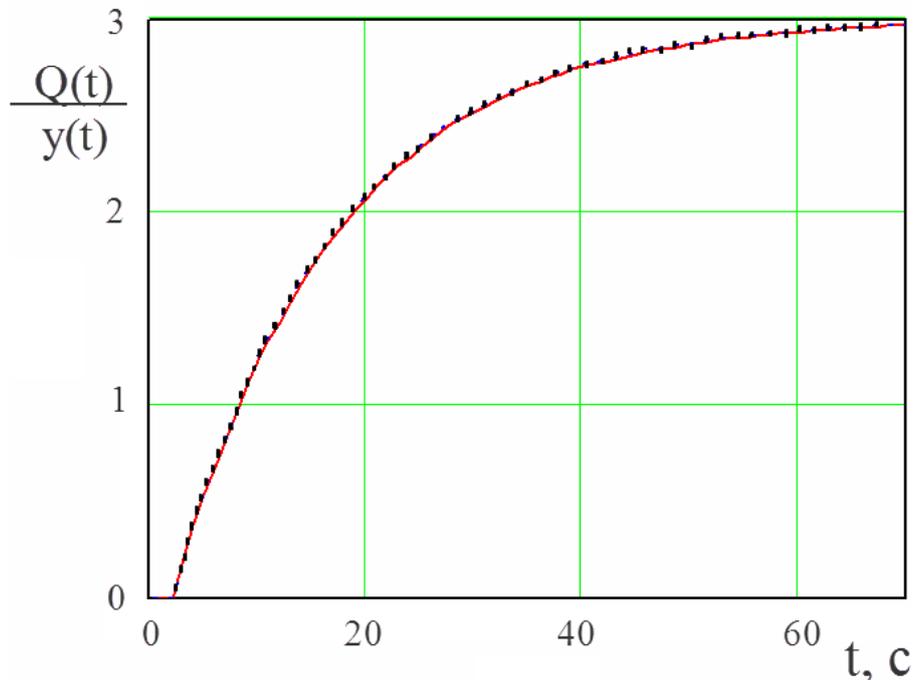
Учитывая, что для каждого выемочного участка расчетным путем определяются предельные значения количества проходящего по нему воздуха, Q_{\min} является ненулевым начальным условием

$$Q_{\text{вых}} = \frac{K_Q \cdot \exp(-tz \cdot p)}{T_Q \cdot p + 1} Q_{\text{вх}}. \quad (6.54)$$

Передаточная функция по воздуху имеет вид

$$y(t) := \frac{K \cdot \exp(-2.018p)}{(T \cdot p + 1) \cdot p} \cdot dQ \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, } p \\ \text{float, } 3 \end{array} \right. \rightarrow -3 \cdot \Phi(t - 2.02) \cdot \exp(-6.54 \cdot 10^{-2} \cdot t + .132) + 3 \cdot \Phi(t - 2.02)$$

Проверка совпадения экспериментальной переходной характеристики и переходной характеристики модели при нулевых начальных условиях показала высокую сходимость (рис. 6.5).



- – экспериментальная переходная характеристика;
- – переходная характеристика модели

Рисунок 6.5 – Сравнение переходных характеристик по воздуху

Аналогично были получены передаточные функции:
по давлению

$$W_{(p)} = \frac{K_p \cdot (T_1 \cdot p + 1)}{T_2 \cdot p + 1}; \quad (6.55)$$

по дебиту метана

$$W_{(q)} = \frac{K_q}{T_q \cdot p + 1}. \quad (6.56)$$

Разработка системы автоматического управления (САУ) проветриванием добычного участка требует определения параметров управления и выбора закона управления.

Моделирование производилось с учетом параметров добычного участка № 3 (запад) пл. 1₄ АП «Шахта им. А. Ф. Засядько».

Исходя из свойств объекта, выберем пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон управления. Исследование и расчет параметров регулятора осуществляется машинным методом, с использованием приложения Nonlinear Control Design пакета Matlab.

Данный метод базируется на синтезе параметров регулятора по минимуму среднеквадратичной ошибки. С его использованием можно определять параметры аналогового и цифрового закона управления как линейного, так и нелинейного объекта.

Нами поставлена задача синтезировать цифровой ПИД-закон управления, используя модель САУ. При этом, во избежание превышения концентрации метана на добычном участке в процессе регулирования выше допустимой ПБ, задаем ограничение на величину всплеска метана до 0,1%.

Произведем синтез цифровой системы управления по ее аналоговой модели с применением ПИД - закона управления объектом.

Для реализации поставленной задачи, воспользуемся пакетом Nonlinear Control Design. В пакете Simulink создаем непрерывную модель САУ с использованием возможностей блока NCD Blockset. Структурная схема объекта показана на рис. 6.6.

Неизвестные параметры структурной схемы K_p , K_i , K_d и T_d заданы в неявной форме в виде начальных значений параметров ПИД (PID)-закона управления. В режиме командной строки Matlab задаем начальные значения параметров PID-закона управления $K_p=1$; $K_i=0,5$; $K_d=1$; $T_d=1$.

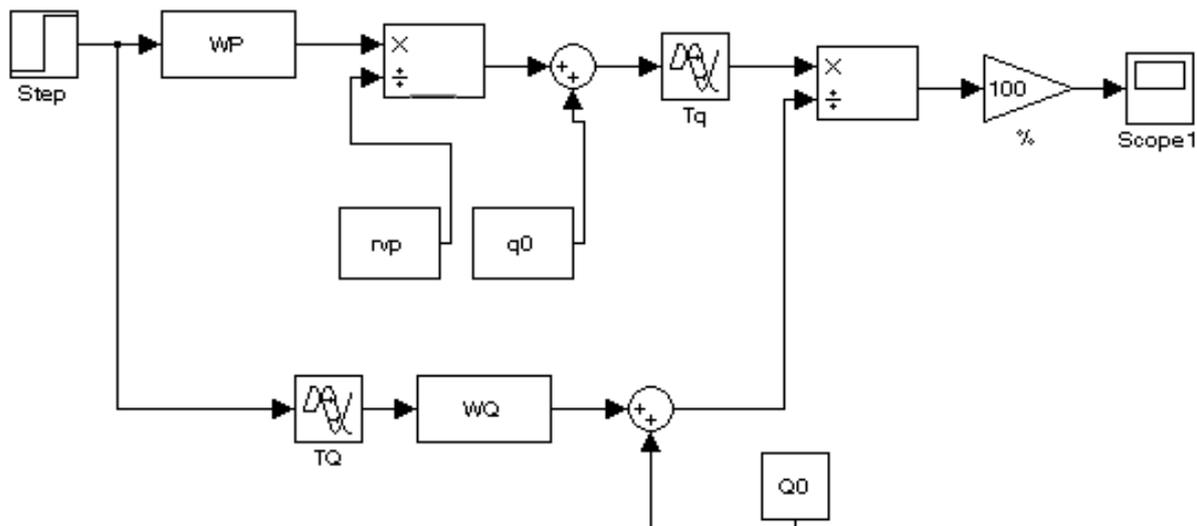


Рисунок 6.6 – Структурная схема объекта управления проветриванием выемочного участка угольной шахты

Внутри блока NCD Output задается диапазон изменения концентрации метана в необходимых пределах.

При помощи блока NCD Output, в меню Optimization – Parameters, задаются интервал дискретизации, искомые параметры и возможный диапазон их изменений. Полученные оптимизированные параметры $K_p = 0,0547$, $K_i = 0,0098$, $K_d = 0,063$, $T_d = 3$ использованы при моделировании переходного процесса в непрерывной САУ (рис. 6.7).

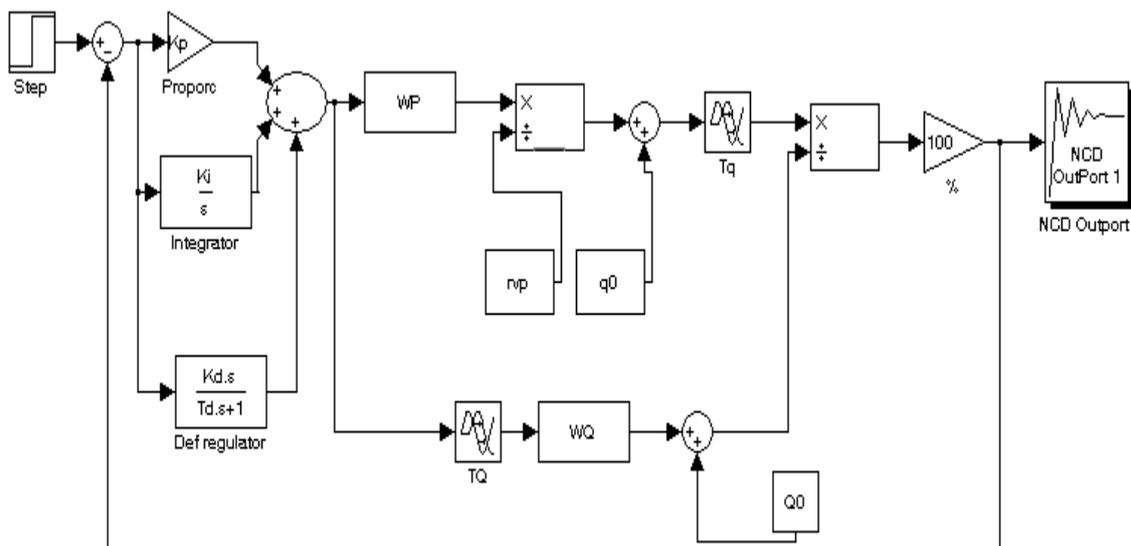


Рисунок 6.7 – Структурная схема объекта управления проветриванием добычного участка угольной шахты с ПИД – регулятором

По результатам моделирования (рис. 6.8) всплеск под воздействием ПИД – закона управления ограничен необходимым пределом, условия задания выполнены – качество переходного процесса отвечает предъявляемым требованиям.

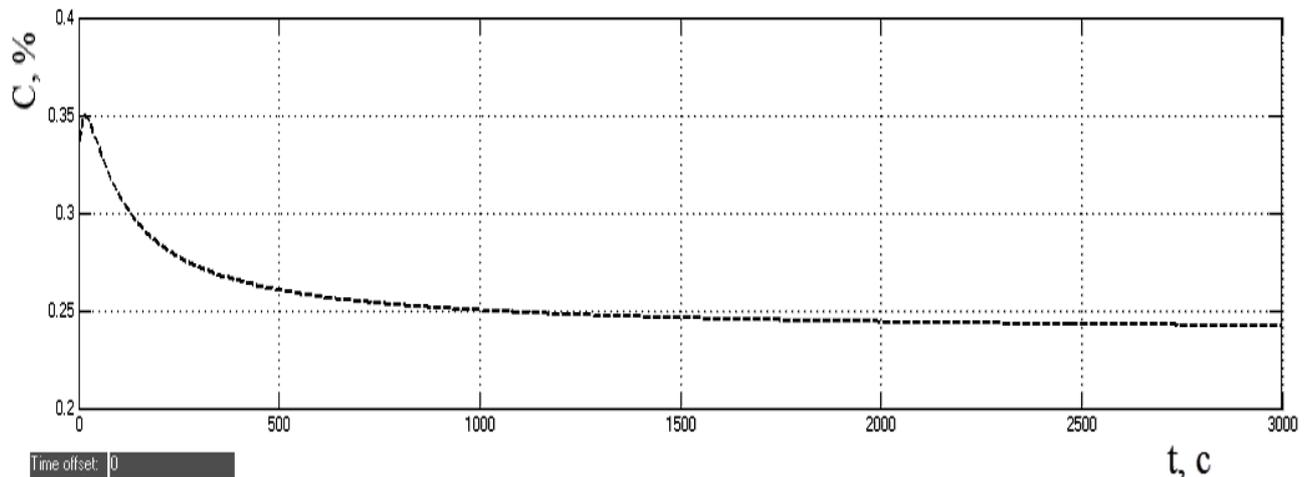


Рисунок 6.8 – Переходной процесс по содержанию метана САУ с ПИД - законом управления

С целью выбора рационального способа управления вентиляционным режимом добычного участка, с точки зрения закона регулирования объектом управления, проведем сравнение характеристик САУ с непрерывной моделью ее цифрового аналога (рис. 6.9). Для этого также воспользуемся пакетом Simulink.

Результат моделирования управления проветриванием добычного участка с непрерывным и цифровым регуляторами представлен на рис. 6.10.

Из рис. 6.10 видно, что цифровой ПИД – закон управления практически полностью повторяет результаты непрерывного регулятора и обеспечивает выполнение требований задания.

Математическое моделирование добычного участка, как объекта управления проветриванием с применением пакета Matlab показало совпадение математической модели с результатами экспериментов на реальном объекте. В результате синтеза системы автоматического управления проветриванием получен незначительный всплеск метана, что является допустимым при проветривании добычных участков на угольных шахтах.

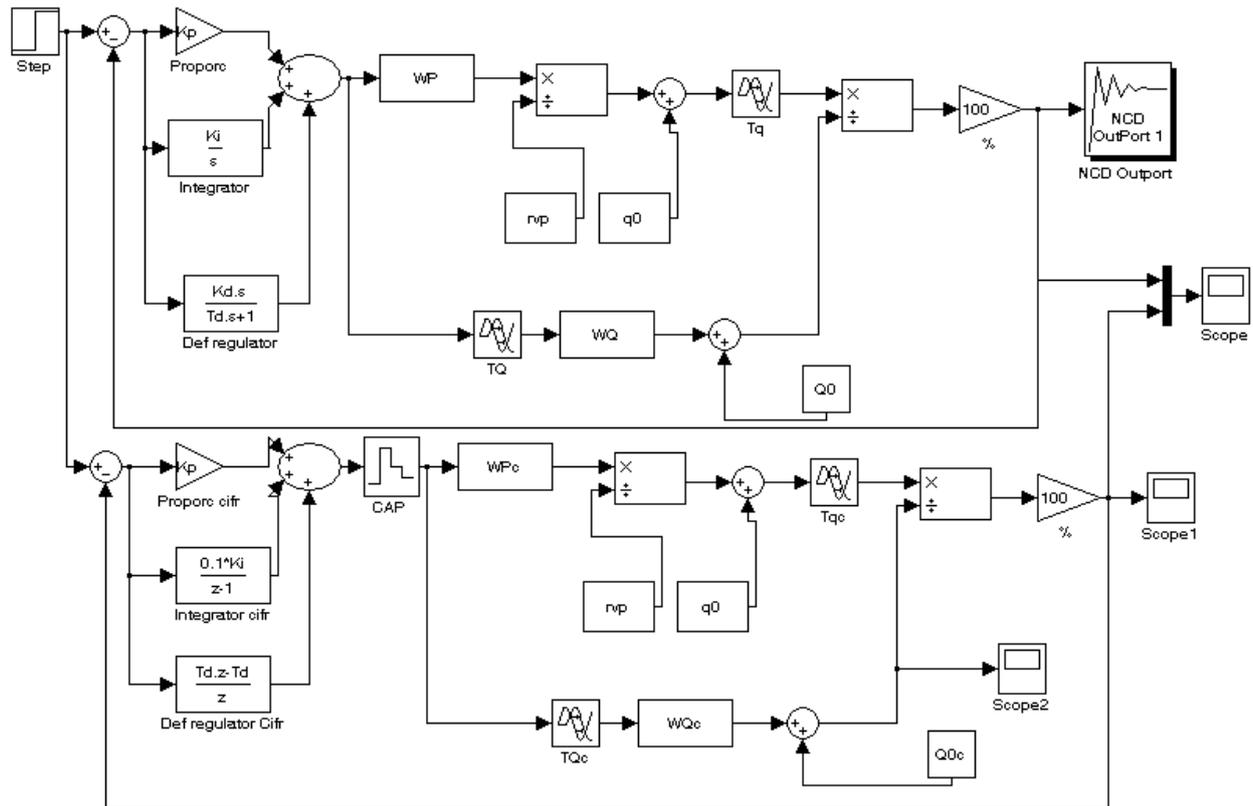


Рисунок 6.9 – Структурная схема объекта управления проветриванием добычного участка угольной шахты с непрерывным и цифровым регуляторами

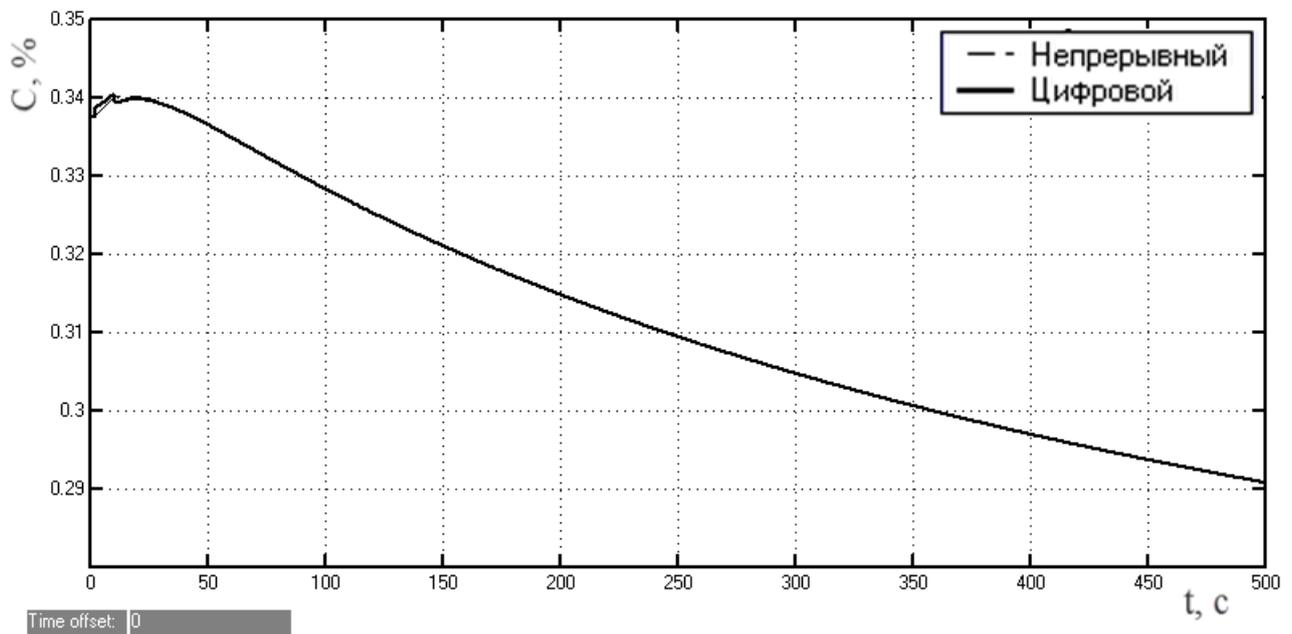


Рисунок 6.10 – Сравнение переходных процессов САУ с непрерывным и цифровым регуляторами

6.5 Выводы по разделу

Получила дальнейшее развитие математическая модель вентиляционной сети добычного участка угольной шахты как объекта управления, которая включает аналитическое описание газодинамических процессов по источникам их поступления и отличается одновременным учетом динамических и инерционных свойств воздушного потока.

Впервые установлена зависимость величины всплеска содержания метана на выемочном участке от расстояния до источника возмущения воздушного потока, учитывающая его акустические свойства.

Методом математического моделирования установлено, что характер газодинамических процессов при изменении расхода воздуха на выемочном участке угольной шахты зависит от длины вентиляционного штрека, при этом, по мере отработки столба обратным ходом, величина всплеска концентрации метана возрастает при одном и том же возмущающем факторе, что подтверждено результатами натурных исследований (до 30 % для конкретного случая).

Установлено, что амплитудное значение концентрации метана при возникновении переходных аэрогазодинамических процессов в горной выработке прямо пропорционально зависит от инерционных параметров газоздушного потока и обратно пропорционально от длины выработки. Достоверность подтверждается корректной постановкой задач, принятыми физическими предпосылками, которые базируются на фундаментальных законах аэрогазодинамики, согласованностью результатов математического моделирования газовой динамики с результатами шахтных исследований в действующих горных выработках.

На базе разработанной математической модели аэрогазодинамических процессов описаны динамические свойства вентиляционной сети участка и предложен пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления при создании, в перспективе, системы автоматического регулирования проветриванием.

Разработаны алгоритм и программное обеспечение работы системы автоматического управления проветриванием добычного участка, определены аппаратные средства, позволяющие реализовать алгоритм управления. Внедрение разработки в практику рудничной вентиляции позволит эффективно использовать подаваемый в шахту воздух, повысить экономические показатели вентиляции, увеличить нагрузку на забой и улучшить безопасность труда горнорабочих.

7 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОЧИСНЫХ РАБОТ

7.1 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния слоистого породного массива с учетом разрушения

При ведении очистных работ в горном массиве происходят тесно взаимосвязанные геомеханические и газодинамические процессы. К ним относятся процессы сдвигения, трещинообразования и расслоения пород, десорбции и фильтрация газа. Характер протекания указанных процессов обуславливает сложную газодинамическую обстановку добычного участка и косвенно влияет на темпы ведения горных работ. При этом, существующие методы управления проветриванием выемочных участков по газовому фактору недостаточно эффективны, поскольку они не учитывают реальное геомеханическое состояние вмещающих пород участка, их метаноносность и трещиноватость, повышенное метановыделение из выработанного пространства лавы, подготовительных выработок и их сопряжений в особенности при посадке кровли.

Поскольку породный массив имеет весьма сложное строение, обусловленное разнообразием структур залегания пластов, слоистостью, их геологической нарушенностью, трещиноватостью, разбросом прочностных свойств, то исследования выполнены методом конечных элементов в плоской постановке, единственным известным в настоящее время методом, позволяющим моделировать объекты такой сложности. Этим методом рассчитывают мосты, тоннели, подземные и наземные строительные объекты. К сожалению, методы объемного математического моделирования разработаны только для однородных сред, поэтому, несмотря на свою привлекательность, их возможности значительно уступают при решении данных задач.

Расчеты проведены на вычислительном комплексе «ГЕО-РС (v.5.0.)», разработанном ИГТМ НАН Украины [101-103]. Методика оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива включает: ввод в расчетную схему реальных данных по напластованию горных пород, их физико-механическим

свойствам горных пород и элементам технологии ведения горных работ; определение и анализ разрушенных зон по длине выемочного столба, в которых наиболее интенсивно происходят деформационные и фильтрационные процессы; определение текущей стадии деформирования массива по результатам шахтных исследований; поэтапные расчеты ориентации эксплуатационных трещин с учетом разрушения реальных источников метановыделения. Для решения сложных задач анализа НДС в упругопластической постановке совмещены процедуры метода конечных элементов (МКЭ) и метода начальных напряжений (МНН). Определение предельных состояний породного массива дает возможность максимально приблизить математическую модель разрушения неупругой среды к реальному поведению горных пород под действием нагрузки [119].

Необходимо подчеркнуть, что при проведении каждой последующей итерации программа автоматически вычисляет и отслеживает состояние каждого элемента, автоматически производит необходимые замены даже при разрыве одной связи между узлами. Весьма важным для решения задач, связанных с оценкой потоков метана в газонасыщенном породном массиве является то, что в программе реализована объектно-ориентированная технология компьютерного анализа, которая отличается расчетом возможных направлений линий скольжения и определением ориентации техногенных трещин с учетом доминирующих систем естественной трещиноватости [102]. Это является существенным преимуществом, так как дает широкие возможности для определения наиболее вероятных областей зарождения и прогноза распространения зон разрушения в массиве, позволяет детально исследовать сложные геомеханические процессы, оказывающие превалирующее влияние на газовыделение в выработки.

Кроме методического и математического обеспечения расчетов при разработке геомеханической расчетной схемы большое значение имеет правильный учет исходных данных путем задания корректных граничных условий. Поэтому разработка геомеханических моделей включает три этапа: структурирование массива по литологическим типам, разработку физических моделей с заданием силовых граничных условий, разработку геомеханических расчетных схем (рис. 7.1).

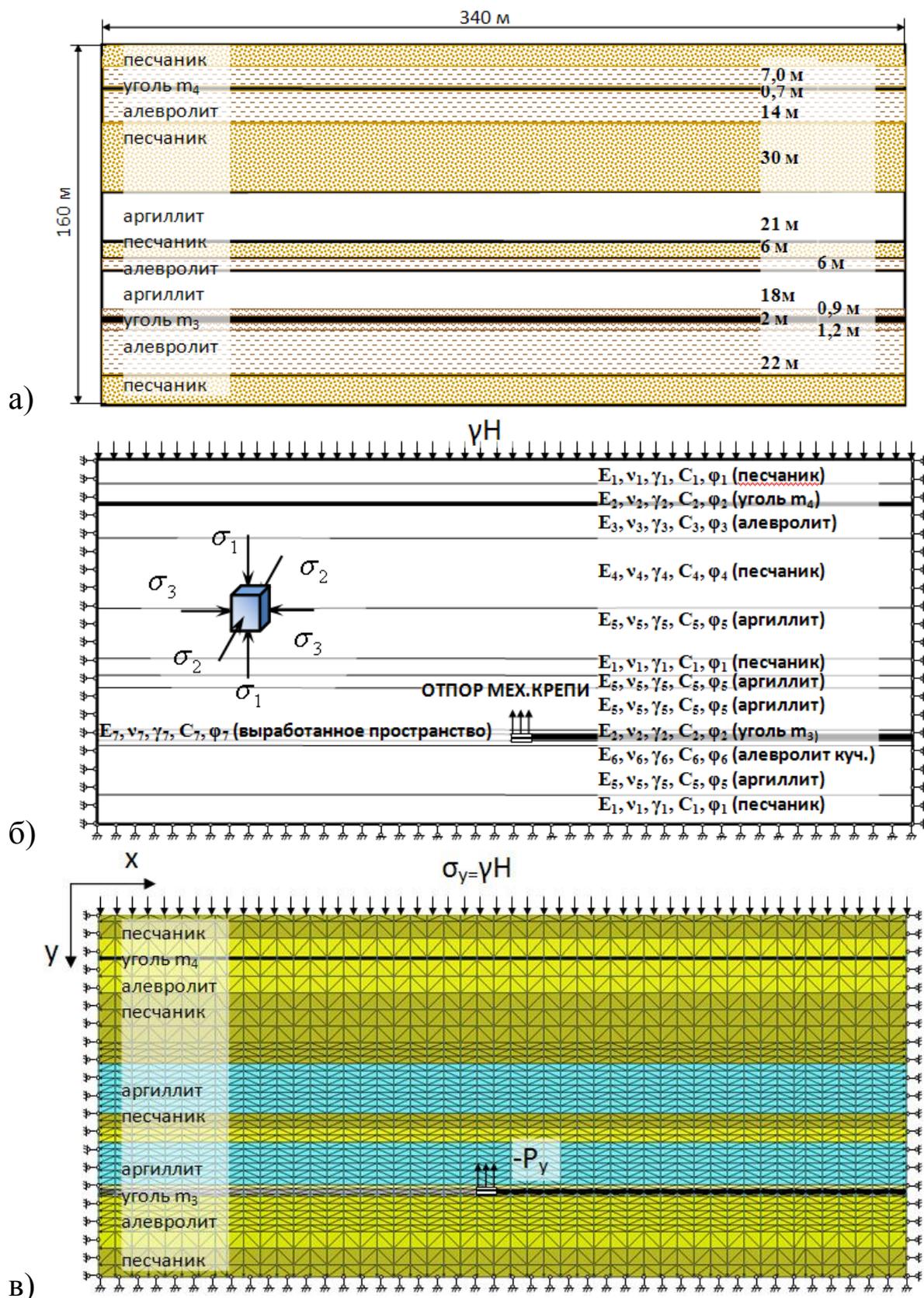


Рисунок 7.1 – Этапы разработки геомеханической модели:
 а – структурирование массива по литологическим типам; б – разработка физической модели; в – разработка геомеханической расчетной схемы

Поскольку в течение периода эксплуатации выработок геомеханическая и аэрогазодинамическая обстановка существенно изменяются, то необходимо заранее определять области техногенного разрушения породного массива и интенсивной фильтрации метана из них в выработки на всех стадиях, которыми характеризуется отработка выемочного столба. Математическое моделирование выполнено для конкретных горно-геологических условий шахты им. А.Ф. Засядько, пласт m_3 , глубина разработки 1200-1300 м. Физико-механические свойства пород, угля и крепи модели представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1 – Физико-механические свойства пород геомеханической модели

Тип породы	Физико-механические свойства пород						
	$k_{дл}$	$k_{сmp}$	Модуль упругости, E , МПа	Кэф. Пуассона, ν	Объемный вес, γ , МН/м ³	Сцепление, C , МПа	Угол внутр. тр., ϕ , град
Песчаник трещиноватый	0,95	0,3	$4,6 \times 10^5$	0,28	0,028	84,0	40
Алевролит слаб. осн. кровли	0,85	0,3	$4,42 \times 10^3$	0,30	0,026	8,87	33
Аргиллит неуст. осн. кровли	0,8	0,3	$3,5 \times 10^3$	0,29	0,024	6,20	41
Алевролит неуст. осн. почвы	0,85	0,3	$1,9 \times 10^3$	0,25	0,026	7,00	27
Алевролит непоср. почвы	0,85	0,3	$1,4 \times 10^3$	0,30	0,026	4,00	27
Уголь	0,8	0,35	$2,51 \times 10^3$	0,25	0,0133	40,0	27
Гидростойки мех. крепи	-	-	$1,4 \times 10^7$	0,25	0,020	300	20

Угольный пласт m_3 содержит коксующийся уголь марки «Ж». Геологическая мощность пласта 1,59-2,14 м. Плотность угля – 1,33 т/м³. Пласт опасен по газу, пыли, суфлярным выделениям метана, внезапным выбросам угля и газа, склонен к самовозгоранию. Особо опасны по самовозгоранию участки тектонических нарушений, зоны повышенной трещиноватости и зоны фациального замещения угля породами кровли. Природная метаноносность – 20-22 м³/т. Непосредственная и основная кровля представлены аргиллитом, выше которого залегают алевролиты и отложения газоносных песчаников.

Следует отметить, что в кровле конкретного угольного пласта находятся три мощных пласта песчаника, шестиметровый слой песчаника находится на расстоянии 18 м от пласта (вынимаемая

мощность угольного пласта 1,8 м), а тридцатиметровый слой – на расстоянии 51 м, третий слой – 103,6 м.

Слои песчаника одновременно являются как источниками газа метана, так и мощными концентраторами напряжений, препятствиями для фильтрации метана и определяющими конструктивными элементами газодерживающих полостей. Мощность непосредственной кровли до 5 м, всего слой аргиллита – до 24 м. Аргиллит средней крепости, от весьма неустойчивого в зонах тектонических нарушений и повышенного горного давления, а также зонах замещения угля породами кровли до слабоустойчивого. Основная кровля легкообрушаемая.

На первом этапе проведено определение структуры породного массива (рис. 7.1, а) в соответствии с данными геологической разведки. На основе экспериментальных данных, последовательно, отдельно для каждого элемента расчетной схемы, были заданы автоматизированной системой ввода исходной информации физико-механические свойства пород (рис. 7.1, б) с учетом коэффициентов длительной прочности k_{dl} и структурного ослабления k_{cmp} .

Размер расчетной схемы принят 160 м по высоте и 340 м по ширине, которая включает три слоя газонасыщенного песчаника основной кровли пласта m_3 . Расчетная схема состоит из 3920 элементов и 2050 узлов, для которых в результате расчетов были получены значения напряжений в элементах, деформаций и смещений узлов (рис. 7.1, в). Поскольку задача решалась в двумерной постановке, расчетные сечения были выбраны по продольному разрезу в центральной части лавы (сечение 1-1, рис. 7.2) и серии поперечных разрезов (сечения 2-18, рис. 7.2), проходящих через выработанное пространство лавы, зону отжима, зону опорного давления. Эти участки были определены заранее в результате серии шахтных измерений и опыта отработки очистных забоев в аналогичных условиях.

Необходимо обратить особое внимание на тот факт, что для глубин 1200–1300 м в слабых горных породах влияние зоны опорного давления распространяется вдоль выработки до 250–300 м, а изменение дебита метана в дегазационных скважинах было замечено даже на расстоянии 1000 м при обрушении пород на добычном участке. Геодинамические зоны повышенных напряжений можно учесть (учитывались) за счет увеличения коэффициента роста нагрузки. По экспериментально определенному коэффициенту в

конкретном месте устанавливается коэффициент тектонической активности, а затем вся модель нагружается в соответствии с величиной этого коэффициента.

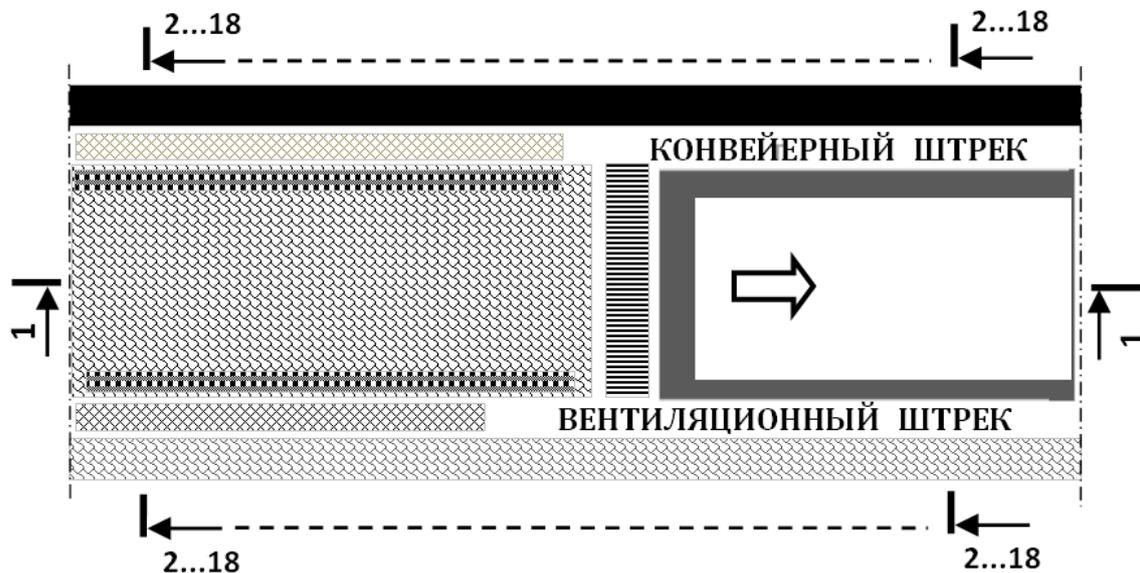


Рисунок 7.2 – Расположение расчетных сечений

Расчеты выполнены последовательно для глубин 700, 900, 1100 и 1300 м, при этом рассматривались как сечения вдоль выемочного столба, так и поперечные. Целью такого подхода было качественно оценить возможные изменения процессов сдвижения, трещинообразования и расслоения во времени, рис. 7.3.

Эту задачу с той или иной степенью точности мы частично решаем путем замены реальной прочности пород их длительной прочностью, которая составляет примерно 80-95 % от первоначальной, а также прочности разрушенных элементов остаточной прочностью, которая для зон объемного сжатия не может быть ниже $1/3$ первоначальной, а для зон растяжения равна, примерно, прочности на растяжение.

Но при этом следует отметить, что наиболее точно временной фактор можно учесть только путем сопоставления расчетных данных с фактическими, полученными при проведении шахтных наблюдений или экспериментов. Для этого необходимо последовательно выполнить серию расчетов с различными коэффициентами увеличения (снижения) нагрузки расчетной схемы, определить реальное состояние какой-либо части массива, подобрать на соответствующее время наиболее подходящую расчетную схему и только после этого проводить качественный прогноз напряженно-деформированного состояния массива.

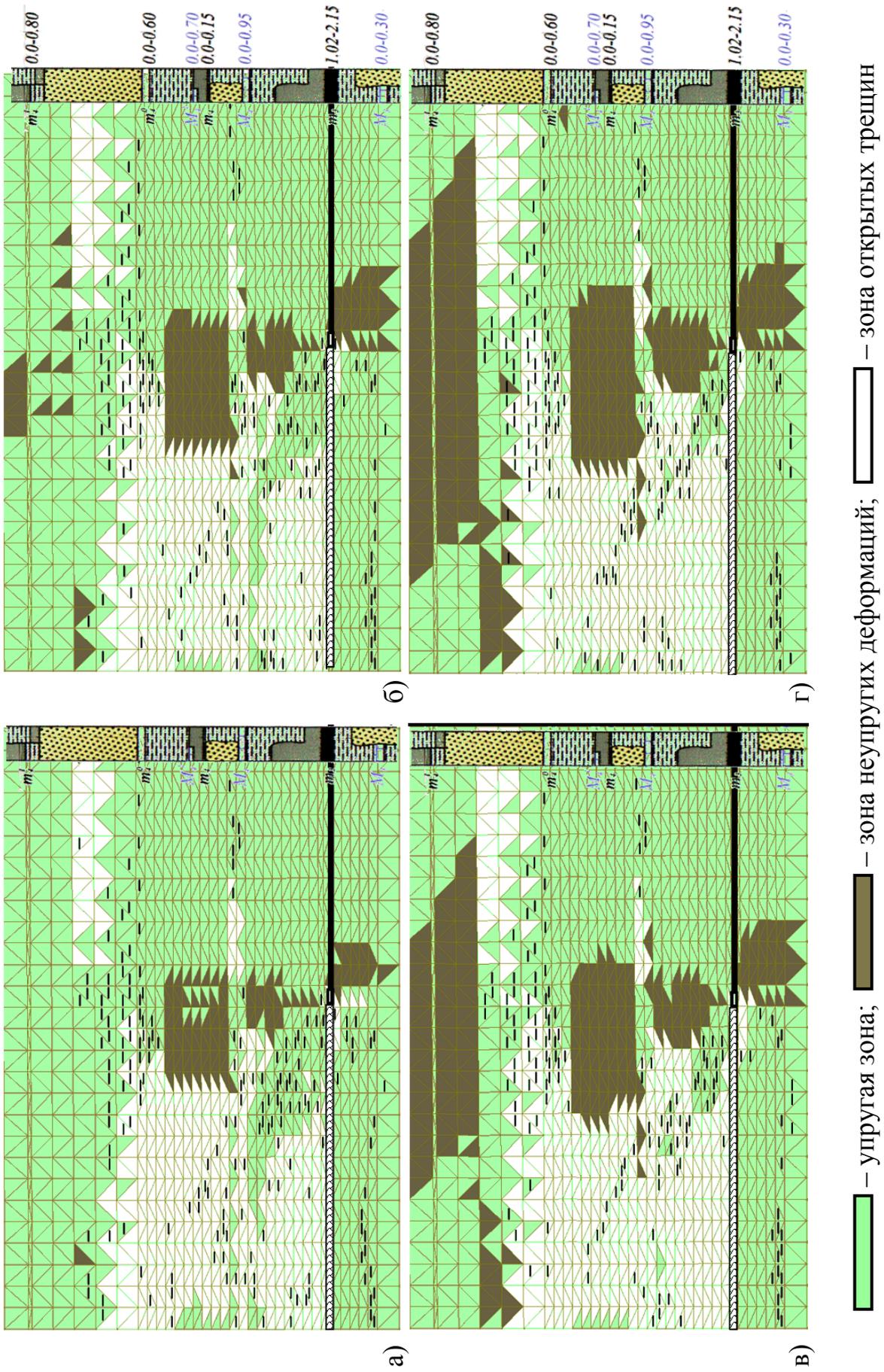


Рисунок 7.3 – Процесс развития разрушений в породном массиве при движении очистного забоя (а-г)

Ввод в расчетную схему реологических параметров не производился, так как их влияние не превышает 5-6 %, а появление даже единичных трещин может привести к резкому росту интенсивности деформаций горных пород.

Последовательность выполнения исследований по определению расположения и параметров зон разрушения состояла в оценке на каждом этапе деформационного процесса величин главных нормальных и касательных напряжений в области влияния очистного забоя и в газонасыщенных песчаниках основной кровли, расположения и величины зон неупругих деформаций, ориентации систем техногенных трещин. По результатам расчетов определялись пути перемещения газовых потоков от источников газовыделения в выработки выемочного участка на границе отработанного и подготовленного к отработке выемочного столба. Оценка напряженно-деформированного состояния газонасыщенного массива горных пород выполнена на примере участка породного массива вокруг вентиляционного штрека, который заложен на сопряжении отработанной 16 западной лавы и подготовленной к отработке 17 западной лавы пласта m_3 шахты им. А.Ф. Засядько.

Зная скорость подвигания лавы, появляется возможность учесть качественно временной фактор, но при этом необходимо также учитывать, что в то время, как для упругопластической области массива производятся строгие математические расчеты, то для запредельного состояния пород автоматически осуществляется его имитация тоже по строго определенным законам, но не по расчетным показателям, а по средним предполагаемым параметрам, поскольку в настоящее время еще не разработана необходимая теория расчетов дискретных сред.

На рис. 7.3 показан поэтапный процесс развития разрушений в породном массиве при движении очистного забоя. Как видно из рисунка, в зоне, расположенной вокруг очистной выработки, протекают сложные взаимозависимые геомеханические процессы. Это сдвиги, разгрузки, расслоения, что приводит к дегазации газонасыщенных песчаников и пластов спутников, которые обуславливают поступление газа на добычный участок. Зоны разрывных нарушений (открытых трещин) расположены над выработанным пространством и, частично, в газонасыщенном песчанике основной кровли. Их рост при увеличении нагрузки от сил горного давления не так значителен, как зон неупругих деформаций,

площадь которых возрастает в 1,5-2,0 раза. Однако, с точки зрения анализа фильтрационных процессов, зоны открытых трещин представляют наибольший интерес [6].

Следует учитывать, что главными движущими силами фильтрации метана в массиве являются энергия свободного газа, содержащегося в крупных порах, трещинах, местах геологических нарушений закрытого типа, и изменяющееся напряженное состояние газоносного массива. Как показано на двумерных рисунках конечно-элементных сеток по продольным и поперечным сечениям выемочного столба (рис. 7.4), деформационные процессы, происходящие в поле разнокомпонентных напряжений породного массива, влияют на ориентацию и структуру трещинно-порового пространства и определяют предполагаемую направленность газопереноса.

С течением времени растут зоны неупругих деформаций и увеличиваются системы трещиноватости. По результатам анализа величин и направлений максимальных главных и касательных напряжений в зоне неупругих деформаций определены направления двух систем главенствующих трещин (рис. 7.3, 7.4). Как видно из рис. 7.3, а-г, системы горизонтальных трещин в основной кровле распространяются над очистным забоем, где образуют дополнительные разрывы сплошности массива.

Так как процесс сдвижения горного массива протекает длительное время, то вышележащие слои горных пород постепенно разрушаются и последовательно передают нагрузку на обрушившиеся породы (развитие зоны растягивающих напряжений, см. рис. 7.3). Над выработанным пространством (рис. 7.4, а, в) зона разрушения постоянно увеличивается.

В основу определяющей концепции исследований заложено изучение и контроль разрушения прочных пород основной кровли. На уровне лавы (от нуля до минус 7 м) основную нагрузку несет тридцатиметровый слой песчаника (напряжения примерно 200 МПа, что дает коэффициент концентрации напряжений для глубины 1300 м равный 5,7), ближний шестиметровый слой песчаника уже разрушен, а максимальные напряжения в нем наблюдаются на глубине плюс 7 м от груди забоя с коэффициентом концентрации равным 3,5.

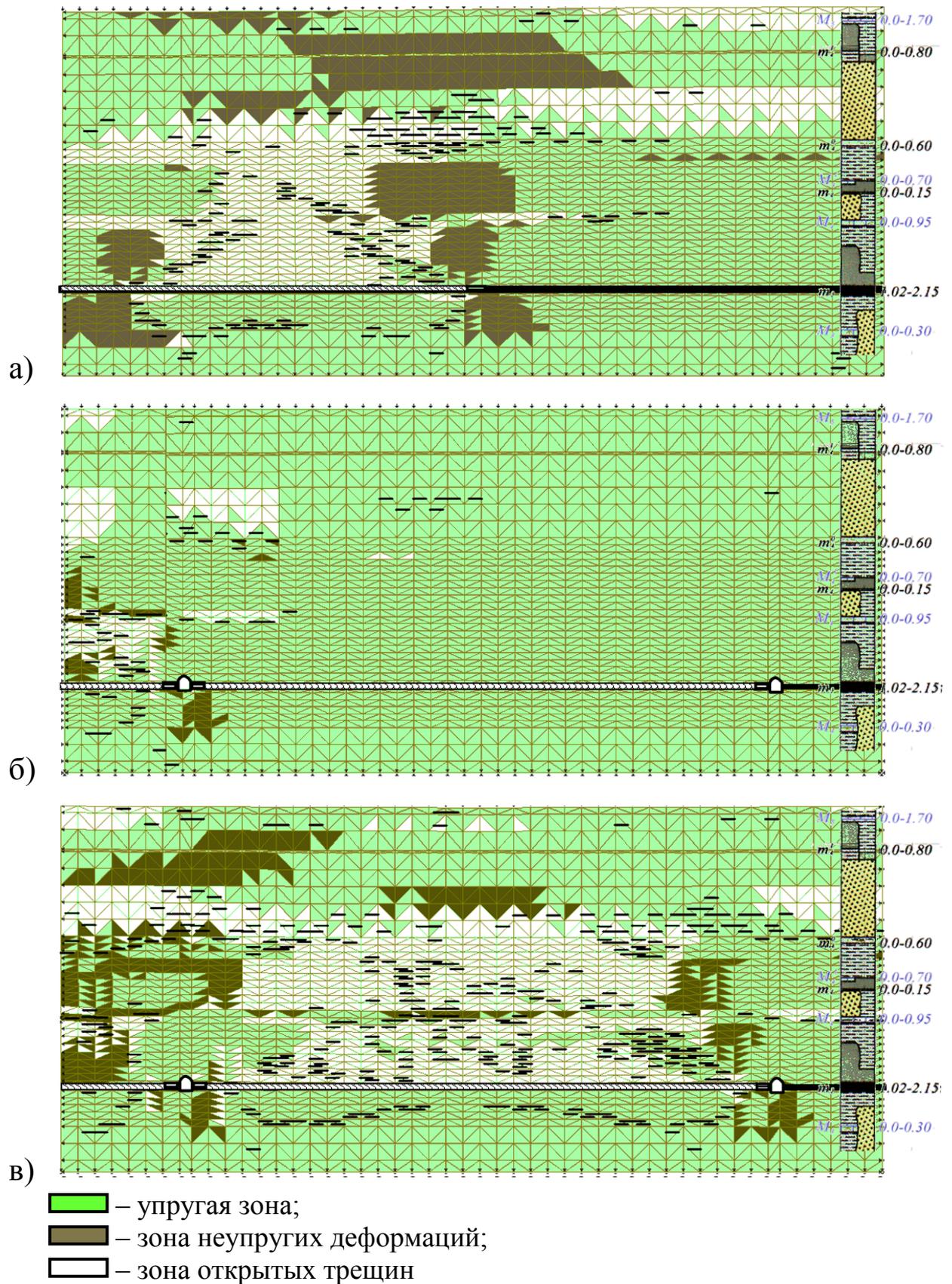


Рисунок 7.4 – Разрушения породного массива вокруг очистного забоя:
 а – поперечный разрез по длине выемочного столба;
 б – впереди лавы без влияния очистных работ;
 в – в зоне обрушения за лавой

Непосредственная кровля начинает обрушаться прямо за механизированной крепью, полное обрушение первой пачки песчаника происходит в выработанном пространстве на расстоянии минус 40 м и пригружается обрушенными вышележащими породами, примерно на расстоянии 70–80 м полностью обрушается второй слой песчаника, при этом он опускается на нижележащие породы и увеличивает в них напряжения, а нагрузка от вышележащих пород в целом переходит на третий слой. Данные относительного перемещения пород кровли также подтверждают наличие характерных плоскостей разрушения (40 и 70 м в сторону выработанного пространства от груди забоя), рис.7.5 и 7.6.

Зная реальную скорость подвигания лавы, на основе решения обратной задачи появляется качественная возможность учесть временной фактор, но при этом необходимо также учитывать, что в то время как для упругопластической области массива производятся строгие математические расчеты, то для запредельного состояния пород автоматически осуществляется его имитация тоже по строго определенным законам, но не по расчетным показателям, а по средним предполагаемым параметрам.

Для оценки газопроницаемости породного массива использованы коэффициенты газопроницаемости k_n , полученные для условий шахты им. А. Ф. Засядько в работе [45] в результате большого количества натуральных измерений. В результате расчетов зон повышенного горного давления и разупрочнения (рис. 7.5) определена газопроницаемость для характерных зон: опорного давления ($k_n \approx 1,5$ мД), обрушения основной кровли ($k_n \approx 5000$ мД), оседания ($k_n \approx 5000$ мД), разгрузки ($k_n \approx 10$ мД), нетронутого массива ($k_n \approx 2$ мД).

Следует еще раз отметить, что в основной кровле угольного пласта находятся два мощных пласта песчаника: шестиметровый слой песчаника находится на расстоянии 18 м от пласта (вынимаемая мощность угольного пласта 1,6-2,0 м), а тридцатиметровый слой – на расстоянии 51 м. На разных участках массива напряженное состояние газонасыщенных пластов песчаника основной кровли и степень их разрушения существенно отличаются (рис. 7.6, 7.7, 7.8). На неразрушенных участках они являются мощными концентраторами напряжений и препятствиями для фильтрации метана, а на разрушенных – основными источниками газовой выделенной и поступления метана в горные выработки.

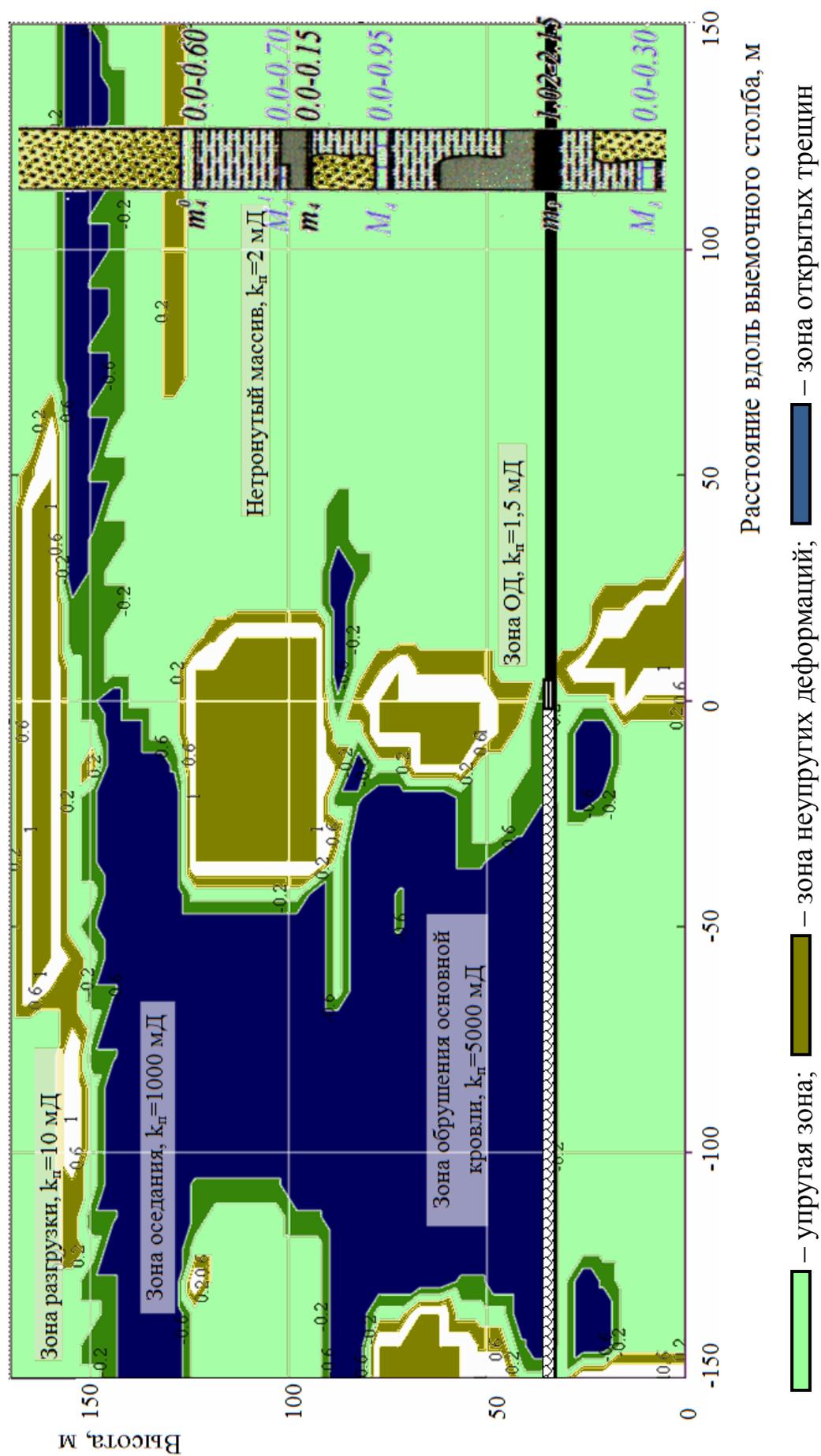


Рисунок 7.5 – Разрушение источников газовыделения в кровле движущегося очистного забоя и формирование зон различной проницаемости (коэффициенты проницаемости указаны по данным [45])

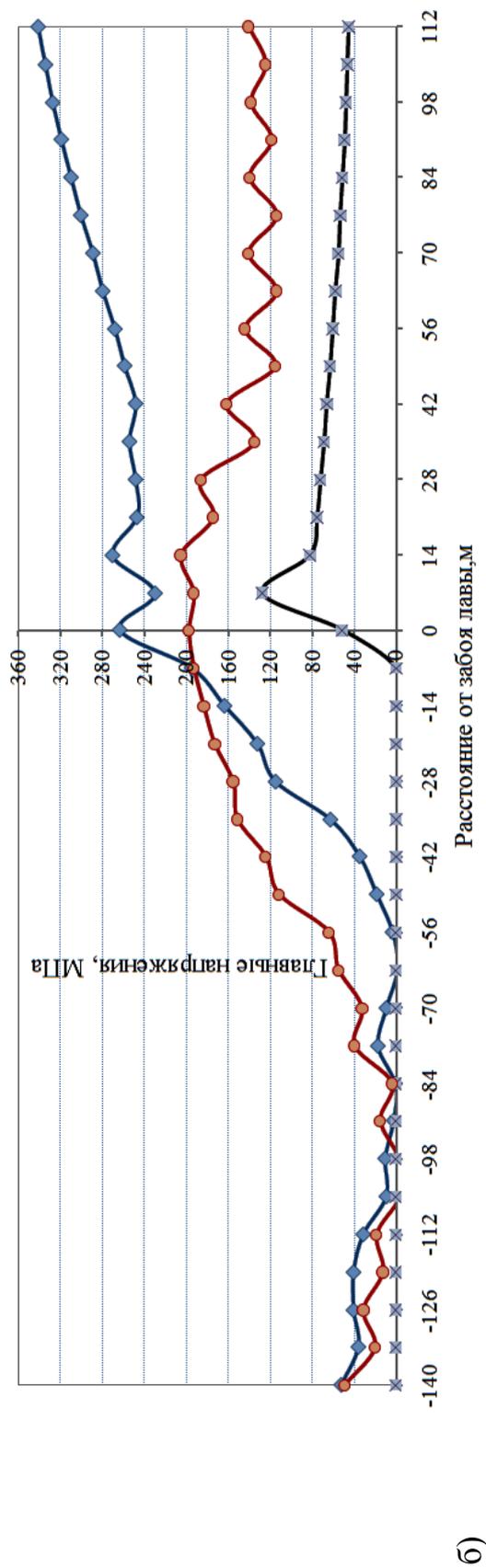
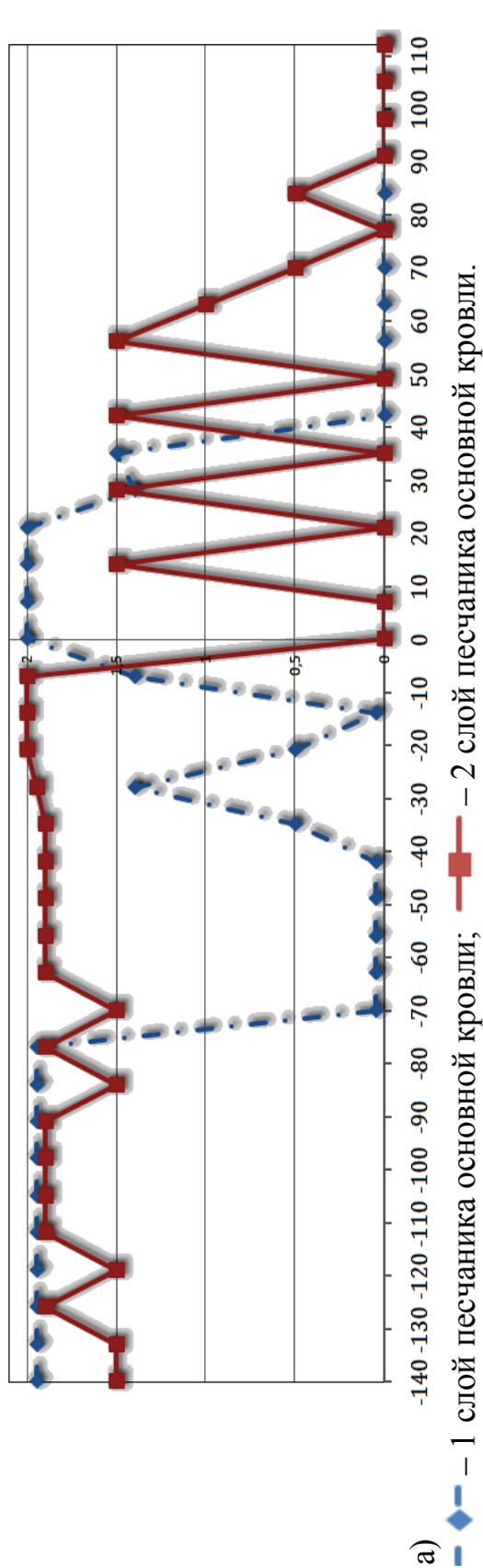


Рисунок 7.6 – Характер разрушения газонасыщенных слоев песчаника основной кровли (а) и значения максимальных главных напряжений (б) по продольному сечению 1-1 (см. рис. 7.2) выемочного столба

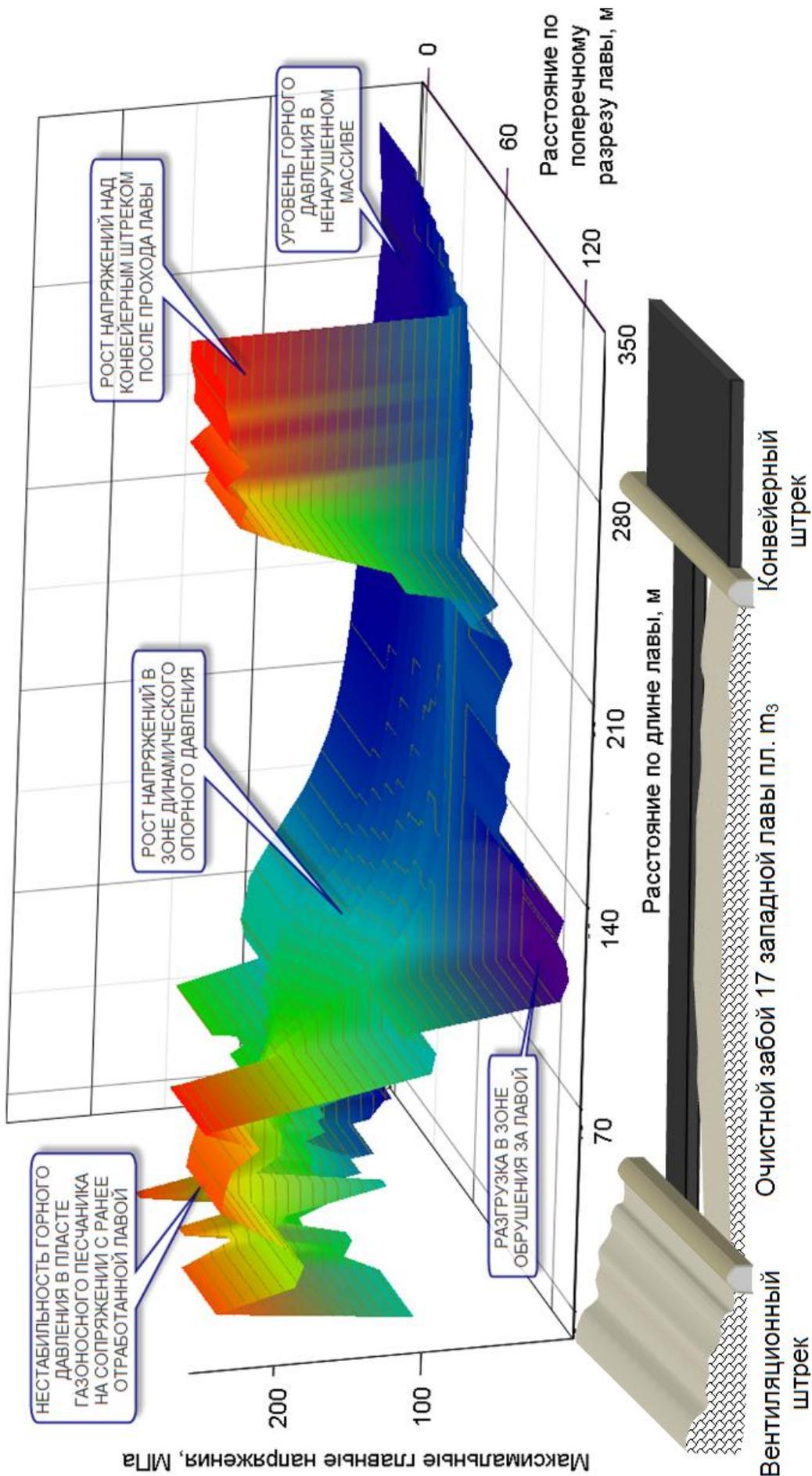


Рисунок 7.7 – Напряженное состояние слоя газонасыщенного песчаника и нестабильность горного давления при отработке пласта т₃ шахты им. А. Ф. Засядько (горизонт 1300 м)

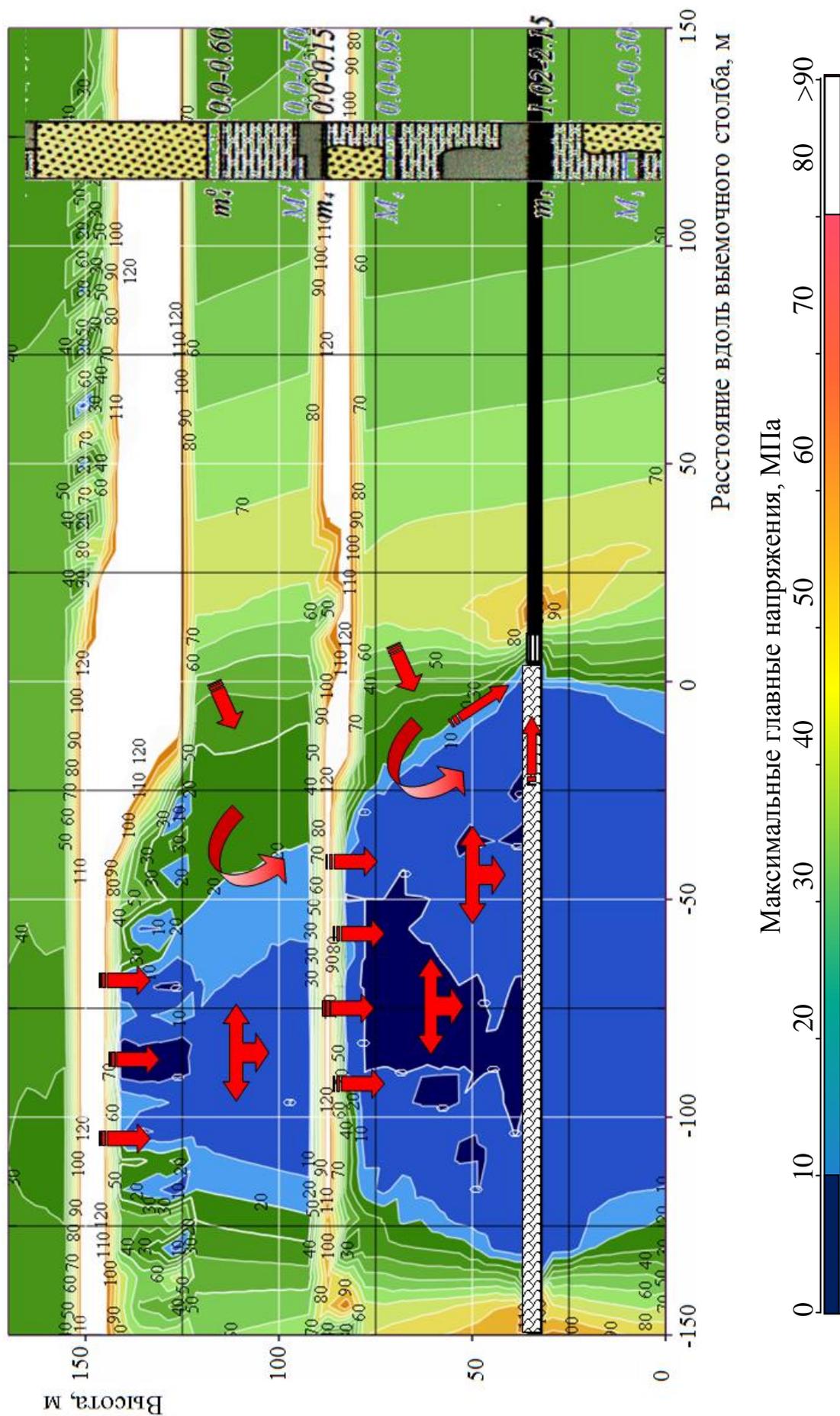


Рисунок 7.8 – Распределение горного давления вокруг очистного забоя и направления движения метана от спутников в выработанное пространство и в рабочую зону лавы (показано стрелками)

Как видно на рис. 7.6, на уровне лавы (от нуля до минус 7 м) основную нагрузку несет тридцатиметровый слой песчаника (напряжения примерно 200 МПа, коэффициент концентрации напряжений для глубины 1300 м равен 5,7), ближний шестиметровый слой песчаника уже разрушен, а максимальные напряжения в нем наблюдаются на глубине плюс 7 м от груди забоя с коэффициентом концентрации равным 3,5.

Как видно на рис. 7.7. напряженно-деформированное состояние газонасыщенного песчаника основной кровли характеризуется неравномерностью по длине выемочного столба. Над вентиляционным и конвейерным штреками после прохода лавы возникают концентрации напряжений, вызванные прогибом и разрушением консоли основной кровли. Вместе с тем, зоны повышенного горного давления над вентиляционным и конвейерным штреками существенно отличаются. Над конвейерным штреком слой песчаника еще не разрушен и имеет низкую газопроницаемость. Над вентиляционным штреком на сопряжении с ранее отработанной лавой наблюдаются нестабильность горного давления и частичное неравномерное разрушение слоя песчаника, что вызывает неравномерную и интенсивную десорбцию метана.

Изменение знака напряжений (плюс при сжатии призабойной части и минус при растяжении) приводит к образованию сети новых и раскрытию существующих трещин и пор, что вызывает десорбцию газа из пластов и передвижение его в сторону очистной выработки и выработанного пространства. При этом самые интенсивные сдвиги горных пород происходят над движущимся забоем лавы или за ним. Впереди очистного забоя в зоне динамического опорного давления напряжения превышают геостатические, проницаемость массива снижается. В зоне динамического опорного давления (см. рис. 7.6, б) напряжения достигают 80-125 МПа (коэффициент концентрации напряжений 2,3-3,7), проницаемость породного массива снижается до 1-2 мД. При этом зона активизации сдвижений распространяется до 90 м впереди движущегося очистного забоя.

В процессе проведения очистных работ происходит разрушение подработанных породных слоев, в результате чего метан из нарушенных газоносных источников начинает мигрировать в выработанное пространство, создавая в массиве техногенные потоки различного направления и интенсивности.

Движение газа происходит из участков с повышенным давлением в участки пониженного давления по открытым трещинам, поэтому анализ полученной в результате математического моделирования информации позволил выявить пути перемещения потоков метана через трещины в зонах сдвига и растяжения в выработанное пространство и рабочую зону лавы (показаны стрелками, см. рис. 7.8). При этом фильтрация газа в выработки происходит, в основном, из высокопористых песчаников, которые в сумме имеют большую мощность и могут интенсивно расслаиваться, и, в конечном счете, обрушаться даже без принудительной посадки кровли, выталкивая в выработки значительные объемы накопившегося в образовавшихся полостях газа.

Следует обратить особое внимание на то, что давление свободного газа в закрытых естественных или техногенных полостях может достигать 10 МПа и более, а за счет влияния мощных прочных слоев песчаника величина максимальных главных напряжений в массиве горных пород даже на глубине 1300 м может снижаться до нулевых значений, а это автоматически приводит к временному подпору пород газом, что весьма опасно как в отношении суффлярных выделений метана, так и в отношении управления горным давлением.

Таким образом, проведенные исследования и математическое моделирование позволили установить направления газовых потоков, определить влияние напряженно-деформированного состояния газонасыщенного массива и превалирующих систем трещиноватости на интенсивность выделения метана в подготовительные выработки добычных участков глубоких шахт. Эти результаты дают базу для оценки распределения давления газа как при известных значениях проницаемости массива, так и при решении обратных задач – установления искомой проницаемости по известному распределению давления газа и дебиту метана, полученному по данным экспериментальных исследований, в частности, в области сдвижений массива горных пород.

Новизна состоит в том, что закономерности изменения напряженно-деформированного состояния источников газовыделения, преимущественно пористых песчаников, установлены для слоистого породного массива при отработке угольного пласта в сложных горно-геологических условиях с учетом упругопластических свойств пород, запредельных состояний горных

пород в областях сжатия и растяжения и ориентации доминирующей техногенной трещиноватости.

7.2. Разработка алгоритма и программного обеспечения работы системы автоматического управления проветриванием добычного участка

В соответствии с требованиями к системе, основанными на детальном анализе особенностей автоматического регулирования распределением воздуха по подземным выработкам шахты, определены основные положения, в соответствии с которым определяются основные функции системы автоматического управления ИУРРВ и, соответственно, требования к структуре и составу системы.

САУ ИУРРВ дроссельного типа должна обеспечивать: автоматическое управление углом поворота створок регулирующего органа; контроль скорости движения воздуха по выработке; ручное управление углом поворота створок регулирующего органа; работа САУ (табл. 7.2) в режиме автоматического поддержания в заданном интервале уровня содержания метана путем управления расходом воздуха; контроль состояния аппаратуры управления и сигнализации при невозможности выполнения задания (в случае выхода со строя САУ створки регулирующего органа должны быть полностью открыты).

Таблица 7.2 – Таблица входных и выходных переменных САУ

N п/п	P	A	Сигн.	Значение концентрации метана				Состояние приводов				Состо- яние
				C < Снн	Снн < С<Снв	C > Снв	C > Скр	Пос	Пзс	Потд	Пзтд	
1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
2	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
3	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	3
4	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	4

Разработка алгоритма и программного обеспечения выполнялась исходя из следующих исходных данных.

1. Управление углом поворота створок регулирующего органа осуществляется регулируемым приводом ПЗ-1 и датчиком угла

поворота Да. Контроль состояния функциональной исправности привода производится путем сравнения текущего положения створок с сигналами датчиков крайнего положения створок Дос и Дзс.

2. Контроль скорости движения воздуха по выработке осуществляется измерителем скорости и направления движения воздуха ИСНВ-1.

3. Ручное управление регулирующим органом осуществляется с местного пульта управления МПУ, расположенного непосредственно возле ИУРРВ.

4. Переключение режимов работы САУ производится с местного пульта управления. Скорость движения воздуха, аэродинамическое сопротивление вентиляционного окна должны выводиться на МПУ.

5. Сигнализация о неисправности САУ должна производиться звуковой и световой сигнализацией в месте расположения вентиляционного окна.

6. Перевод створок в полностью открытое положение осуществляется автоматически, по состоянию датчика Дос и сигнала об аварийной работе.

Структурная схема системы (рис. 7.9) состоит из: микропроцессорного контроллера, в состав которого входят два АЦП, необходимые для ввода данных о скорости движения воздуха, концентрации метана и угла поворота створок; модуля ввода дискретных сигналов датчиков и кнопок управления местного пульта управления; модуля вывода сигналов управления приводами ИУРРВ и включения аварийной сигнализации. Пульт управления служит для управления регулятором расхода воздуха в ручном режиме, переключения режимов работы «Автоматический» – «Ручной», индикации скорости движения воздуха, угла поворота створок, состояния датчиков крайних положений створок. В МПУ также формируется команда приводов.

Определен состав аппаратуры системы автоматического управления проветриванием добычного участка по газовому фактору. В состав подземного комплекта аппаратуры управления ИУРРВ (рис. 7.10) входят серийно выпускаемые изделия: фидерный автомат для питания всей аппаратуры АФВ-1; пускатели типа ППВ-2 приводов вентиляционного окна и транспортной двери; кнопочные посты КУВ-3; световая сигнализация ССУ-2; гудок ЗДВ-1; конечные выключатели ВК-70; реохордный датчик поворота заслонок ДП-1;

привод вентиляционного окна ПЗ-1; привод транспортной двери ПЗ-1; измеритель скорости и направления движения воздуха ИСНВ-1.

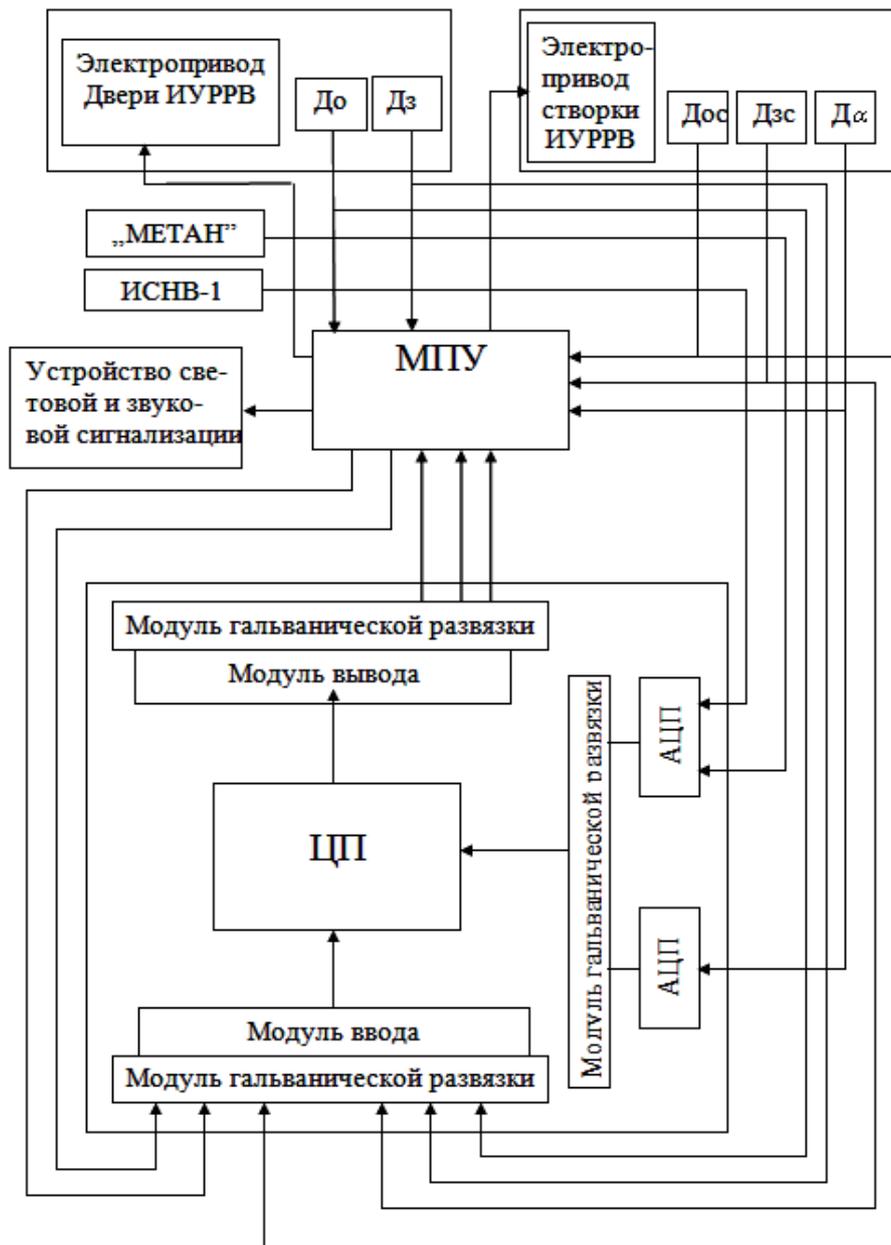


Рисунок 7.9 – Структурная схема САУ проветриванием добычного участка

Микропроцессорный контроллер МПК с модулями ввода-вывода и местный пульт управления МПУ, включающий модули управления, сигнализации и формирователи команд открытия и закрытия заслонок конструктивно выполнены в виде двух взрывобезопасных оболочек, соединенных между собой.

Программа обеспечивает включение в прямом и обратном направлении привода створки регулятора расхода воздуха в

автоматическом режиме, контроль параметров датчиков системы и органов ручного управления. Функции программы: контроль скорости движения воздуха по выработке – ИСНВ - 1; контроль полностью закрытого положения створки - Дзс; контроль полностью открытого положения створки - Дос; контроль положения переключателей ручного и автоматического режима работы на местном пункте управления; контроль недопустимых состояний в системе.

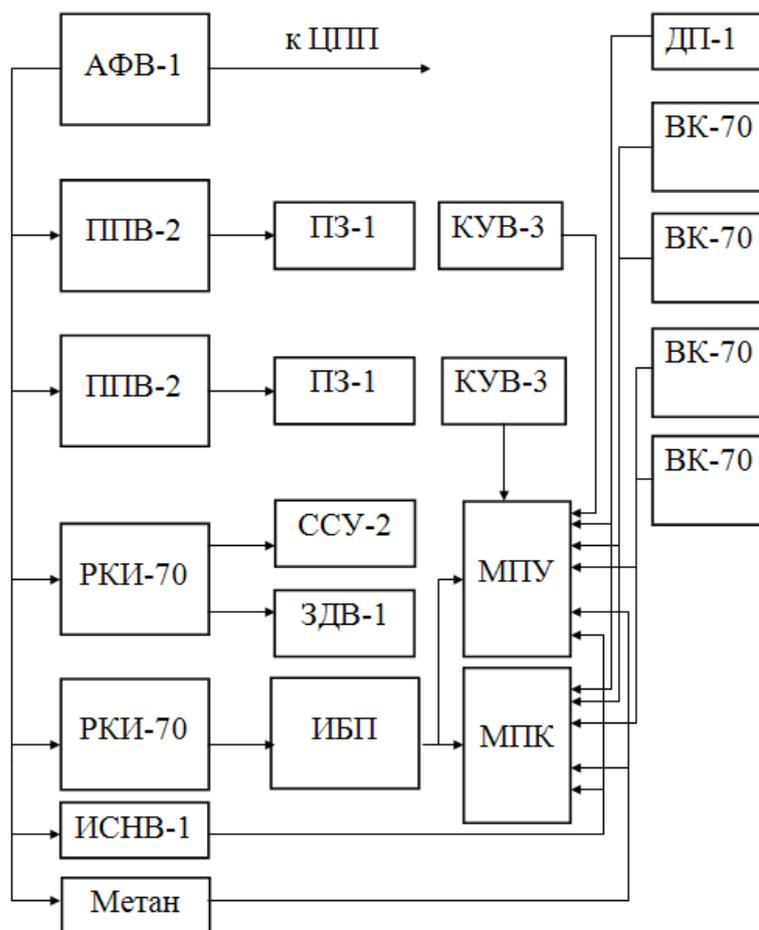


Рисунок 7.10 – Блок-схема аппаратуры САУ ИУРРВ

Функциональные основные узлы программы: включение привода открывания створки РРВ; включение привода закрывания створки РРВ; включение аварийной сигнализации; перевод створки в полностью открытое состояние в случае аварийной ситуации.

Регулирование расхода воздуха осуществляется поворотом створки вентиляционного окна в автоматическом режиме на основании сравнения заданного и существующего значения концентрации метана – датчик Дс. Аналогично датчикам в

микроконтроллер вводится информация о положении переключателя режимов «Р» и «А».

Выходные данные: команда на открывание створки; команда на закрывание створки; команда включения аварийной сигнализации; команда на закрывание транспортной двери; команда на открывание транспортной двери.

7.3. Разработка способа проветривания и отвода метана из погашаемой выработки на выемочном участке угольной шахты.

Увеличение глубины добычи угля существенным образом усложняет горно-геологические условия, в результате чего увеличивается вероятность взрывов газа и пыли, что и определяет значительную аварийность горных работ, высокий уровень травматизма и профзаболеваний в угледобывающей области, существенным образом снижает экономические показатели работы угольных шахт в целом.

Основная причина взрывов пылегазовых смесей - это накопление недопустимых концентраций газа метана или угольной пыли. Кроме аварий на угольных шахтах часто возникают аварийные ситуации, которые при определенных условиях могут перерасти в аварии с тяжелыми последствиями. Основная часть их связана с загазовыванием горных выработок и возникновением опасности взрыва метановоздушной смеси.

Одним из опасных мест, с точки зрения возникновения взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси, есть тупиковая часть вентиляционного штрека выемочного участка, который погашается при столбовой системе разработки угольного пласта.

Поиск путей преодоления возникновения взрывоопасных ситуаций и «газового барьера» требует разработки новых способов повышения эффективности вентиляции, одним из которых есть создание систем оперативного управления проветриванием шахт.

На данное время известны способы проветривания выработок за счет общешахтной депрессии [10, 93, 94] путем возведения в воздухоподающих выработках вентиляционных перемычек с пропущенными через них твердыми вентиляционными трубопроводами. Недостатком этих способов является то, что

количество воздуха, который поступает в выработку за счет общешахтной депрессии, зависит от расположения этой выработки в шахтной вентиляционной сети. При применении этих способов не предусмотренные мероприятия, которые обеспечивают регулирование расхода воздуха, который исключает возможность оперативного управления газовой обстановкой в выработке, проветриваемой за счет общешахтной депрессии. Нормативным документом Министерства угольной промышленности Украин утвержден к применению способ отвода метана из выработанного пространства и тупиковой части погашаемого вентиляционного штрека, по короткому трубопроводу за счет общешахтной депрессии. Этот способ включает подачу воздуха на участок, отвод метана по комбинированному воздухопроводу, контроль концентрации метана в зоне погашения и на выходе из системы, разбавление метана в системе и отвод за границы рабочей зоны выемочного участка.

Указанному способу присуща низкая безопасность из-за того, что при внезапных, интенсивных изменениях концентрации метана, обусловленных спонтанным влиянием горнотехнических факторов в пределах выемочного участка и очень ограниченной возможностью управления воздушными потоками для разбавления метана, за глухой перемычкой, отделяющей часть погашаемого вентиляционного штрека, возможно повышение концентрации газа к взрывоопасным величинам. Кроме того, реализация способа требует значительных материальных и трудовых затрат по монтажу и демонтажу металлического трубопровода, разделительной перемычки, перемычек с вентиляционными окнами и дверями при низком коэффициенте повторного использования материалов.

С учетом изложенного, нами поставлена задача усовершенствования способа проветривания и отвода метана из погашаемой выработки. Задача решается путем включения других технологических операций, достижения возможности оперативного контроля и управление состоянием шахтной атмосферы в выработках выемочного участка с учетом динамики переходных газодинамических процессов при спонтанных влияниях горнотехнических факторов, изменения состояния аэродинамических параметров системы горных выработок участка. Такое решение позволяет повысить безопасность ведения горных работ, улучшить условий труда горняков, снизить расходы на проветривание.

Задача решается тем, что предварительно определяются и задаются границы допустимых значений концентрации метана, расхода воздуха в выработках участка с учетом динамики переходных газодинамических процессов, контролируются текущие значения аэрогазодинамических параметров, сопоставляются с заданными величинами и по результатам сравнения осуществляется распределение воздуха по выработкам участка [81].

Известно, что при спонтанном проявлении природных и горнотехнических факторов, таких как: резкое снижение атмосферного давления, выбросы и суфлярные выделения метана из отрабатываемого пласта, поступление метана из вмещающих пород и пластов спутников, изменение режимов работы главных вентиляторных установок, резкое уменьшение аэродинамического сопротивления вентиляционных сооружений (перемычек, дверей, шлюзов и т.д.), увеличение производительности комбайна в лаве, обрушение породы в выработанном просторные и др., на выемочном участке неизбежно возникают переходные газодинамические процессы, которые сопровождаются появлением «всплесков» концентраций метана в участковых выработках. В результате проявления этих процессов в воздушных потоках горных выработок образуются зоны с повышенным содержанием метана, в которых его концентрация, чаще всего, превышает допустимые величины. Учитывая то, что проявления природных и отдельных технических факторов практически непредвиденные, то избежать нежелательных последствий загазовывания выработок практически невозможно. Предложенный способ проветривания и отвода метана (патент Украины [81]) предусматривает предварительное определение границ допустимых значений концентраций метана, расхода воздуха в выработках и с учетом характерных для этого выемочного участка параметров, которые определяют газодинамическую ситуацию, задаются границы допустимых значений концентраций метана и расхода (или скоростей) воздуха в выработках этого участка.

Реализация способа обеспечивается путем использования армированного спиралью гибкого трубопровода, смесителя для разбавления метана, двух регуляторов парашютного типа для распределения воздуха по выработкам выемочного участка, расположенных в вентиляционном штреке, один из которых используется как разделительный, а второй, как рабочий, установлен

в месте расположения смесителя и оборудован ограничителем хода тягового каната.

Осуществляется способ управления проветриванием погашаемой части выработки добычного участка угольной шахты таким образом. На рис. 7.11 показан способ проветривания и отвода метана из погашаемой выработки, когда оба регулятора находятся в закрытом положении. Предварительно задаются верхние границы допустимых значений концентрации метана в зоне погашаемого вентиляционного штрека, в воздушном потоке на выходе из лавы и в потоке, который выходит со смесителя, а также скорость воздушного потока в вентиляционном штреке. В процессе управления проветриванием сравниваются текущие значения контролируемых показателей с заданными. По результатам сравнения концентраций метана, расхода воздуха, осуществляется распределение воздушных потоков по выработкам участка с учетом текущих значений аэрогазодинамических параметров до момента достижения этими параметрами заданных величин.

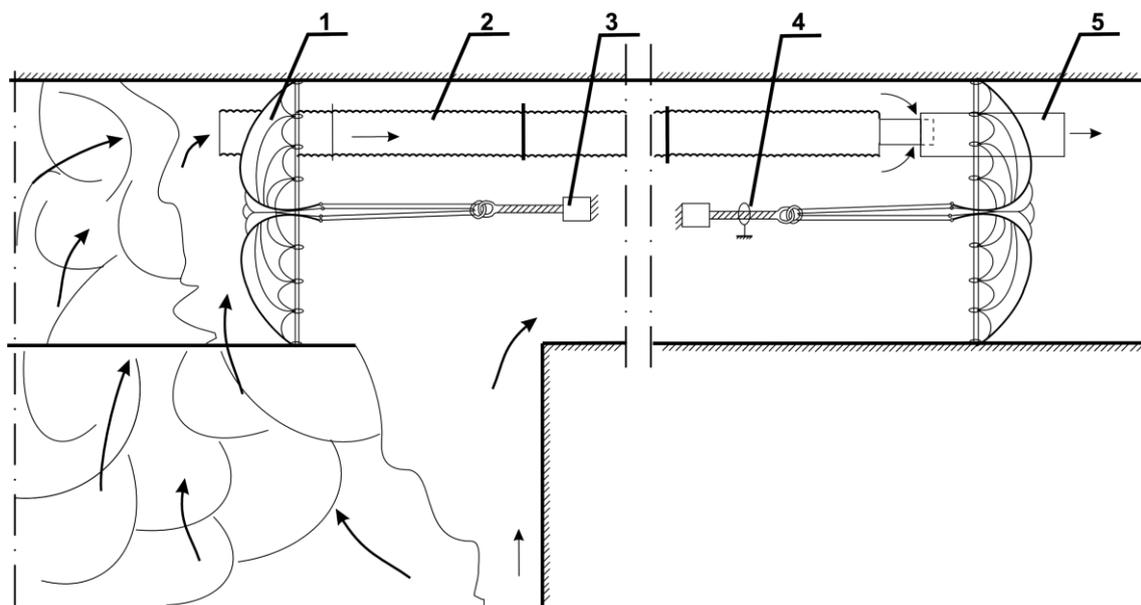


Рисунок 7.11 – Схема проветривания при закрытых куполах регуляторов

Эффективность проветривания тупиковой части вентиляционного штрека достигается путем отвода метана по воздуховоду 2, разжижения в смесителе 5 и удаления его за границы рабочей части вентиляционного штрека за счет общешахтной депрессии.

Для реализации способа в вентиляционном штреке прокладывают армированный спиралью вентиляционный воздуховод, который состоит из отдельных секций таким образом, чтобы один его конец находился непосредственно в завальной части вентиляционного штрека, а до другого конца, размещенного в рабочей части вентиляционного штрека, присоединяют смеситель.

На участке вентиляционного штрека, между тупиком и местом соединения штрека с очистным забоем, устанавливают разделительный регулятор расхода воздуха парашютного типа, исполнительный орган которого воздухонепроницаемый, из эластичного материала в виде боковой поверхности цилиндра. Один край полотнища исполнительного органа регулятора закреплен по периметру горной выработки, свободный край полотнища оборудовано петлями, к которым приспособляются стропы управления. Свободные концы строп управления через разъемное соединительное устройство присоединяют к тяговому канату привода 4, установленного в рабочей части вентиляционного штрека. С помощью привода и тягового каната натягивают стропы управления, при этом свободный край полотнища исполнительного органа регулятора завертывается внутрь к центру поперечного сечения горной выработки. Таким способом осуществляется регулирование поперечного сечения отверстия в куполе регулирующего органа, тем самым изменяется пропускная способность регулятора.

В месте расположения смесителя устанавливается исполнительный орган второго регулятора. При закрытых положениях исполнительных органов регуляторов часть воздуха направляется через выработанное пространство в тупиковую часть штрека, разбавляет метан, поступающий из выработанного пространства и погашенной части штрека, и по секциям воздуховода через смеситель удаляется в вентиляционный штрек за регулятор. Воздух, который выходит из лавы, подается для проветривания рабочей части вентиляционного штрека, проветривает его и через смеситель удаляется за регулятор рабочей зоны.

На рис. 7.12 представлен вариант, когда разделительный регулятор, находится в промежуточном для регулирования расхода воздуха положении и через него в тупиковую часть выработки поступает воздух, а регулятор рабочей зоны, размещенный в месте установки смесителя – закрытый. При увеличении дебита метана из погашенной части вентиляционного штрека в тупиковую часть и

образовании там его повышенных концентраций, тяговый канат разделительного регулятора отпускается, при этом увеличивается его пропускная способность, и воздушный поток из лавы поступает в тупиковую часть штрека для улучшения проветривания и разбавления метана до безопасных концентраций. Из тупиковой части штрека метановоздушную смесь по трубопроводу подают в смеситель, где ее дополнительно разбавляют и отводят за регулятор рабочей зоны в вентиляционный штрек. Часть воздушного потока, выходящего из лавы, используется для проветривания рабочей части штрека и дополнительного разбавления метана, который выводится по воздухопроводу потоком в смеситель, а потом удаляется в вентиляционный штрек за границы его рабочей зоны, ограниченной регулятором. Во время открывания регулятора контролируется концентрация метана в тупиковой части штрека, причем скорость подачи каната выбирается такой, чтобы при проявлении газодинамических явлений концентрация метана не превышала заданных предельных значений.

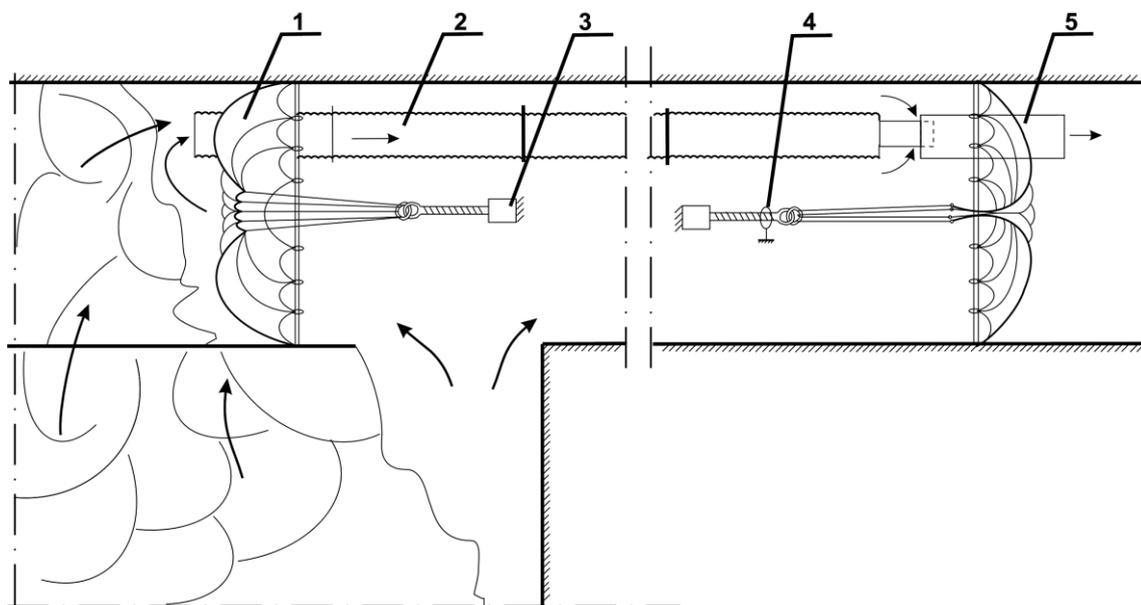


Рисунок 7.12 – Схема проветривания при промежуточном положении купола разделительного регулятора

При неудовлетворительном проветривании рабочей части вентиляционного штрека, ограниченной регуляторами, разделительный регулятор с помощью привода переводят в закрытое положение, а регулятор рабочей зоны приоткрывается, рис. 7.13. В этом случае, поступающий по лаве поток воздуха направляется на

проветривание тупиковой части и рабочей зоны вентиляционного штрека.

Положение ограничителя хода тягового каната привода 4 выбирают таким образом, чтобы при стабильном выделении метана и промежуточном (открытом) положении исполнительного органа регулятора обеспечивалось эффективное проветривание лавы и вентиляционного штрека.

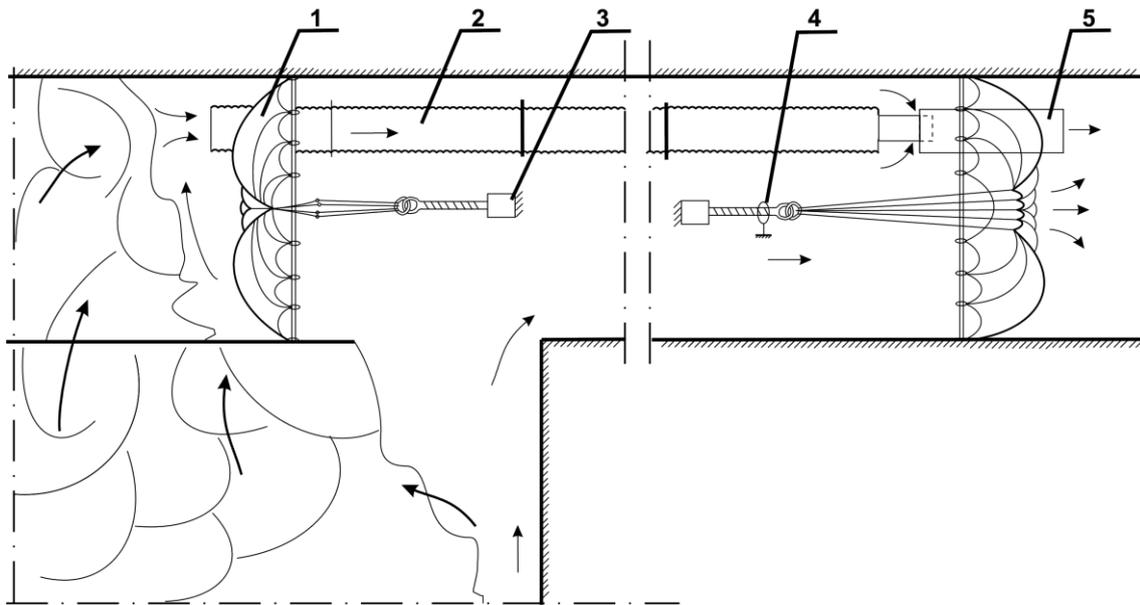


Рисунок 7.13 – Схема проветривания при закрытом положении разделительного регулятора и открытом положении регулятора рабочей зоны

Перевод разделительного регулятора в закрытое положение осуществляется одновременно с открыванием регулятора рабочей зоны таким образом, чтобы общее количество воздуха, подаваемого на выемочный участок, оставалась неизменной.

При этом контролируют концентрацию метана, как в тупиковой части штрека, так и в рабочей его зоне, а скорость регулирования перераспределения воздушных потоков выбирают такой, чтобы контролируемые значения концентрации метана в процессе регулирования не превышали предельных допустимых значений. Процесс регулирования продолжается до тех пор, пока концентрации метана в контролируемых точках не достигнут заданных величин.

Проявления разных природных и технологических факторов могут привести к спонтанному увеличению выделения метана в горные выработки выемочного участка. Снижение концентраций метана к безопасным величинам обеспечивается путем увеличения

подачи воздуха на выемочный участок. Для этого с помощью привода отдельного регулятора и привода регулятора рабочей зоны отпускают тяговые канаты. На рис. 7.14 изображен случай, когда оба регулятора находятся в положениях регулирования расхода воздуха.

Регуляторы приоткрываются, а количество воздуха, который проходит по лаве - увеличивается. Соответственно, увеличивается количество воздуха, который проходит через разделительный регулятор для проветривания тупиковой части вентиляционного штрека, и через регулятор для проветривания рабочей части штрека. Одновременно при увеличении количества воздуха, проходящего через регуляторы, уменьшаются потоки воздуха через выработанное пространство добычного участка в тупиковую часть вентиляционного штрека. Соответственно уменьшается количество воздуха, который проходит через выработанное пространство, а это, в свою очередь, приводит к изменению концентрации метана в тупиковой части вентиляционного штрека. Общее увеличение количества воздуха, который подается на выемочный участок, предотвращает возникновение взрывоопасных концентраций метана в его выработках.

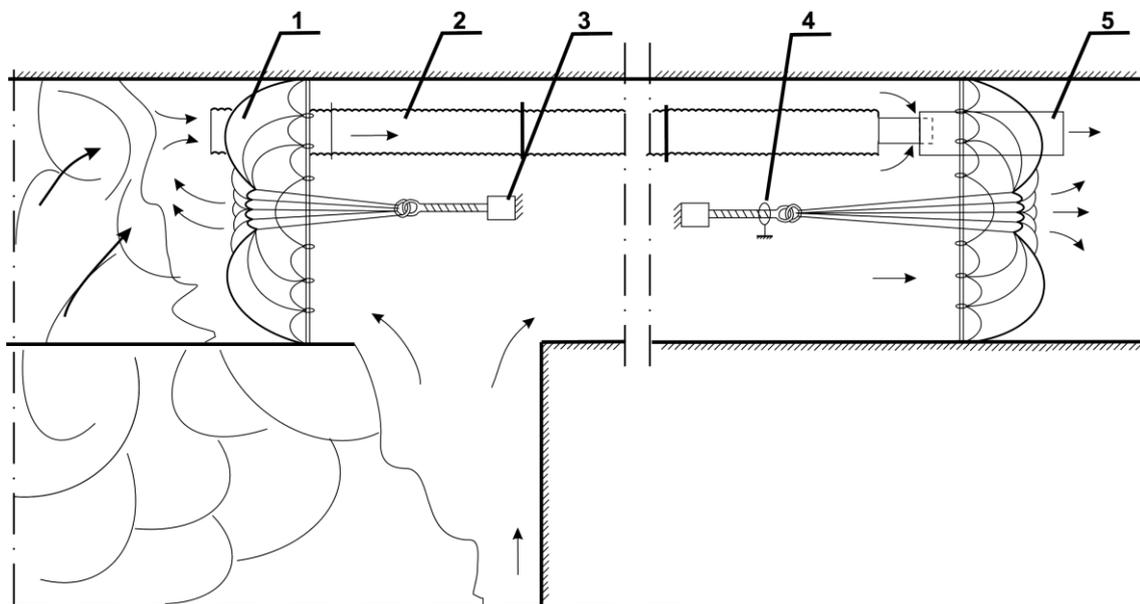


Рисунок 7.14 – Схема проветривания при работе регуляторов в режиме регулирования расхода воздуха

При выемке угля очистной забой и свободное пространство лавы перемещаются в направлении движения исходного потока воздуха к регулятору рабочей зоны. Вслед за лавой гасится и

вентиляционный штрек, а тупиковая его часть приближается к разделительному регулятору. Применение гибкого воздуховода ПКФ «Арвет», армированного спиралью и состоящего из отдельных секций, позволяет без демонтажа последних уменьшать общую его длину по оси в 12 раз. После погашения штрека на длину, равной длине одной или больше секций, с учетом длины непогашенной тупиковой части штрека, производится перемонтаж разделительного регулятора ближе к сопряжению штрека с лавой. В этом случае одну или больше секций воздухопровода демонтируют, а оставшиеся растягивают на длину, при которой обеспечивается удаление метана непосредственно из завальной части штрека за границы его рабочей зоны, ограниченной регуляторами. Периодическое перемещение разделительного регулятора и сокращение длины воздуховода проводится до тех пор, пока длина рабочей части штрека остается достаточной для выполнения необходимых технологических операций по добыче угля. При достижении момента, когда длина рабочей части штрека становится недостаточной для эффективного ведения очистных работ, производится демонтаж смесителя и регулятора рабочей зоны, наращивается воздухопровод на максимальную его длину, соединяется со смесителем и в этом месте монтируется регулятор рабочей зоны. По мере погашения штрека операции по выполнению демонтажных и монтажных работ повторяются.

Применение регулятора расхода воздуха парашютного типа вместо разделительной перемычки уменьшает трудоемкость монтажных и демонтажных работ, материальные затраты, обеспечивает регулирование расхода воздуха, направляемого для проветривания тупиковой части погашаемого вентиляционного штрека и поддержание заданных концентраций метана в ограниченной регулятором части штрека, расширяет диапазон регулирования в выработках выемочного участка.

Использование армированного спиралью гибкого вентиляционного воздуховода ПКФ «Арвет», позволяющего изменять длину его секций в 12 раз, разрешает уменьшить транспортные и эксплуатационные расходы благодаря продолжительному сроку его службы из-за повышенной стойкости к влиянию агрессивных сред. Применение такого воздуховода позволяет снизить трудоемкость монтажных и демонтажных работ, повысить герметичность

трубопровода на криволинейных участках и безопасность от накопления статического электричества.

Оборудование регулятора ограничителем хода тягового каната, дает возможность устанавливать его исполнительный орган в положение, благодаря которому при плановой добыче угля обеспечивается заданный расход воздуха в рабочей части штрека, а концентрация метана не превышает предельно допустимых величин.

Применение предложенного способа проветривания и отвода метана из части погашаемого вентиляционного штрека при столбовой системе разработки, благодаря использованию при его реализации двух парашютных регуляторов расхода воздуха, а также гибкого армированного спиралью вентиляционного трубопровода позволяет: уменьшить расходы на проветривание выемочного участка; снизить трудоемкость работ по ремонту; уменьшить затраты на расходные материалы; повысить эффективность и оперативность управления вентиляционными потоками в выработках добычного участка; обеспечить надежность вентиляции и безопасные условия работы горняков.

7.4 Выводы по разделу

Разработаны геомеханические расчетные схемы и определены зоны разрушения трещиноватых газонасыщенных пород, обеспечивающие оценку условий формирования неустойчивости аэрогазодинамического режима выемочного участка и эксплуатационный прогноз опасных по газу участков подготовительных выработок.

Выполнено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива для горно-геологических условий шахты им. А.Ф. Засядько (пласт m_3 , глубина отработки 1200-1300 м). Установлено, что выделение метана из выработанного пространства в горные выработки выемочного участка в 2,5-3,0 раза превышает газовыделение из других источников, что связано с активными разрушениями песчаников основной кровли и является доминирующим в формировании неустойчивости газового режима добычного участка.

Впервые установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния источников газовыделения, преимущественно пористых песчаников, в слоистом породном

массиве при отработке угольного пласта в сложных горно-геологических условиях и взаимосвязь степени их разрушения с аэрогазодинамическим режимом опасного по газу добычного участка угольной шахты. Отличительной особенностью установленных закономерностей является учет упругопластических свойств породного массива на основе модифицированного метода Ньютона-Рафсона, определение неупругих состояний горных пород в областях предельного сжатия и растяжения, доминирующей техногенной трещиноватости.

Установлено, что доминантным фактором нестабильности газового режима добычных участков опасных по газу угольных шахт является зональная дезинтеграция газонасыщенных источников свободного метана в основной кровле, которая обуславливает перемещение газовых потоков из областей повышенного горного давления через трещины в зонах сдвига и растяжения в выработанное пространство. Это приводит к формированию газонаполненных полостей с повышенным газовым давлением и всплескам содержания метана в горных выработках, которые при применении возвратноточных схем проветривания имеют высокие градиенты и особенно опасны на сопряжениях лавы.

Разработан новый способ проветривания и отвода метана из погашаемых выработок, который имеет 6 режимов работы и позволяет снизить негативное влияние спонтанных проявлений природных и горнотехнических факторов, сопровождающихся всплесками содержания метана в выработках, и повышает безопасность работ на выемочных участках.

Разработана методика определения аэрогазодинамических параметров в конвейерных и вентиляционных штреках, включающая мониторинг динамики метановыделения при посадке основной кровли, что позволяет заблаговременно прогнозировать газовую ситуацию на выемочном участке и снизить убытки от простоев, обусловленных газовым фактором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивная обработка месторождений в сложных горно-геологических условиях предопределила необходимость применения расчетных методов прогноза устойчивости геоматериалов на основе данных геоконтроля. Современные персональные ЭВМ позволяют решать нелинейные геомеханические задачи практически за считанные секунды, поэтому такие расчеты можно принять за расчеты «в режиме реального времени». Однако подготовка исходной информации достаточно трудоемкий процесс, требующий проведения множества простых вычислений, построений и проверок. Каждая конкретная геомеханическая задача требует построения новой схемы (модели), поскольку в настоящее время отсутствуют простые унифицированные конечно-элементные схемы, позволяющие решать широкий класс горных задач устойчивости выработок с возможностью изменения их исходных горно-геологических условий и режимов нагружения, а в построение математической модели вносятся элементы субъективности и случайности.

Для расчета параметров устойчивости горных выработок предложено использовать усредненные показатели физико-механических свойств горных пород с учетом коэффициентов вариации, которые характеризуют усредненный разброс данных. Коэффициенты вариации учитываются методикой, которая предусматривает расчет нагруженности модели при критических параметрах. При необходимости, для большей достоверности результатов расчетов можно произвести привязку к конкретным горно-геологическим условиям на основе испытаний минимального количества проб либо ограниченного объема геофизических измерений. Такой подход обладает тем преимуществом, что позволяет произвести расчеты на основе учета коэффициента вариации с заведомо худшими условиями по максимальным или минимальным значениям параметров, не надеясь при этом на высокую представительность отобранных проб, в особенности в сложных горно-геологических условиях.

В первом приближении при решении упругопластических задач методом последовательных итераций для осадочных пород рационально использовать постоянный модуль Юнга, но при этом остаточные деформации следует учесть заранее заданными дополнительными перемещениями, поскольку для песчаников,

алевролитов и аргиллитов угол наклона аппроксимирующих прямых, соединяющих начало и конец ветвей разгрузки диаграммы «напряжение-деформация», остается постоянным, а уже после первого разгрузки фиксируются значительные остаточные деформации, достигающие 30 % от суммарных.

Гидрогеологические процессы – быстроизменяющиеся и, в то же время, трудно поддаются локальному контролю, поэтому предпочтение следует отдавать расчетным методам прогноза водопритоков с уточнением характера последствий на основе методов оперативного геофизического экспресс-контроля. В плотных осадочных горных породах вода содержится в молекулярно связанном виде и явление фильтрации возникает лишь тогда, когда величина градиента напора превышает значение I_0 , называемое начальным градиентом, поэтому решения фильтрационных задач методом конечных элементов, которые с достаточно высокой точностью реализованы для грунтов, для горных пород требуют новых подходов: сначала необходимо определить зоны разрушения элементов, а затем произвести расчет возможных водопритоков.

Естественная влажность горных пород и их трещиноватость изменяют электрическое сопротивление пород в противоположных направлениях: влажность снижает сопротивление, а трещиноватость его повышает. Поскольку уровень воды в грунте или породе определяется депрессионной кривой, которая характеризуется непрерывностью и монотонностью, то и изменение электросопротивления от влияния воды более плавное, в отличие от резких его изменений при переходе трещин. Изменение электросопротивления при повышении напряжений зависит от обоих составляющих и, как правило, монотонно повышается, но при этом доминирующим является влияние трещиноватости.

Для учета трещиноватости в приближенных расчетных методах нагружение математической модели необходимо производить вплоть до разрушения элементов, этим приемом уже частично учитывается трещиноватость, поскольку будут установлены области зарождения первичных техногенных трещин. Второй путь учета трещиноватости – заложение в модель параметров остаточной прочности, определенной в режиме запредельного деформирования.

Разработаны симметричные универсальные расчетные схемы слоистой структуры и универсальная расчетная схема с асимметричным сгущением сетки в местах предполагаемых высоких

уровней напряжений и деформаций, которая позволяет задать заранее заданные параметры известных или предполагаемых крупных тектонических нарушений, а также параметры развивающейся трещиноватости. Модели при этом последовательно изучаются путем частичного нагружения через фиксацию разрушения при переходе от предыдущей стадии к последующему нагружению. Решение задач выполнено по алгоритму программного комплекса «Геомеханика».

Разработан комплекс автоматизированного ввода и обработки исходной информации при расчетах методом конечных элементов. Оператором заполняются окна геометрических параметров расчетной схемы, физико-механические свойства горных пород или другого материала, число шагов нагружения, глубина разработки, число итераций при пластическом деформировании. Программа автоматизированной подготовки расчетных схем с заранее выбираемыми параметрами дает возможность осуществлять предварительные изменения количества и формы треугольных элементов в горизонтальном и вертикальном направлениях, что позволяет смоделировать наклонное и крутое падение горных пород и, ввиду сложности конфигурации и невозможности подбора удобной универсальной расчетной схемы, исследовать многовариантные результаты принятых решений в сложных горно-геологических условиях пологих, наклонных и крутых пластов (слоистые структуры; слоистые, произвольные и поэлементно ослабленные зоны; собственный каталог физико-механических свойств с возможностью их изменений и дополнений; автоматизированное изменение граничных условий с глубиной; возможность поузлового изменения нагрузок и перемещений непосредственно с помощью монитора для имитации нагрузок и отпора крепи) .

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния вокруг подготовительных выработок (одиночных, сближенных), очистных забоев угольных шахт, элементов камерно-столбовой системы разработки гипсовых пластов, залегающих в слабых водонасыщенных горных породах, при различных величинах заданных напряжений и прочностных параметров, изменяющихся аналогично реальным слоистым структурам. Ужесточением условий нагружения и снижением прочностных показателей математическая модель исследуемых конструкций доводилась до полного разрушения, что позволяет выполнить прогноз развития зоны неупругих деформаций во времени и учесть потерю прочности пород

от развития фильтрационных процессов. Предложена дополнительная автоматизированная статистическая обработка промежуточной и выходной информации для объективной оценки взаимосвязей и закономерностей между различными параметрами как в общем по модели, так и в определенных сечениях или направлениях. Впервые разработана и апробирована методика статистической обработки промежуточной и выходной информации при исследовании объектов горнотехнического профиля. Методика включает вычисление основных статистических характеристик массивов случайных чисел и регрессионные модели с оценкой их корректности по коэффициентам детерминации. Компьютерная программа, реализующая указанный метод (разработка НГУ), может быть использована как приложение в интегрирующей среде для математических вычислений MathConnex при автоматизированном контроле и управлении. Программа обеспечивает считывание массивов значений случайных величин из файлов, автоматическое определение длин выборок и масштабирование графиков, а также предоставляет сервисные средства редактирования в оболочке Mathcad.

Анализ основных причин возникновения аварийных ситуаций на угольных шахтах Украины по газовому фактору показал, что они, чаще всего, происходят вследствие внезапных изменений выделения метана из разрушенных газонасыщенных горных пород, а также за счет всплесков опасного содержания метана по технологическим причинам. Существующие методы и технические средства управления проветриванием не позволяют прогнозировать и своевременно реагировать на внезапные изменения метанообильности добычных участков, поэтому необходимо их дальнейшее совершенствование.

Разработаны геомеханические расчетные схемы, учитывающие реальную слоистость и физико-механические свойства угля и пород, определены зоны разрушения трещиноватых газонасыщенных пород под влиянием очистных работ, что обеспечивает эксплуатационный прогноз потенциально опасных по газу участков подготовительных выработок.

Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния источников газовыделения в породном массиве при отработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях и взаимосвязь степени их разрушения с аэрогазодинамическим режимом опасных по газу угольных шахт, что

позволило пояснить причины нестабильности газового режима на этих участках.

Доминантным фактором нестабильности газового режима выемочных участков опасных по газу угольных шахт является зональная дезинтеграция газонасыщенных источников свободного метана в основной кровле, которая обуславливает перемещение газовых потоков из областей повышенного горного давления через трещины в зонах сдвига и растяжения в выработанное пространство, что приводит к формированию газонаполненных полостей с повышенным газовым давлением и всплескам содержания метана в горных выработках, которые, при применении возвратноточных схем проветривания, имеют высокие градиенты и особенно опасны на сопряжениях лавы.

Разработана математическая модель вентиляционной сети выемочного участка угольной шахты как объекта управления, отличающаяся одновременным учетом динамических и инерционных свойств воздушного потока, которая позволила исследовать переходные аэрогазодинамические процессы на выемочных участках угольных шахт.

Теоретически установлена и экспериментально подтверждена зависимость величины всплеска содержания метана на выемочном участке от расстояния до источника возмущения воздушного потока, которая обусловлена его акустическими свойствами.

Разработана методика определения мест интенсивного поступления метана из выработанного пространства и выявления потенциально опасных по метану участков горных выработок с использованием радиометрического метода, которая учитывает количество и периоды полураспада изотопов радона-222.

Разработан новый способ проветривания и отвода метана из погашаемых выработок, который имеет шесть режимов работы и позволяет снизить негативное влияние спонтанных проявлений природных и горнотехнических факторов, сопровождающихся всплесками содержания метана в выработках, и повышает безопасность работ на выемочных участках. Разработана методика определения аэрогазодинамических параметров в конвейерных и вентиляционных штреках, которая включает мониторинг динамики метановыделения при посадке основной кровли, что позволяет заблаговременно прогнозировать газовую ситуацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов Ф.А. Автоматизация проветривания шахт / Ф.А. Абрамов, В.А. Бойко. – К.: Наук. думка, 1967. – 310 с.
2. Абрамов Ф.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Ф.А. Абрамов, Л.П. Фельдман, В.А. Святный. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
3. Автоматизированная система диагностики напряженно-деформированного состояния горного массива / В.В. Некрасов, В.Г. Казанцев, В.И. Магдыч, М.Г. Потапов. – М.: Изд-во МГГУ, 1995. – 75 с.
4. Адамович А.Н. Закрепление грунтов и противодиффузионные завесы в гидроэнергетическом строительстве / А.Н. Адамович. – М.: Энергия, 1980. – 320 с.
5. Алексеенко С.Ф. Основы моделирования при решении задач горной геомеханики / С.Ф. Алексеенко, А.Г. Заболотный, Л.А. Штанько. – К.: Техніка, 1996. – 173 с.
6. Амусин Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Б.З. Амусин, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 144 с.
7. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. – Донецк: ООО «Алан», 2002. – 312 с.
8. Ардашев К.А. Методы и приборы для исследования проявлений горного давления / К.А. Ардашев, В.И. Ахматов, Г.А. Катков. – М.: Недра, 1981. – 128 с.
9. А. с. 939781 (СССР). Вентиляционная дверь для регулирования воздушного потока / Р.К. Стасевич, В.А. Бойко, Ю.Р. Иконников, В.Л. Федорков, Н.В. Шибка (СССР); опубл. 30.03.82, Бюл. № 24. – 3 с.
10. Аэрология горных предприятий: Учебник для вузов / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Медведев. – М.: Недра, 1987. – 421 с.
11. Байконуров О.А. Основы горной геофизики / О.А. Байконуров, В.А. Мельников. – Алма-Ата: Наука, 1970. – 326 с.
12. Баклашов И.В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
13. Большинский М.И. Газодинамические явления в шахтах / М.И. Большинский, Б.А. Лысиков, А.А. Каплюхин. – Севастополь: Вебер, 2003. – 283 с.
14. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
15. Булат А.Ф. Концепция комплексной дегазации углепородного массива на шахте им. А.Ф. Засядько / А.Ф. Булат // Геотехническая механика. – 2003. – № 42. – С. 3-9.
16. Булат А.Ф. Управление геомеханическими процессами при отработке угольных пластов / А.Ф. Булат, А.Т. Курносоев. – К.: Наук. думка, 1987. – 200 с.
17. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1982. – 270 с.
18. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
19. Вопросы транспортной геотехники: Межвуз. сб. научн. тр. – Днепропетровск: ДИИТ, 1987. – 97 с.
20. Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин: РД / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, С.И. Скипочка и др. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 39 с.
21. Временное руководство по эксплуатации подсистемы диспетчерского контроля и управления проветриванием (АТМОС) АСУ ТП шахты / К.К. Бусыгин, В.А. Бойко, Ю.Р. Иконников и др. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1980. – 115 с.
22. Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. / Р. Галагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
23. Генкин В.А. Методические указания по применению глубинных реперов для изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород / В.А. Генкин, И.А. Фальдман, В.С. Сидоров. – Л.: ВНИМИ, 1983. – 96 с.
24. Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем / А.В. Анциферов, С.І. Скіпочка, А.О. Яланський, Т.А. Паламарчук, О.М. Брюханов, Г.І. Колчин, В.І. Голінько, Ю.Б. Грядущий, О.В. Агафонов, В.Б. Усаченко. – Вид-во «Ноулідж», 2010. – 253 с.

25. Геофизические методы в изысканиях для гидромелиоративного строительства. Пособие к ВСН.33.2.1.05.85. – М: Союзгидропроводхоз, 1986. – 213 с.
26. Геофизические методы исследования скважин / Под ред. В.М. Запорожца // Справочник геофизика. – М.: Недра, 1983. – 591 с.
27. Глушко В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
28. Голинько В.И. Исследование переходных аэрогазодинамических процессов в шахтной вентиляционной сети / В.И. Голинько, М.Ю. Иконников // 36. науч. праць НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2006. – Т.2. – № 26. – С. 81-89.
29. Голинько В.И. Контроль взрывоопасности горных выработок шахт / В.И. Голинько, А.К. Котляров, В.В. Белоножко. – Днепропетровск: Наука и образование, 2004. – 208 с.
30. Горбачевич Ф.Ф. Отражение и прохождение упругих волн на границе раздела сред / Ф.Ф. Горбачевич. – Апатиты: КФ АН СССР, 1985. – 98 с.
31. Горная геофизика: Сб. информационных листов по приборам. – Тбилиси: Мецниереба, 1983. – 87 с.; 2 вып., 1985. – 28 с.
32. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка / И.И. Гурвич. – М.: Недра, 1970. – 552 с.
33. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения / Дженкинс Г., Ваттс Д.: Пер. с англ. – Т. 1. – М.: Мир, 1971. – 316 с.; Т. 2. – М.: Мир, 1972. – 288 с.
34. Дубов Е.Д. Концепция безопасности в угольной промышленности должна быть пересмотрена / Е.Д. Дубов, Е.П. Мухин, П.Е. Мухин // Уголь Украины. – 2003. – №6. – С 3-16.
35. Дьяконов В.П. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet / В.П. Дьяконов, И.В. Абраменкова. – М.: Нолидж, 1999. – 352 с.
36. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB / В. Дьяконов, В. Круглов. – С.-Пб.: Питер, 2001. – 480 с.
37. Дьяконов Д.И. Общий курс геофизических исследований скважин / Д.И. Дьяконов, Е.И. Леонтьев, Г.С. Кузнецов. – М.: Недра, 1984. – 432 с.
38. Ержанов Ж.С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород / Ж.С. Ержанов, Т.Д. Карамбиев. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 238 с.
39. Ершов Л.В. Математические основы физики горных пород / Л.В. Ершов, В.А. Максимов. – М.: МГИ, 1968. – 294 с.
40. Ефремов Е.И. Взрывные разрушения выбросоопасных пород в глубоких шахтах / Е.И. Ефремов, В.Н. Харитонов, И.А. Семенюк. – М.: Недра, 1979. – 253 с.
41. Забигаило В.Г. Выбросоопасность горных пород Донбасса / В.Г. Забигаило, В.В. Лукинов, А.З. Широков. – К.: Наук. думка, 1983. – 218 с.
42. Закономерности изменения газовой проницаемости горных пород при переходе их из равнокомпонентного объемного напряженного состояния в разнокомпонентное / В.Г. Перепелица, В.С. Кулинич, Г. А. Шевелев, В. В Лукинов // Геотехническая механика. – 2004. – № 61. – С. 12-17.
43. Защитные пласты / И.М. Петухов, А.М. Линьков, И.А. Фельдман, В.П. Кузнецов, В.В. Тетеревенков. – Л.: Недра, 1972. – 424 с.
44. Зборщик М.П., Назимко В.В. Охрана выработок глубоких шахт в зонах разгрузки. – К.: Техника, 1991. – 247 с.
45. Звягильский Е. Л. Исследование процесса перераспределения метана в окрестности движущегося очистного забоя / Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий, В.В. Назимко. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 195 с.
46. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Зенкевич О.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
47. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
48. Зорин А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / А.Н. Зорин, Ю.М. Халимендик, В.Г. Колесников. – М.: Недра, 2001. – 414 с.
49. Измерение напряжений в массиве горных пород // Материалы 5 Всесоюзного семинара. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1976. – Ч. 1. – 123 с.; Ч. 2. – 123 с.; Ч. 3. – 128 с.

50. Изучение и прогноз сдвижений и деформаций массивов горных пород, гидрогеомеханических процессов при разработке месторождений подземным и открытым способами: Сб. науч. тр. ВНИМИ, С.-Пб., 1991. – 315 с.
51. Иконников М.Ю. Исследование газодинамических процессов на выемочном участке угольной шахты / М.Ю. Иконников // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2009. – № 10. – С. 40-44.
52. Иконников М.Ю. Определение аэрогазодинамических параметров добычных участков газовых шахт методом активного многофакторного эксперимента / М.Ю. Иконников // Сб. науч. трудов НГУ. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2007. – № 29. – С. 218-224.
53. Иофис М.А. Научные основы управления деформационными и дегазационными процессами при разработке полезных ископаемых / М.А. Иофис. – М.: Изд. ИПКОН АН СССР, 1984. – 242 с.
54. Касимов О.И. Эффективность направленных дегазационных скважин большого диаметра / О.И. Касимов, Б.В. Бокий // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ, 2002. – № 32. – С. 161-166.
55. Каталог 2002. Радиационный контроль. Геофизические приборы. – Желтые воды: Тетра, 2002. – 50 с.
56. Кирничанский Г.Т. Исследование и разработка методов определения свойств горных пород и математического моделирования как основ прогнозирования устойчивости выработок: Дис. канд. техн. наук: 01.02.07. – Днепропетровск, 1979. – 204 с.
57. Кирничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород / Г.Т. Кирничанский. – К.: Наук. думка, 1989. – 184 с.
58. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте / Ф.С. Клебанов – М.: Имидж-Сет, 1995. – 574 с.
59. Кораблев А.А. Современные методы и приборы для изучения напряженного состояния массива горных пород / А.А. Кораблев. – М.: Наука, 1969. – 128 с.
60. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов / Крауткремер Й., Крауткремер Г.: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 751 с.
61. Крауч С. Методы граничных элементов в геомеханике твердого тела / Крауч С., Старфилд А.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
62. Круковский А.П. Обзор существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости массива горных пород / А.П. Круковский, В.В. Круковская // Геотехническая механика. – 2002. – № 36. – С. 178-185.
63. Кузьменко А.М. Влияние структурного строения вмещающих пород на напряженно-деформированное состояние массива при интенсивной отработке угольного пласта / А.М. Кузьменко, В.Д. Рябичев // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників-2009». – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2009. – С. 70-74.
64. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев. – К. Наук. думка, 1989. – 864 с.
65. Курленя М.В. Методы расчета подземных сооружений / М.В. Курленя, В.Е. Миренков. – Новосибирск: Наука, 1986. – 232 с.
66. Литвинский Г.Г. Способы повышения несущей способности рамной металлической крепи / Г.Г. Литвинский // Крепление, поддержание и охрана горных выработок. – Новосибирск: Книжное изд-во, 1983. – С. 24-27.
67. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М. Высшая школа, 1988. – 239 с.
68. Максимов А.П., Алферов О.С. К вопросу о методике прогноза устойчивости горных выработок на глубоких горизонтах Донецкого бассейна по геологоразведочным данным. – Изв. Днепропетровского горного ин-та, 1965, т. 45, с. 21-23.
69. Малышев Ю.Н. Комплексная дегазация угольных шахт / Ю.Н. Малышев, А.Т. Айруни. – М.: Изд. Академии горных наук, 1999. – 327 с.
70. Мельников Н.И. Проведение и крепление горных выработок. – М.: Недра, 1972. – 344 с.
71. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики / Л.В. Новикова, П.И. Пономаренко, В.В. Приходько, И.Т. Морозов. – Днепропетровск: Наука и образование, 1997. – 180 с.
72. Методика геофизического прогноза удароопасности участков угольных пластов и рудных залежей / В.А. Смирнов, В.М. Проскураков, А.С. Бляхман и др. – М.: Недра, 1980. – 92 с.

73. Методические рекомендации по инженерно-геологическому изучению глубоких горизонтов месторождений твердых полезных ископаемых при разведке / В.В. Фромм, К.-А.К. Вайтекунас, А.А. Дончук, А.А. Яланский. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1985. – 38 с.
74. Методы и средства решения задач горной геомеханики. Под ред. Г.Н. Кузнецова, К.А. Ардашева, Н.А. Филатова. – М.: Недра, 1977. – 248 с.
75. Механика горных пород при подземном строительстве и освоении месторождений на больших глубинах / Ответственный редактор Г.И. Горбунов. – Л.: Наука, 1983. – 200 с.
76. Мироненко В.А. Основы гидрогеомеханики / В.А. Мироненко, В.М. Шестаков. – М.: Недра, 1974. – 296 с.
77. Михалев А.И. Цифровая обработка данных: от Фурье к Wavelets / А.И. Михалев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 200 с.
78. Николин В.И. Борьба с выбросами угля и газа в шахтах / В.И. Николин, И.И. Биличенко, А.А. Симонов. – М.: Недра, 1981. – 300 с.
79. Паламарчук Т.А. Элементы механосинергетики породного массива / Т.А. Паламарчук, В.Я. Кириченко, Б.М. Усаченко. – Днепропетровск: ЧП «Лира ЛТД», 2006. – 308 с.
80. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. – М.: Наука, 1965. – 164 с.
81. Пат. 43338, Украина: МПК (2009) E21F 1/100. Спосіб провітрювання і відводу метану з виробки, що погашається / В.І. Голінько, М.В. Шибка, М.Ю. Іконніков, Т.О. Артюшенко; заявник та власник патенту Національний гірничий університет. – № 200902907; заявл. 27.03.2009; опубл. 10.08.2009; Бюл. № 15.
82. Петренко В.І. Розрахунок трисклепінчатих станцій метрополітену глибокого закладення / В.І. Петренко, В.Д. Петренко, О.Л. Тютюкін. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
83. Півняк Г.Г. Електромеханічні системи енергонапружених барабанних млинів / Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко. – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.
84. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод / П.Я. Полуаринова-Кочина. – М.: «Наука», 1977. – 664 с.
85. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПА ОП 10.0-1.01-05. – К.: ДКУНОП, 2005. – 398 с.
86. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / А.С. Боровиков, Э.И. Вайнберг, В.И. Горбунов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – Кн. 1. – 487 с. – Кн. 2. – 351 с.
87. Прогноз проявлений горного давления вблизи выработок методом математического моделирования и геофизической диагностики / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, И.Н. Слащев, Т.И. Яровая // Геотехническая механика. – 2000. – № 22. – С. 141-143.
88. Радиометр эквивалентной равновесной объемной активности радона РГА-09МШ. Руководство по эксплуатации АЖАХ.412123.008 РЭ. – Желтые воды: Тетра, 2007. – 24 с.
89. Радченко В. В. Ликвидация аварий в угольных шахтах / В. В. Радченко, С. Н. Смоланов, Г. М. Алейникова. – К.: Техника, 1999. – 320 с.
90. Разработка и опробование геофизических методов и аппаратуры для прогноза и оценки устойчивости обнажений пород в окрестности горных выработок: Отчет о НИР 0222030000 (закл. заключит.) / УФ ВНИМИ. – Донецк, 1980. – 120 с.
91. Результаты комплексной оценки геомеханического состояния углепородного массива в зоне дегазации пласта I₁ шахты им. А. Ф. Засядько / В.С. Кулинич, В.Г. Перепелица, В.В. Шевченко и др. // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2002. Вып. 37. – С. 97-104.
92. Ржевский В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М.: Недра, 1984. – 360 с.
93. Розробка способу провітрювання й відводу метану з виробки, що погашається на виїмковій ділянці вугільної шахти / В.І. Голінько, М.В. Шибка, М.Ю. Іконніков, Т.О. Артюшенко // Матер. міжнар. конф. «Форум гірників – 2009». – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2009. – С. 20-25.
94. Рудничная вентиляция. Справочник / Н.Ф. Гращенков, А.Э. Петросян, М.А. Фролов и др. – М.: Недра, 1988. – 440 с.
95. Руководство по геофизической диагностике состояния системы "крепь – породный массив" вертикальных стволов: Дополнение к «Пособию по восстановлению крепи и армировки вертикальных стволов. РД 12.18.073-88» / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, А.А. Яланский и др.: Донецк: ООО "Лебедь", 1999. – 42 с.

96. Руководство по экспресс-определению прочностных свойств углевмещающих пород Донбасса по их геологическим характеристикам и акустическим измерениям кернов геологоразведочных скважин. РД / А.А. Майборода, Р.Х. Миняфаев, О.С. Алферов, А.А. Яланский. – Днепропетровск: Зоря, 1988. – Ч. 1. – 47 с. – Ч. 2. – 84 с.
97. Садовенко И.А. Научные основы управления геофильтрационным состоянием породного массива вокруг горных выработок: дис. ... докт. техн. наук: 05.15.04; 05.15.11 / Садовенко Иван Александрович; НГУ. – Днепропетровск, 1993. – 455 с.
98. Сахаров А.С. Метод конечных элементов в пространственной задаче теории упругости / А.С. Сахаров, В.В. Киричевский, Г.Г. Завьялов. – Деп.: Гос. респ. научно-техническая библиотека УССР, 1982. – 99 с.
99. Скипочка С.И. Механоэлектрические эффекты в породах и их использование в горной геофизике. – Днепропетровск: НГАУ, 2002. – 178 с.
100. Слащева Е.А. Разработка экспресс-методики прогноза устойчивости геоматериалов по изменению их электропроводящих свойств под воздействием гидрогеологических факторов / Е.А. Слащева // Геотехническая механика. – 2003. – № 42. – С. 143-148.
101. Слащева Е.А. Автоматизированная статистическая обработка промежуточной и выходной информации программы «Геомеханика» на основе персональной ЭВМ / Е.А. Слащева, Алекс. А. Яланский // Геотехническая механика. – 2002. – № 40. – 102-105 С.
102. Слащев И.Н. Моделирование трещиноватости как основа прогноза газового режима добычных участков глубоких шахт / И.Н. Слащев, М.Ю. Иконников // Сб. науч. трудов НГУ. – Днепропетровск: РВК НГУ, 2008. – № 31. – С. 236-245.
103. Слащев И.Н. Обоснование параметров поддержания подготовительных выработок в структурно-неоднородных породах: дис.... канд. техн. наук: 05.15.02 / Слащев Игорь Николаевич; ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2009. – 231 с.
104. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки / Госстрой СССР. - М.: Стройиздат, 1982. – 316 с.
105. Советский энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 1600 с.
106. Состояние и причины производственного травматизма на предприятиях Минуглепрома СССР в 1989 году: Обзор. – М.: Главное управление охраны труда, техники безопасности и горноспасательных частей, 1990. – 69 с.
107. Софийский К.К. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля / К.К. Софийский, А.П. Калфакчян, Е.А. Воробьев. – М.: Недра, 1994. – 192 с.
108. Справочник по гидротехнике. – М.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1955. – 828 с.
109. Справочник по инженерной геологии / Под общей редакцией М.В. Чуринова. – М.: Недра, 1978. – 540 с.
110. Тарасов Б.Г. Геоэлектрический контроль состояния массива / Б.Г. Тарасов, В.В. Дырдин, В.В. Иванов. – М.: Недра, 1983. – 215 с.
111. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок / И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов, А.А. Козырев. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.
112. Теоретичне обґрунтування застосування методу радіаційного випромінювання як фактора використання виробничого контролю стану вуглепородного масиву / А.Ф. Булат, В.Г. Перепелиця, А.О. Яланський и др. // Геотехническая механика. – 2006. – № 66. – С. 3-14.
113. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1989. – 488 с.
114. Тянь Р.Б. Общий метод решения задачи оптимального управления воздухораспределением в вентиляционной сети шахт / Р.Б. Тянь, Г.А. Швец, В.Я. Потемкин. – М.: Недра, 1971. – С. 167-171.
115. Ультразвук в разведочном бурении / В.Т. Глушко, П.К. Кучеба, А.М. Куц и др. – Донецк: Донбасс, 1974. – 70 с.
116. Управление энергоснабжением приконтурного массива слабыми воздействиями при добыче угля на больших глубинах / В.Н. Потураев, А.Н. Зорин, В.В. Виноградов, А.Ф. Булат. – Уголь Украины, 1990. – №7. – С. 22-24.

117. Усаченко Б.М. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса / Б.М. Усаченко, В.Я. Кириченко, А.В. Шмыголь. – М.: ЦНИИЭИуголь, 1992. – 168 с.
118. Усаченко Б.М. Исследование синергетических и волновых процессов в массиве горных пород / Б.М. Усаченко, Т.А. Паламарчук, Е.А. Слащева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М: МГУ, 2000. – №8. – С. 182-184.
119. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
120. Федорков В.Л. Технические средства контроля и управления проветриванием газовых шахт / В.Л.Федорков, Ю.Р. Иконников // Управление газодинамическими явлениями в шахтах. – Новосибирск, 1986. – С. 95-100.
121. Четверик М.С. Сдвигание земной поверхности, массива горных пород и их влияние на газовыделение в глубоких шахтах / М.С. Четверик, Е.В. Андрощук // Геотехническая механика. – 2002. – № 37. – С. 154-162.
122. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: Університетське видавництво «Пульсари», 2002. – 302 с.
123. Шевцова Г.М. Способ повышения устойчивости обнажений и целиков при камерных системах разработки: Дис. канд. техн. наук: 05.15.11. - Кривой Рог, 1986. – 175 с.
124. Шемякин Е.И. Две задачи механики горных пород, связанные с освоением глубоких месторождений руды и угля / Е.И. Шемякин // ФТПРПИ. – 1975. – № 6. – С. 29-45.
125. Шерифф Р. Сейсморазведка: В 2-х т. / Шерифф Р., Гелдарт Л.; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – Т. 1. История, теория и получение данных. – 448 с. – Т. 2. Обработка и интерпретация данных. – 400 с.
126. Шаруда В.Г. Математическая модель управления проветриванием добычного участка угольной шахты / В.Г. Шаруда, М.Ю. Иконников // Сб. науч. трудов НГУ. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2007. – № 28. – С. 143-149.
127. Электрометрический контроль пространственно-временной изменчивости литосферы вблизи геомеханических объектов / Паламарчук Т.А., Земба В.А., Сергиенко В.Н., Слащева Е.А. // XXI столетие - проблемы и перспективы освоения месторождений полезных ископаемых: Сб. науч. тр. НГАУ. – Днепропетровск: НГАУ, 1998. – № 3. – Т. 5. – С. 168-171.
128. Электроразведка: Справочник геофизика. – М.: Недра, 1980. - 518 с.
129. Якоби О. Практика управления горным давлением / О. Якоби: Пер. с нем. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
130. Яланский Алекс. А. Спектральный анализ геофизических сигналов, представленных файлами графических форматов / Алекс. А. Яланский // Геотехническая механика, 1998. – № 4. – С. 154-158.
131. Яланський О.А. Універсальний мікропроцесорний пристрій автоматизованої оцінки геомеханічного стану системи «кріплення-породний масив» підземних виробок на основі геофізичних методів контролю / О.А. Яланський, В.В. Арестов, О.А. Слащева // 7 Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2003)».- Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2003. – С. 150.
132. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1989. – 446 с.
133. Banerjee P.K., Dargush Gary F. Progress in BEM applications in geomechanics via examples // Numer. Meth. Geomech.: Proc. 6th Int. Conf., Innsbruck, 11-15 Apr., 1988. Vol. 1. - Rotterdam; Brookfield, 1988. – P. 13-22.
134. Jones K. The environmental Monitoring and remote control scheme for Manton Colliery / K. Jones // «Mining Eng.» (Gr.Brit.). – 1975, (1976), 135, № 178, 169-178 Discuss. – P. 178-180.
135. Natter R.S. Electronic remote controlled mine ventilation regulator / R.S. Natter, W.R. Woltz, M.V. Aldridge // I. As. Annu. Meet. IE3EInd. Appl. Soc. – Chicago: Annu.Meet, 1976. № 11+k. – P. 12-17.
136. Stanislav Gumula. Wplyw staruch zrohow i pustych przestrzeni przyległych do wyrobich kopalnianych na ksttdltowanie sie procesov przejsciowych zmian koncentracji metanu / G. Stanislav, T. Waclaw. // Arch. gorn. – 1997, 22, № 2. – P 107-116.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Сводные таблицы физико-механических свойств пород

Таблица А1 – Физико-механические свойства горных пород Западного Донбасса

Поля шахт и участки разведки	Плотность, γ , т/м ³	Угол внутр. трения φ , град.	Сцепление, $C \times 10^{-5}$, Па	Прочность на сж. $\sigma_{сж} \times 10^{-5}$, Па	$K_{вар}$, %	Прочн. на раз. вдоль слоя, $\sigma_{р } \times 10^{-5}$, Па	Прочн. на раз. попер. слоя, $\sigma_{р\perp} \times 10^{-5}$, Па	$K_{вар}$, %	Скорости продольных волн	
									$v_{ }$	v_{\perp}
									км/с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
А р г и л л и т ы										
Новомосковская №1	2,07	27,0	26,7	81	28,6	17	-	-	-	-
Новомосковская №2	2,10	30,4	28,4	101	70,0	16	8	42,0	2,49	1,46
Новомосковская №3	2,08	37,7	28,8	128	46,0	12	3	86,7	2,50	1,37
Новомосковская №4	2,02	32,5	27,8	100	41,0	16	6	59,0	2,12	1,44
Новомосковская №7	2,12	35,1	33,5	123	36,0	17	6	65,0	2,38	1,52
Уч-ок Вязовской №9	2,34	31,7	55,5	206	35,0	31	9	25,0	3,67	1,32
Западно-Донбасские №29, №4	2,17	33,8	56,0	215	37,0	30	13	36,0	3,02	2,04
№20/33, №21/22	2,20	38,0	94,0	362	24,0	47	12	59,0	3,33	2,58
№1, №2, №3	2,26	32,0	66,8	257	36,0	35	10	58,6	3,27	2,06
№6/42, №16/17	2,28	27,6	66,6	203	39,0	43	15	29,0	3,51	2,32
№15/33	2,45	25,7	66,4	213	23,9	39	11	37,0	3,58	2,03
№27-35-5	2,46	30,4	78,9	273	32,0	47	12	65,0	3,55	2,35
А л е в р о л и т ы										
Новомосковская №1	2,04	31,4	26,0	92	31,0	15	-	-	-	-
Новомосковская №2	2,13	32,2	27,3	148	97,0	16	9	40,0	2,44	1,59
Новомосковская №4	2,02	39,9	28,6	105	42,0	16	6	55,0	2,16	1,59
Новомосковская №8	2,10	33,6	28,2	125	42,0	-	-	-	-	-
Новомосковская №7	2,13	35,8	35,9	127	33,0	19	6	63,0	2,33	1,42
Уч-ок Вязовской №9	2,33	31,5	56,3	253	28,0	31	9	22,0	3,43	1,67
Западно-Донбасские №29, №4	2,20	37,0	43,0	173	36,0	22	10	54,0	-	-
№20/23, №21/22	2,30	42,0	86,0	400	19,0	38	20	47,0	3,41	2,54
№1, №2, №3	2,31	30,1	68,8	254	41,0	40	12	58,8	3,26	2,10
№6/42, №16/17	2,27	29,3	79,0	269	29,0	48	13	34,0	3,43	2,33
№15/33	2,46	27,7	73,1	247	32,0	44	14	38,0	3,57	2,35
№27-35-5	2,53	30,3	87,5	312	31,0	51	18	53,0	3,75	2,85
П е с ч а н и к и										
Новомосковский №1	2,03	29,5	25,0	86	40,0	13	-	-	-	-
Новомосковская №2	2,06	31,5	22,3	202	87,0	25	9	66,5	2,52	2,26

Продолжение таблицы А1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Новомосковская №3	1,99	33,9	28,8	165	85,0	16	3	80,0	2,31	1,98
Новомосковская №4	2,01	38,3	27,3	117	66,0	17	7	82,0	2,06	1,62
Новомосковская №7	2,09	34,9	30,8	117	54,0	16	7	76,0	2,03	1,56
Уч-ок Вязовской №9	2,25	33,4	61,9	181	32,0	35	-	-	3,67	2,40
Западно-Донбасские №29, №4	2,10	38,9	43,6	182	47,0	20	12	45,0	2,43	2,40
№20/23, №21/22	2,40	38,0	135,0	555	43,6	67	40	28,0	3,55	3,50
№1, №2, №3	2,25	33,0	109,0	399	72,0	52	33	71,0	3,41	2,92
№6/42, №16/17	2,14	34,1	87,2	335	30,0	48	-	-	2,99	2,75
№15/33	2,40	31,2	94,7	389	41,0	65	27	38,0	3,45	2,84
№27-35-5	2,37	32,6	97,3	360	30,0	51	26	52,0	3,19	2,80

Таблица А2 – Сводная таблица корреляционных зависимостей между прочностными и упругими параметрами горных пород Донбасса

Уравнения корреляционной связи	Коэффициент корреляции	Относительная погрешность определения признака по уравнению, %	Граничные условия применения уравнений, м/с
1	2	3	4
А р г и л л и т ы			
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,114v_{p\parallel} - 130$, Па	0,76	40,5	$1300 < v_{p\parallel} < 4900$
$\sigma_{p\parallel} \cdot 10^{-5} = 0,021 v_{p\parallel} - 27$, Па	0,80	38,5	$1300 < v_{p\parallel} < 4900$
$\rho = 0,21 v_{p\parallel} + 1620$, кг/м ³	0,73	7,1	$1300 < v_{p\parallel} < 4900$
$p = 34,33 - 0,0062 v_{p\parallel}$, %	-0,64	38,8	$1300 < v_{p\parallel} < 4900$
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,115 v_{p\perp} - 27$, Па	0,69	44,0	$800 < v_{p\perp} < 4400$
$\sigma_{p\perp} \cdot 10^{-5} = 0,023 v_{p\perp} - 11$, Па	0,78	39,2	$800 < v_{p\perp} < 4400$
$\rho = 0,19 v_{p\perp} + 1860$, кг/м ³	0,62	8,5	$800 < v_{p\perp} < 4400$
$p = 26,68 - 0,0058 v_{p\perp}$, %	-0,55	42,5	$800 < v_{p\perp} < 4400$
А л е в р о л и т ы			
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,111v_{p\parallel} - 106$, Па	0,69	40,4	$1300 < v_{p\parallel} < 5300$
$\sigma_{p\parallel} \cdot 10^{-5} = 0,022 v_{p\parallel} - 27$, Па	0,79	34,6	$1300 < v_{p\parallel} < 5300$
$\rho = 0,22 v_{p\parallel} + 1600$, кг/м ³	0,83	5,7	$1300 < v_{p\parallel} < 5300$
$p = 37,58 - 0,0074 v_{p\parallel}$, %	-0,76	39,1	$1300 < v_{p\parallel} < 4900$
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,115v_{p\perp} - 32$, Па	0,68	41,2	$800 < v_{p\perp} < 5200$
$\sigma_{p\perp} \cdot 10^{-5} = 0,022 v_{p\perp} - 10$, Па	0,73	38,7	$800 < v_{p\perp} < 5200$
$\rho = 0,20 v_{p\perp} + 1810$, кг/м ³	0,70	7,0	$800 < v_{p\perp} < 5200$
$p = 30,61 - 0,0067 v_{p\perp}$, %	-0,66	45,5	$800 < v_{p\perp} < 4400$

Продолжение таблицы А2

Песчаники			
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,186 v_{p\parallel} - 245$, Па	0,80	45,5	1300 < $v_{p\parallel}$ < 5300
$\sigma_{p\parallel} \cdot 10^{-5} = 0,029 v_{p\parallel} - 40$, Па	0,80	46,9	1300 < $v_{p\parallel}$ < 5300
$\rho = 0,18 v_{p\parallel} + 1650$, кг/м ³	0,65	8,4	1300 < $v_{p\parallel}$ < 5300
$p = 37,29 - 0,0063 v_{p\parallel}$, %	-0,67	30,1	1300 < $v_{p\parallel}$ < 5500
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,193 v_{p\perp} - 178$, Па	0,79	46,6	800 < $v_{p\perp}$ < 4800
$\sigma_{p\parallel} \cdot 10^{-5} = 0,030 v_{p\perp} - 29$, Па	0,79	48,3	800 < $v_{p\perp}$ < 4800
$\rho = 0,19 v_{p\perp} + 1700$, кг/м ³	0,65	8,4	800 < $v_{p\perp}$ < 4800
$p = 35,30 - 0,0066 v_{p\perp}$, %	-0,66	30,5	800 < $v_{p\perp}$ < 4800
Аргиллиты			
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,094 v_{p\parallel} + 0,021 v_{p\perp} - 118$, Па	0,81	31,8	1350 < $v_{p\parallel}$ < 4900 720 < $v_{p\perp}$ < 4400
$\sigma_{p\parallel} \cdot 10^{-5} = 0,013 v_{p\parallel} + 0,009 v_{p\perp} - 24$, Па	0,86	33,7	1350 < $v_{p\parallel}$ < 4700 690 < $v_{p\perp}$ < 4000
$\rho = 0,20 v_{p\parallel} + 0,04 v_{p\perp} + 1600$, кг/м ³	0,83	5,5	1440 < $v_{p\parallel}$ < 4700 690 < $v_{p\perp}$ < 4000
$p = 36,62 - 0,0060 v_{p\parallel} - 0,0016 v_{p\perp}$, %	0,78	28,1	1440 < $v_{p\parallel}$ < 4700 690 < $v_{p\perp}$ < 4000
Алевриты			
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,044 v_{p\parallel} + 0,069 v_{p\perp} - 63$, Па	0,71	26,5	1350 < $v_{p\parallel}$ < 5300 750 < $v_{p\perp}$ < 4100
$\sigma_{p\parallel} \cdot 10^{-5} = 0,015 v_{p\parallel} + 0,008 v_{p\perp} - 27$, Па	0,85	27,4	1350 < $v_{p\parallel}$ < 5300 750 < $v_{p\perp}$ < 4100
$\rho = 0,15 v_{p\parallel} + 0,08 v_{p\perp} + 1629$, кг/м ³	0,86	5,0	1350 < $v_{p\parallel}$ < 5300 830 < $v_{p\perp}$ < 4100
Песчаники			
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-5} = 0,105 v_{p\parallel} + 0,07 v_{p\perp} - 195$, Па	0,89	24,7	1300 < $v_{p\parallel}$ < 5200 970 < $v_{p\perp}$ < 4750
$\sigma_{p\parallel} \cdot 10^{-5} = 0,014 v_{p\parallel} + 0,014 v_{p\perp} - 33$, Па	0,87	26,6	1300 < $v_{p\parallel}$ < 5200 970 < $v_{p\perp}$ < 4750

Примечание: свойства пород по данным Г.Т. Кирничанского

Наукове видання

Іконніков Максим Юрійович
Іконніков Юрій Радіонович
Слащова Олена Анатоліївна
Слащов Ігор Миколайович
Яланський Анатолій Олександрович

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ
ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ГІРНИЧИХ РОБІТ**

Монографія

(Російською мовою)

Друкується в редакційній обробці авторів

Підп. до друку 24.03.2015. Формат 30x42/4.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 11,4.
Обл.-вид. арк. 11,4. Тираж 300 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.