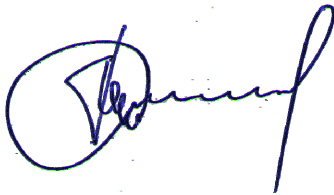


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

**ГУСЕВ АЛЕКСАНДР СТАНИСЛАВОВИЧ**



УДК 622.264

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ  
ВЫРАБОТОК СТАЛЕПОЛИМЕРНЫМИ И КАНАТНЫМИ  
АНКЕРАМИ**

Специальность 05.15.02 – подземная разработка месторождений  
полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор  
**В.И. Бондаренко**

Днепр – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....		5
<b>Раздел 1. АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ</b>		
<b>В ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПРИ СТРУКТУРНОМ</b>		
<b>ПРЕОБРАЗОВАНИИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД АНКЕРНЫМ</b>		
<b>УПРОЧНЕНИЕМ .....</b>		
		10
1.1	Применение ресурсосберегающих технологий поддержания выемочных выработок в эксплуатационном состоянии при столбовой системе разработки .....	10
1.2	Опыт применения комбинированных анкерных систем при креплении кровли выемочных выработок .....	16
1.3	Особенности проявлений горного давления в выемочных выработках при их повторном использовании .....	19
1.4	Анализ структурных преобразований вмещающих выработку пород комбинированными анкерными системами .....	23
1.5	Цель и задачи исследований .....	30
	Выводы к разделу 1 .....	31
<b>Раздел 2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА</b>		
<b>И АНАЛИЗ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД И БАЗОВОЙ</b>		
<b>КРЕПЕЖНОЙ СИСТЕМЫ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК</b>		
<b>В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ .....</b>		
		32
2.1	Построение геомеханических моделей проведения вычислительных экспериментов .....	32
2.2	Проявление интенсивности напряжений в породах вокруг выемочной выработки в зоне опорного давления впереди лавы .....	45
2.3	Напряженное состояние базовой крепежной системы в зоне опорного давления .....	49
2.4	Интенсивность напряжений пород в зонах начала сопротивления охранной полосы и стабилизации проявления горного давления .....	53
2.5	Анализ характера проявления напряжений в элементах базовой охранной и крепежной системах позади лавы .....	56
2.6	Методика шахтных исследований работы комбинированной анкерной системы .....	60

Выводы к разделу 2.....	62
Раздел 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ АНКЕРНОЙ СИСТЕМЫ В КРОВЛЕ ВЫРАБОТКИ .....	64
3.1 Напряженное состояние вмещающих пород при устойчивом проявлении горного давления .....	64
3.2 Напряженное состояние элементов крепежной системы выемочной выработки .....	74
3.3 Закономерности влияния геомеханических факторов на сопротивление комбинированной анкерной системы горному давлению .....	85
Выводы к разделу 3.....	93
Раздел 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОРОД КРОВЛИ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК СИСТЕМОЙ СТАЛЕПОЛИМЕРНЫХ И КАНАТНЫХ АНКЕРОВ .....	96
4.1 Обоснование параметров расположения сталеполимерных анкеров в породах свода выработки.....	96
4.2 Параметры упрочнения пород свода выработки канатными анкерами .....	105
4.3 Методика расчета параметров комбинированной анкерной системы свода выемочных выработок на шахтах Западного Донбасса .....	115
4.4 Результаты шахтных исследований состояния 594 сборного штрека на экспериментальном участке установки комбинированной анкерной системы.....	118
Выводы к разделу 4.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	140
ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	144
ПРИЛОЖЕНИЯ. Документы, подтверждающие реализацию теоретических и прикладных исследований.....	154
А.1 Методика расчета крепежной системы участковых выработок шахт Западного Донбасса .....	155
А.2 Методика прогноза пучения пород почвы пластовых выработок в тонкослоистом массиве слабых пород .....	158

- А.3 Расчет фактического экономического эффекта от использования «Методики расчета крепежной системы участковых выработок шахт Западного Донбасса» в выемочных выработках добычного участка №2 шахты «Западно-Донбасская» за 1-е полугодие 2015 года ..... 161
- А.4 Справка о получении экономического эффекта от выполнения расчетов крепежной системы выемочных выработок по «Методике расчета крепежной системы участковых выработок шахт Западного Донбасса» ..... 164

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** При высокопроизводительной работе добычных участков эффективным направлением поддержания выемочных выработок является повторное их использование посредством упрочнения породного массива системами сталеполимерных и канатных анкеров. Это существенно снижает материальные и трудовые затраты за счет вовлечения горных пород в противодействие проявлениям горного давления. Для условий Западного Донбасса отсутствует обоснование параметров этой системы крепления выработок в ракурсе закономерностей распределения нагрузки на ее элементы в зависимости от глубины разработки, структуры и свойств массива горных пород. Наиболее перспективным методом исследований данных сложных геомеханических систем является вычислительный эксперимент в сочетании с шахтными инструментальными наблюдениями. Это позволит повысить адекватность исследований и достоверность разрабатываемых рекомендаций по расчету параметров комбинированных анкерных систем, что является весьма актуальной научно-прикладной задачей.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами госбюджетных работ ГВУЗ «Национальный горный университет»: тема ГП-469 «Розробка засад синтезу інформаційних і геомеханічних систем керування процесами підземних гірничих робіт» (№ держреєстрації 0114U006105), тема ГП-474 «Розвиток наукових основ управління навантаженням кріпильних, охоронних систем повторно використовуваних виробок. Підвищення ефективності протипилового захисту» (№ держреєстрації 0115U002295), где автор был исполнителем.

**Идея работы** состоит в использовании закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния пород и элементов крепи для обоснования параметров системы крепления выемочных выработок.

**Целью работы** является обоснование параметров системы крепления выемочных выработок сталеполимерными и канатными анкерами с учетом закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния окру-

жающих пород и их упрочнения для реализации возможности повторного использования.

Для достижения цель поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

– выполнить анализ структурных преобразований надугольной толщи и механизма нагружения крепежной системы выемочных выработок в зоне влияния очистных работ;

– построить и обосновать геомеханические модели вычислительных экспериментов, включающие системы комбинированного анкерного крепления выемочных выработок;

– установить закономерности влияния геомеханических факторов на напряженно-деформированное состояние (НДС) комбинированной анкерной системы в своде выемочной выработки;

– разработать рациональные параметры комбинированной анкерной системы для упрочнения пород свода выемочной выработки;

– провести шахтные испытания усовершенствованной крепежной системы и оценить эффективность ее применения.

**Объект исследований** – процесс упрочнения слоистого массива слабых пород сталеполимерными и канатными анкерами кровли выемочной выработки в зоне влияния очистных работ.

**Предмет исследований** – параметры силового взаимодействия окружающего массива с системой крепления выемочных выработок сталеполимерными и канатными анкерами при упрочнении пород кровли.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач в работе использован комплексный подход, включающий анализ процессов структурных преобразований углевмещающей толщи вокруг выемочных выработок при их анкерном креплении; численное моделирование и анализ НДС грузонесущих элементов геомеханической системы, а также шахтные исследования усовершенствованной крепежной системы и оценка эффективности ее применения.

*Достоверность полученных результатов и выводов* подтверждается применением апробированных методов исследований, положений механики твердого деформируемого тела, механики подземных сооружений и механики горных пород, проведением многовариантных вычислительных экспериментов по оценке состояния элементов крепежных систем и достаточной сходимостью натуральных шахтных наблюдений (85%) с результатами численного моделирования.

### **Научная новизна полученных результатов:**

1. Впервые установлена зависимость координат установки и угла наклона сталеполимерных анкеров в своде выемочной выработки от показателя интенсивности проявления горного давления  $b^r$  с учетом параметра  $b_m^r$  пород непосредственной кровли.

2. Уточнен диапазон изменения параметров установки канатных анкеров в составе комбинированной системы в зависимости от типоразмера сечения выемочной выработки.

3. Впервые установлены зависимости относительных длин участков пластического состояния сталеполимерных и канатных анкеров в системе от изменения параметра  $b_m^r$ .

4. Впервые установлены зависимости изменения относительной длины  $\Delta$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}$  участков пластического состояния несущего элемента анкера от среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  близлежащего массива.

5. Уточнен критерий оценки уровня сопротивления сталеполимерных и канатных анкеров в комбинированной системе от глубины размещения выработки и параметров  $b^r$  и  $b_m^r$ .

### *Научные положения, защищаемые в диссертации:*

1. Область применения сталеполимерных анкеров в крепежной системе с канатными анкерами определяется показателем интенсивности проявления горного давления  $b^r$ , который находится в экспоненциальной зависимости от отношения расчетного сопротивления сжатию пород непосредственной кровли угольного пласта к его мощности  $b_m^r$ . Это позволяет обеспечить сопротивление

всех элементов крепежной системы пропорционально их несущей способности для реализации повторного использования выемочных выработок.

2. Ресурсосберегающие условия равнопрочности элементов системы крепления выемочных выработок обеспечиваются стабильностью параметров расположения канатных анкеров (0,8 – 1,1 м от вертикальной оси выработки), их углов наклона к горизонтали (65 – 80°), а также параметрами размещения сталеполимерных анкеров: углы наклона изменяются по степенной зависимости от координат их установки, которые линейно связаны с параметром  $b_m^r$  и находятся в логарифмической зависимости от величины показателя  $b^r$ . Это позволяет в горно-геологических условиях шахт Западного Донбасса эффективно применять системы сталеполимерных и канатных анкеров для крепления выемочных выработках при повторном их использовании.

**Научное значение работы** состоит в установлении закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния упрочненного массива вокруг выемочной выработки от геомеханических факторов, параметров установки сталеполимерных и канатных анкеров для эффективного применения комбинированных анкерных систем крепления.

**Практическое значение полученных результатов:**

– обоснована малозатратная технология поддержания повторно используемых выемочных выработок путем упрочнения их кровли в слоистом массиве слабых пород комбинированными анкерными системами в составе сталеполимерных и канатных анкеров;

– разработана научно-обоснованная методика расчета рациональных параметров крепежной системы.

*Реализация результатов работы* состоит в разработке методики расчета рациональных параметров крепежной системы повторно используемых выемочных выработок в слоистом массиве слабых пород и в рабочей документации проведения и поддержания выработок на шахтах ПАО «ДТЭК Павлоградуголь».



**Личный вклад соискателя** состоит в формулировке цели и задач, объекта и предмета исследований, идеи работы и научных положений; анализе структурных преобразований надугольной толщи и механизма формирования нагрузки на крепежную систему выемочных выработок; обработке результатов вычислительных экспериментов; выводов и заключения; разработке методики расчета параметров комбинированной анкерной системы крепления выемочной выработки.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях «Школа подземной разработки» (Днепропетровск – Ялта, 2013; Бердянск, 2014, 2015), XXIV и XXV Международных конференциях «Школа эксплуатации подземной» (Краков, Польша, 2015, 2016); на технических советах ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» (2012 – 2016) и научных семинарах ГВУЗ «НГУ» (2012 – 2016).

**Публикации.** По результатам научных исследований опубликовано 12 научных работ, в т.ч. 2 коллективные монографии, 4 статьи в специализированных научных изданиях Украины, 1 из которых входит в международную наукометрическую базу Scopus, 5 статей в сборнике международных конференций и в утвержденной методике расчета.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и перечня использованных источников из 97 наименований на 10 страницах; содержит 148 страниц машинописного текста, 36 рисунков на 5 страницах, 2 таблицы и 4 приложения на 12 страницах; общий объем работы – 165 страниц.

## Раздел 1

# АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПРИ СТРУКТУРНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД АНКЕРНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

## 1.1 Применение ресурсосберегающих технологий поддержания выемочных выработок в эксплуатационном состоянии при столбовой системе разработки

Растущая тенденция разрыва между высоким уровнем современных технологий в очистных забоях и возможностями своевременной подготовки длинных выемочных столбов к отработке пологих угольных пластов в Западном Донбассе требует эффективно использовать основные фонды (горные выработки). На шахтах этого промышленного региона длины лав увеличились до 300 м, а выемочного столба до 3000 м. При этом объем проведения и поддержания выемочных выработок сократился в 1,7 – 1,8 раза. Среднесуточная добыча угля из лавы имеет четко выраженную тенденцию к увеличению и за последние шесть лет возросла в 1,4 раза, т.е. с 1260 до 1774 т/сут (рис. 1.1).

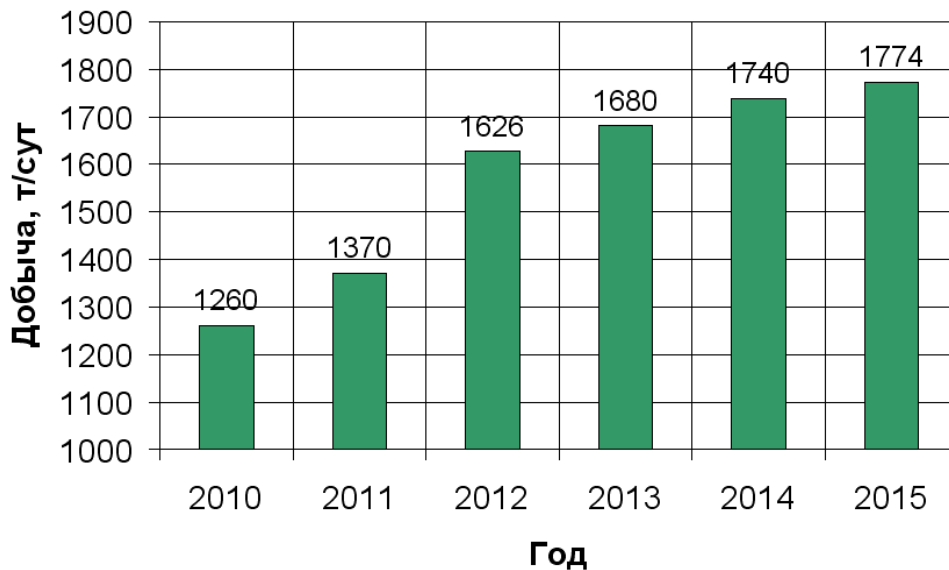


Рисунок 1.1 – Среднесуточная добыча угля из лавы

За последнее десятилетие добыча угля из лавы шахт ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» увеличилась в 2,2 раза с 10000 до 22000 тыс. т/мес. (рис. 1.2).

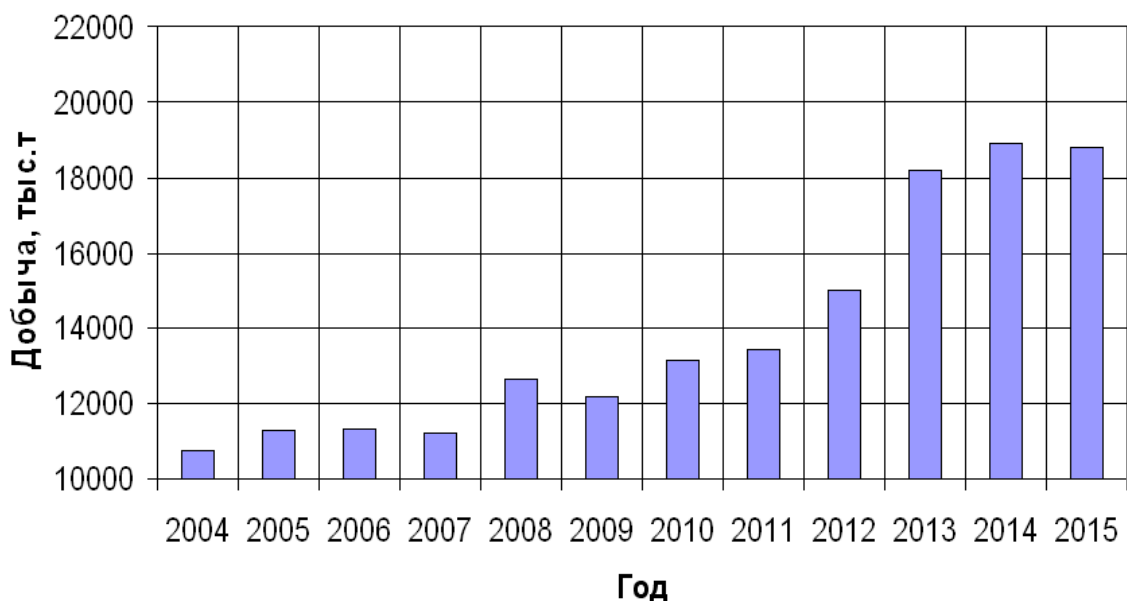


Рисунок 1.2 – Добыча угля из лавы шахт ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»

В настоящее время на шахтах Западного Донбасса охрана выемочных выработок позади лавы в зоне влияния очистных работ осуществляется различными комбинациями искусственных деревянных сооружений в виде органной многорядной крепи, деревянных стоек усиления арочного крепления, выкладки накатных деревянных костров и других сочетаний, приемлемых в конкретных горно-геологических условиях. Однако достигать необходимого положительного результата не всегда удается по следующим причинам: в выработанном пространстве имеют место полости вблизи контура выработок, также неравномерный контакт деревянных стоек (рядов) с породами кровли, что приводит к разрушению пород непосредственной кровли точечными нагрузками; разрушение стоек (рядов) при поддержании выемочных выработок позади лавы. Кроме этого не обеспечивается нормальная изоляция выработанного пространства при отработке газоносных пластов при высокой трудоемкости возведения охранных конструкций и значительной стоимости материалов.

При проведении выемочных выработок применяется комбинированная рамно-анкерная крепь, что позволяет минимизировать смещения контура до подхода лавы и предотвратить разрушение массива в зоне ведения очистных работ и на сопряжении. Сочетание данного вида крепления с различными охранными конструкциями позволило в 2005 году на шахтах Западного Донбасса повторно использовать 16197 м выработок, затем снизив объем их применения до 12701 м в 2008 году, сохранив в последующие годы, и стабилизировать объем поддержания выработок на уровне более 14100 м.

Несмотря на трудности поддержания выемочных выработок, повторное их использование на шахтах ООО «ДТЭК Энерго», и особенно на шахтах Западного Донбасса, является главным направлением в технологии ведения горных работ на весьма тонких угольных пластах с неустойчивой, пучащейся почвой, в основе которого находится формирование устойчивого породного свода и сохранение его равновесия, находясь в зоне влияния очистных работ.

Высокие темпы подвигания очистных забоев формируют особенности проявления активного горного давления и для эффективного поддержания выработок применяется крепёжная система «канатный анкер – активная породная балка», которая работает в режиме заданных деформаций. Учитывая данные обстоятельства, на отдельных шахтах Западного Донбасса для охраны выемочных выработок со стороны выработанного пространства за первой лавой применяются накатные ряды из лесоматериалов или пакетированные полосы из быстротвердеющих смесей. Это позволяет устранить выше приведенные недостатки охранных конструкций, создавая нарастающую характеристику «отпор – деформация», распределяя равномерно ее по площади взаимодействия с массивом.

В шахтоуправлении «Першотравенское» за последние 10 лет длина лавы увеличилась с 200 до 300 м, а длина выемочного столба возросла с 1200 до 2050 м и достигала длины 2550 м в 2006 и 2007 годах. Динамика изменения параметров столбовой системы разработки приведена на рис. 1.3.

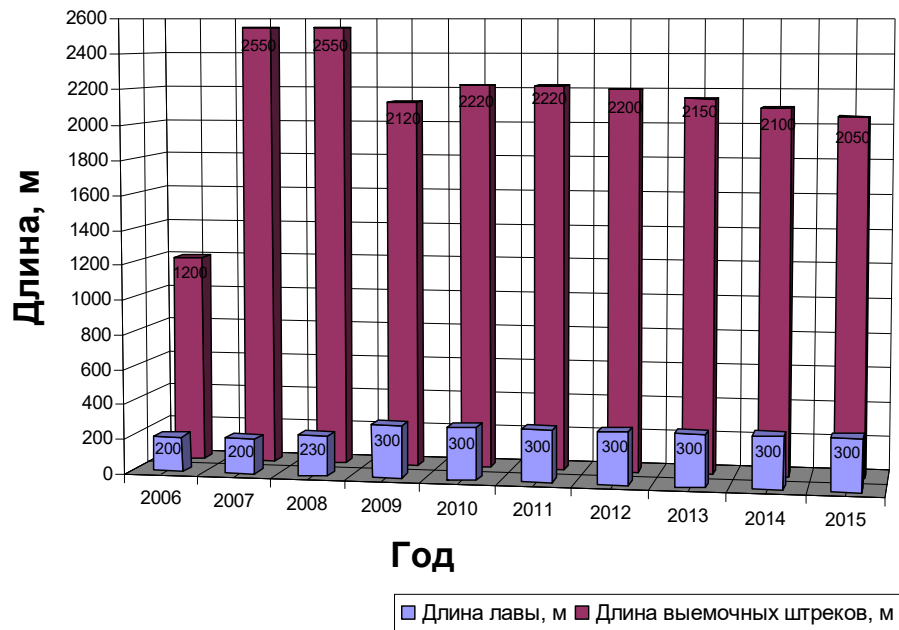


Рисунок 1.3 – Динамика изменения параметров столбовой системы разработки

В 2006 году началось повторное применение выемочных выработок при выемке угольных запасов в столбовых системах разработки. Их суммарная длина составила около 4500 м.

В 2010 году ошибочные решения при выборе характеристик охранных конструкций привели к резкому снижению объема поддержания выемочных выработок до 500 м. Учет особенностей структурного строения массива горных пород в шахтном поле позволил увеличить объем поддержания выработок до 2800 м в 2011 году. В дальнейшем ежегодно на шахте поддерживается до 4000 м выработок. На протяжении этого периода ведется активный поиск сочетания комбинаций параметров охранных конструкций и упрочнения приконтурных пород.

Применение способа повышения устойчивости породного массива посредством его упрочнения по глубине комбинированными анкерными системами, состоящих из сталеполлимерных и канатных анкеров, вокруг выемочной выработки существенно снижает материальные и трудовые затраты. На контуре выработки породы вовлекаются в противодействие проявлению горного давления.

Анализ мировых и отечественных тенденций использования анкеров в

составе крепежных систем горных выработок показал расширение области и объемов применения комбинации сталеполимерных и канатных анкеров для упрочнения пород кровли в качестве самостоятельной крепи, а также в сочетании с другими типами поддерживающих крепей.

На шахтах Западного Донбасса имеется опыт применения комбинированных анкерных систем для поддержания кровли пластовых выработок в зоне влияния очистных работ, но, пока такие технические решения носят характер эксперимента и не имеют должного распространения на различные горно-геологические и горнотехнические условия, в том числе и на выемочные выработки, которые планируется повторно использовать.

Однако получить желаемые результаты, сочетая экономию ресурсов и обеспечение требуемых условий эксплуатации выемочных выработок, не всегда удается. Для решения этого противоречия рассмотрены две перспективные составляющие технологии сохранения выемочных выработок в эксплуатационном состоянии.

Первая – снижение расходов на крепление выработки за счет вовлечения в работу по противодействию силам горного давления не только приконтурные, но и более отдаленные породные слои. Данное направление уже имеет свою историю в части широкого применения опорно-анкерного крепления на базе конструкций сталеполимерных анкеров. Упрочнению подвергаются приконтурные породы кровли и боков на ограниченное расстояние в массив из-за умеренной длины анкеров в основном до 2,4 – 3,0 м.

В последние годы активно внедряется упрочнение близлежащего массива канатными анкерами длиной (в основном) до 6,0 м. Это позволяет формировать грузонесущую конструкцию не только из пород непосредственной кровли, но и вовлекать породы основной кровли. Образованная таким образом грузонесущая армопородная конструкция (плита) воспринимает на себя часть горного давления, что способствует разгрузке рамной крепи, стоек ее усиления, а также элементов охранной системы. Следовательно, при применении комбинации сталеполимерных и канатных анкеров (комбинированных анкерных систем) появляет-

ся возможность снижения материалоемкости традиционных крепежных и охран-ных систем и трудоемкости их установки.

Вторая составляющая технологии обусловлена выбором рациональных параметров крепления для создания упрочненных пород вокруг контура выработки (в первую очередь), а затем последующей ее охраны путем возведения охранных конструкций (во вторую очередь). Обоснование этих параметров неразрывно связано как с особенностями проявлений горного давления, например, в сборном штреке, так и при его повторном использовании, в качестве бортового штрека столбовой системы разработки.

Из опыта поддержания выемочных штреков в Западном Донбассе необходимо отметить одну из главных особенностей – преимущественно нагружены стойки рамной крепи при относительно разгруженном состоянии ее верхняка. Такое поведение обусловлено формированием высоких косонаправленных и боковых нагрузок на раму при одновременном снижении вертикального горного давления на центральную часть свода выработки за счет применения опорно-анкерного крепления. Пластическое деформирование стоек рам с изгибом в полость выработки сложно и трудоемко устранить для сохранения требуемой ширины штрека. Если обеспечение высоты выработки технологически отработано и реализуется за счет периодических подрывок почвы и установки стоек крепи усиления, то сохранение приемлемой ее ширины представляется сложной задачей. Ее успешное решение базируется на изучении процессов сдвижения надугольной толщи путем проведения визуальных и инструментальных наблюдений за состоянием штреков, выявления основных закономерностей проявлений горного давления и причин, приводящих к неудовлетворительному их эксплуатационному состоянию. При этом формируются представления об особенностях механизма сдвижения массива слоистых пород и разрабатываются геомеханические модели по описанию этого процесса на длительный период первичного и повторного использования выемочных выработок. На заключительном этапе анализ результатов многовариантных вычислительных экспериментов создает научно-техническую основу для разработки методов расчета

рациональных параметров крепления повторно используемых выемочных выработок на базе установленных закономерностей параметров крепления с геомеханическими факторами поддержания выработки в условиях шахт Западного Донбасса.

Необходимость такой последовательности исследований продиктована сохранением сечения сборного штрека для его повторного использования. В этом плане необходимо очертить круг условий рационального применения тех или иных технических решений по упрочнению близлежащих пород кровли комбинированными анкерными системами.

## **1.2 Опыт применения комбинированных анкерных систем при креплении кровли выемочных выработок**

Анализ мировых и отечественных тенденций использования анкеров в составе крепежных систем горных выработок показал расширение области и объемов применения комбинации традиционных сталеполимерных и канатных анкеров, для упрочнения пород кровли в качестве самостоятельной крепи и в сочетании с другими типами поддерживающих крепей. Такие технические решения называют по-разному, например, двухуровневым анкерным креплением, но более точным является термин «комбинированные анкерные системы», поскольку, в сущности, используется именно комбинация двух типов анкеров, весьма различающихся по своим параметрам и выполняемым задачам по упрочнению пород кровли выемочной выработки.

В этой связи, как уже отмечалось ранее, проведен широкий спектр вычислительных экспериментов по расчету НДС массива вокруг выемочной выработки (поддерживаемой позади очистного забоя) и элементов ее схем поддержания, непременной составляющей которых являются комбинированные анкерные системы в кровле штрека. Конструкции этих схем различаются между собой преимущественно по количеству сталеполимерных анкеров в кровле и параметрам их расположения в комбинации с канатными анкерами.



Ограничения проявлений горного давления за счет формирования в кровле выработок армопородной плиты значительной мощности активно развивается. Известны также технические решения по использованию комбинации сталеполимерных и канатных анкеров, которую называют «двухуровневым анкерным креплением».

Опыт применения канатных анкеров и их комбинации со сталеполимерными анкерами в слабометаморфизованных породах Западного Донбасса демонстрирует положительные результаты. Тем не менее, сам механизм упрочнения пород кровли и принципы формирования армопородной плиты имеют общие черты с глубинным упрочнением массива горных пород.

Заслуживает пристального внимания исследование с применением в крепёжной системе канатных анкеров в горно-геологических условиях шахты «Степная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь», где рассмотрено влияние скорости подвигания очистного забоя на интенсивность проявлений горного давления в выемочных штреках [1]. Получен положительный эффект их применения для ограничения сдвижений пород надугольной толщи. Однако, каких-либо рекомендаций относительно выбора параметров установки канатных анкеров (координаты размещения, количество, углы наклона, шаг установки и т.п.) не приведено, поскольку эти вопросы не входили в задачи исследований. Обосновывается отказ от стоек крепи усиления в зоне фронтального опорного давления и позади лавы за счет того, что армопородная плита в кровле штрека вполне справляется с задачей ограничения проявлений горного давления и сохранения сечения выработки, достаточного для ее повторного использования.

В условиях шахт Кузбасса проведено исследование [2] по оценке эффективности «двухуровневого анкерного крепления». Здесь сделана попытка расчета параметров установки анкеров в зависимости от структуры и механических свойств пород кровли. Но, задача решается на уровне схематических представлений о формировании породных призм сползания и гипотез свода предельного равновесия, что можно рассматривать как начальный этап к описанию геомеханических процессов сдвижения неоднородной надугольной тол-

щи, разбитой естественными и техногенными трещинами на породные блоки и слои. Горно-геологические условия Кузбасса принципиально отличаются от таковых в Западном Донбассе. Отмечается надежность и долговечность «двух-уровневого анкерного крепления» при существенном снижении материалоемкости и трудоемкости возведения крепежных конструкций, что приводит к резкому уменьшению стоимости поддержания выработок.

Сочетание рамной крепи с анкерными системами используется в большинстве угольных шахт Европы. Однако в работе [3] утверждается, что нет единых технических решений по таким схемам крепления, поскольку весьма разнообразны горно-геологические и горнотехнические условия угледобычи. Эти выводы базируются на инструментальных наблюдениях за состоянием выработок с различными схемами крепления, включая канатные анкера. Проанализировано ряд эмпирических методов, используемых в Польше для проектирования схем сочетания рамной крепи и анкерных систем. Результаты шахтных исследований свидетельствуют о резком снижении перемещений породного контура выработок и их вполне удовлетворительном состоянии при использовании систем с канатными анкерами. В результате трехлетнего периода измерений подтверждена высокая эффективность использования комбинированных анкерных систем для поддержания выработок в различных горно-геологических условиях разработки угольных месторождений.

Анкерная крепь широко применяется на угольных шахтах Китая [4]: ежегодно проводится порядка 8000 км выработок, из которых 80% закреплены анкерами. Выбор схем установки анкеров базируется на накопленном опыте и аналогиях в равноценных горно-геологических условиях. Для более обоснованных рекомендаций по параметрам схем установки комбинированных анкерных систем был проведен комплекс шахтных измерений и численное моделирование с использованием FLAC 3D, чтобы проследить эволюцию напряжений в процессе прохождения лавой экспериментального участка выемочной выработки. Указывается на общее сходство результатов аналитических и шахтных исследований, что позволило предложить несколько вариантов применения

комбинированных анкерных систем. Таким образом, описан положительный опыт применения вычислительного эксперимента для выбора рациональных параметров установки сталеполлимерных и канатных анкеров в выемочных выработках в зоне влияния очистных работ. Использовать данные рекомендации для шахт Западного Донбасса затруднительно, поскольку горно-геологические и горнотехнические условия угольных шахт Китая и Западного Донбасса резко отличаются друг от друга, но сам принцип работы комбинированных анкерных систем оценивается как достаточно эффективный.

В настоящее время вычислительный эксперимент по исследованию НДС горного массива вокруг выработок, закрепленных комбинированными анкерными системами, получает все большее развитие [5 – 8]. Это научно-практическое направление следует считать весьма перспективным ввиду широких возможностей численных методов описания сложных геомеханических процессов.

Что касается учета особенностей строения окружающего массива (слоистость, трещиноватость), то используются шахтные инструментальные наблюдения с некоторыми гипотетическими представлениями [9 – 12] и накопленный опыт поддержания выработок сталеполлимерными и канатными анкерами [11 – 14].

### **1.3 Особенности проявлений горного давления в выемочных выработках при их повторном использовании**

В качестве объекта выполнения шахтных исследований выбраны 588 бортовой, 590 сборный и 592 бортовой штреки шахты «Юбилейная» ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» как варианты различных схем установки сталеполлимерных анкеров в кровле. Исследования проводились в течение 2014 – 2016 гг. на участке восточного крыла уклонной части шахтного поля пласта  $C_6$ , где отрабатывались три выемочных столба 590, 592 и 594 лавами. Горно-геологические условия примерно одинаковы как по глубине разработки, так и по структуре и свойствам углевмещающей толщи.

При эксплуатации 590 сборного штрека его крепежная система (с установкой семи сталеполлимерных анкеров в пределах свода) еще вне зоны влияния очистных работ не полностью справляется с нагрузкой в кровле. Наблюдается некоторое изменение первоначальной формы рамы из-за ее ограниченных пластических деформаций.

Согласно горно-геологическим данным аргиллиты и алевролиты основной и непосредственной кровли имеют развитую систему трещиноватости с большой вероятностью влагонасыщения. Такие условия благоприятны для активного расслоения пород кровли и образования обширного свода разупроченных пород. Предположительно размеры свода превышают длину сталеполлимерных анкеров, что снижает их противодействие вертикальному горному давлению. Мощность упрочняемой близлежащей кровли достаточно ограничена. Если породы кровли, залегающие над армопородной конструкцией, переходят в неустойчивое состояние, то несущей способности упрочненного слоя может оказаться недостаточно для предохранения рамной крепи от чрезмерных нагрузок.

Зафиксирована величина сближения боков выработки порядка одного метра по отношению к первоначальным конструктивным размерам крепи КШПУ-15,0, которая достаточно весома при первоначальном использовании штрека в качестве сборного. Увеличение его ширины связано с выпуском породы, перекреплением, дополнительными затратами и не является целесообразным в сложившейся ситуации. Необходимо обратить внимание на несоответствие боковой конструктивной податливости стойки (100 мм) зафиксированной величине сближения ее стоек, имеющее в среднем пятикратное превышение. Это соотношение вызывает не только значительный пластический изгиб стоек рамы с потерей их первоначальной формы, но и нарушает штатный режим работы замков податливости с разрушением некоторых из них.

Главная причина возникновения такой ситуации видится в сочетании бокового опорного давления и весьма слабых пород непосредственной кровли и почвы, что вызывает как формирование значительной боковой нагрузки на

раму, так и интенсификацию процесса пучения пород почвы.

В схеме крепления 590 сборного штрека находится семь сталеполимерных анкеров, которые упрочняют породы центральной части свода по длине верхняка, создавая армопородную конструкцию. Однако, эта конструкция опирается, в основном, на рамную крепь, а также на нарушенные приконтурные породы в боках выработки. Все перечисленные квазиопоры обладают той или иной степенью податливости. При опускании армопородная конструкция провоцирует расслоения в породах основной кровли и, как следствие, формирует обширную область неустойчивых пород. Создается повышенная нагрузка на раму и высокое боковое давление.

Если сконцентрировать упрочнение на породных объемах, выполняемых функции опор в боках выработки, то сопротивление армопородной конструкции в кровле станет жестче с ограничением расслоения вышележащего массива. К этому добавить «глубинное» упрочнение пород кровли с расширением площади опоры армопородной конструкции, то, очевидно, интенсивность действия бокового опорного давления снизится многократно. Это повлечет за собой резкое ограничение воздействия негативных факторов повышенной боковой нагрузки и пучения пород почвы. Поэтому целесообразно изменить как схему установки анкеров в своде выработки, так и принцип упрочнения близлежащих пород кровли.

Одновременно наблюдается асимметричность деформирования рамы крепи с повышенной нагрузкой со стороны 590 лавы. Асимметрия деформирования рамной крепи (зафиксирована разница до 480 мм двух диагональных размеров штрека и до 460 мм его вертикальных размеров) существенным образом изменяет ее первоначальную форму и снижает несущую способность. При этом нарушается штатный режим работы замков податливости, что влечет за собой увеличение нагрузки на крепежную систему, более интенсивное деформирование рамы и связанную с этим потерю сечения выработки. Поэтому, даже с учетом периодической подрывки пород почвы, потеря сечения 590 сборного штрека достаточно значима уже на первом этапе его поддержания (отработка

590 лавы); отсюда следует вывод о недостаточной эффективности усиления рамной крепи системой из 7 сталеполимерных анкеров в ее своде.

Из результатов инструментальных наблюдений следует, что снижение интенсивности бокового опорного давления возможно за счет рациональной схемы анкерного упрочнения пород кровли выемочных выработок. При отработке 592 выемочного столба 590 сборный штрек использован повторно в качестве бортового. Тенденции развития перемещений при первичном и повторном использовании штрека схожи между собой. Так, сближения пород кровли и почвы позволяют считать влияние 590 и 592 лав как равноценное; они за весь период эксплуатации 590 сборного штрека на 60 – 65% снижают его высоту. Сохранить высоту штрека на технологически приемлемом уровне удастся благодаря периодическим подрывкам пород почвы.

Сближения стоек рам (на уровне почвы) при повторном использовании штрека составляют 66 – 68% по отношению к таковым при первичном использовании выработки. Суммарная величина сближений достигает 31 – 33% от его первичной ширины.

Потеря до одной трети ширины выработки представляет серьезную проблему для надежного и стабильного ведения очистных работ в 592 лаве. Следует отметить преобладающее перемещение контура штрека со стороны действующей лавы. В относительных величинах диагональные размеры выработки снижаются на 40 – 43% от первоначального значения, что является критическим показателем потери сечения штрека. Отмеченные закономерности подтверждаются многочисленными исследованиями состояния выемочных выработок в различных горно-геологических условиях.

Проведенные замеры показали сокращение асимметрии деформирования рамы в результате отработки 592 лавы, которая возникла при работе 590 лавы. Но это не означает, что форма рамы вернулась к своему начальному положению. Произшедшие пластические деформации верхняка и стоек рамы являются необратимыми и приводят к существенной потере несущей способности рамной крепи, несмотря на примерное равенство диагональных размеров.

Для ограничения пластических деформаций рамы необходимо снизить асимметрию ее нагрузки со стороны 590 лавы, а затем со стороны 592 лавы при повторном использовании штрека. Этого можно добиться, сформировав в кровле выработки мощную армопородную конструкцию, воспринимающую на себя большую часть горного давления.

Основные выводы по результатам наблюдений за состоянием повторного использования 590 сборного штрека можно распространить и на другие выемочные штреки восточного крыла уклонной части шахтного поля пласта  $C_6$ . Качественные показатели деформаций весьма схожи, а целый ряд измерений имеют близкие значения, что дает право на некоторое обобщение.

Критически важным является ограничение сближения боков выработки, а его устранение видится в выборе рациональных параметров установки не только сталеполимерных анкеров, но и упрочнения пород кровли с помощью канатных анкеров.

#### **1.4 Анализ структурных преобразований вмещающих выработку пород комбинированными анкерными системами**

Краевая часть угольного пласта в выемочных выработках является наиболее сложным объектом многофакторности геомеханических процессов. Поэтому представляется целесообразным оценить степень влияния анкерного упрочнения на механизм преобразования структуры пород кровли выемочной выработки.

Классическая теория изгиба балок и плит [15, 16] утверждает, что максимальные горизонтальные напряжения растяжения (сжатия)  $\sigma_z$  возникают в поверхностных участках балки (плиты), а их величина обратно пропорциональна квадрату толщины балки (мощности породного слоя). Например, если соединить анкерами два породных слоя одинаковой мощности, то сопротивление изгибу объединенных слоев увеличивается в четыре раза, тогда как их суммарное сопротивление при отдельном изгибе возрастает только вдвое. Такой механизм повышения устойчивости заанкерванной кровли рассмотрен еще полвека назад в работах проф. Борисова А.А. [17] и проф. Семевского В.Н. [18].

Исходя из данных представлений на рис. 1.4 проиллюстрирован механизм повышения сопротивления изгибу двух породных слоев непосредственной кровли при ее упрочнении анкерами.

При раздельном деформировании породных слоев растягивающие напряжения имеют повышенную величину (см. рис. 1.4, *a*) и при существенном изгибе слоя превышают сопротивление породы на растяжение – начинается развитие трещин разрыва по мощности слоя. При совместном деформировании объединенных анкерами породных слоев повышается момент сопротивления их сечения, обуславливающий снижение максимумов напряжений  $\sigma_z$ , в том числе растягивающих. Процесс появления и развития трещин разрыва замедляется и не каждый знакопеременный изгиб упрочненной анкерами непосредственной кровли приводит к разделению сдвоенных породных слоев на блоки. Кроме того, при увеличенной мощности грузонесущей балки (плиты) повышается ее жесткость, ограничивающая величину прогибов слоев и снижающая вероятность разрушения этого объема породы и распада распорной системы на отдельно опускающиеся блоки (см. рис. 1.4, *b*). Сопротивление изгибу упрочненных породных слоев обеспечивает так называемый восстанавливающий момент от действия пары сил  $F$  как результирующих напряжений  $\sigma_z$  в целостной части поперечного сечения. Безусловно, процесс деления на блоки происходит и в упрочненной анкерами непосредственной кровле, но с повышенной длиной и мощностью блоков.

Следовательно, в распорной системе пород кровли снижается количество взаимодействующих элементов, а это увеличивает устойчивость пород кровли – повышается реакция их сопротивления горному давлению и снижается величина опускания в полость выработки [19].

Отметим общие закономерности формирования аномальных зон состояния надугольной толщи вблизи лавы, которые выработаны на протяжении многих десятилетий изучения этого явления и создали основу для геомеханических исследований вне зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий отработки угольных пластов.



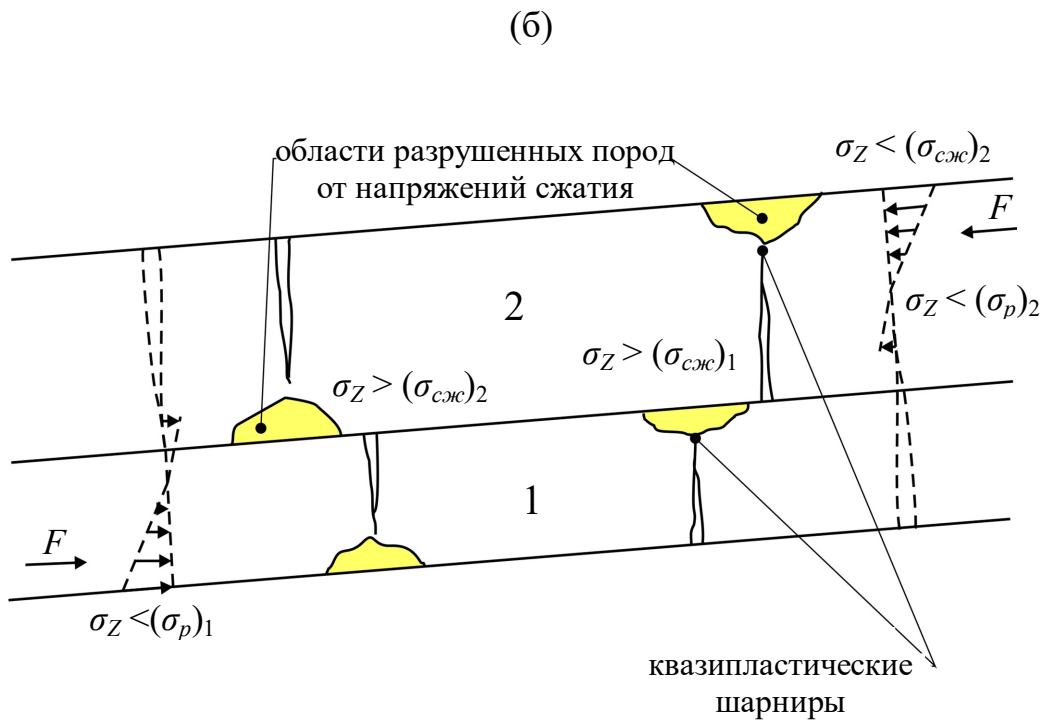
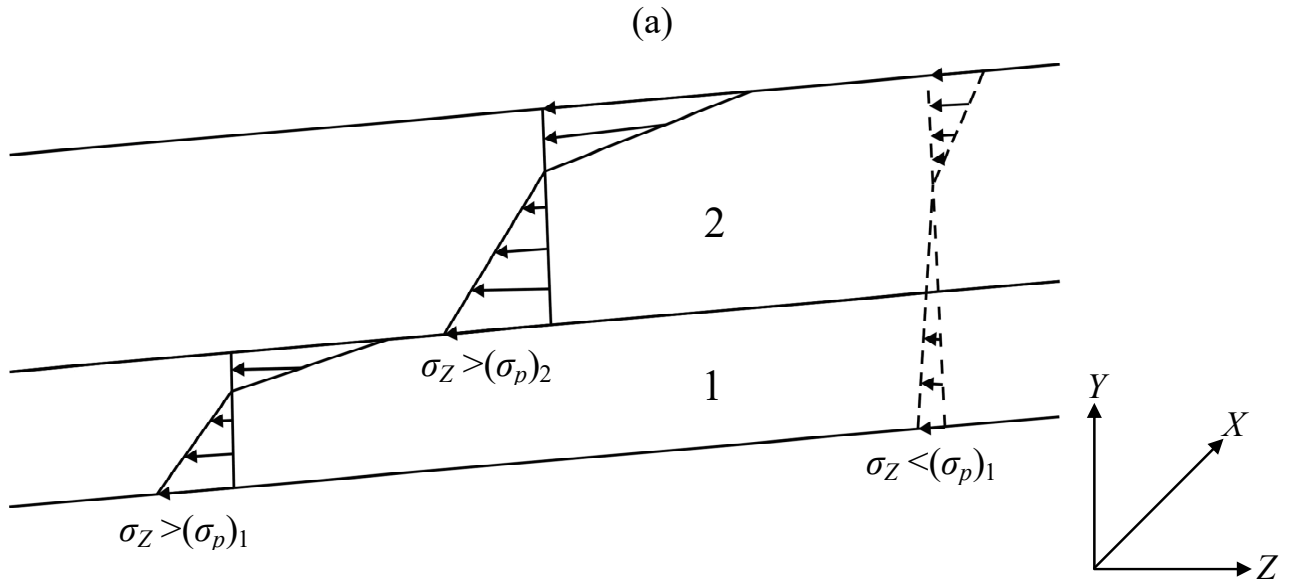


Рисунок 1.4 – Эпюры распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_z$  по мощности породных слоев кровли (а) и схема оценки устойчивости (б) при раздельном (—) и совместном (---) их деформировании

Впереди лавы формируется зона опорного давления, протяженность которой вдоль выемочной выработки на шахтах Западного Донбасса оценивается в интервале до 20 – 40 м [20]. По мере приближения лавы концентрация вертикальных напряжений  $\sigma_y$  в массиве горных пород увеличивается, достигая максимума на расстоянии 2 – 15 м от забоя. Значение этой величины зависит от соотношения жесткостей угольного пласта и породных слоев кровли.

Изменение начального состояния массива при подходе лавы провоцирует разупрочнение слабых углевмещающих пород, особенно непосредственной кровли и почвы, и, как следствие, – резкое увеличение их деформации. Сопротивление сжатию угольного пласта в 1,5 – 4 раза больше чем пород. Степень разупрочнения угольного пласта проявляется в локальных областях. Эти процессы обуславливают значительное превышение жесткости угольного пласта над породными слоями кровли. Под воздействием горного давления перемещения угольного пласта будут многократно ниже, чем породных слоев кровли. На небольшом расстоянии от забоя подавляющая часть вертикальных перемещений  $U_y$  реализуется за счет опускания легкодеформируемых слоев кровли. Пониженные деформации угольного пласта способствуют приближению максимума горного давления к забою. Традиционное для пород Донбасса, так называемое «нежесткое защемление» породных консолей над лавой, в Западном Донбассе приобретает свойства приближающиеся к понятию «жесткое защемление» (используется в строительной механике) с концентрацией изгибающего момента в породной консоли в области забоя. Это провоцирует интенсивный градиент роста перемещений породного контура выемочной выработки на ограниченном участке впереди лавы длиной до 20 – 40 м [21 – 32]. Здесь скорость сближения пород кровли и почвы, а также боков выработки резко увеличивается от долей мм/сут до единиц и даже нескольких десятков мм/сут по данным различных исследований.

Традиционная технология поддержания выемочных выработок в зоне опорного давления впереди лавы связана с установкой центральных стоек крепи усиления, в основном, в виде деревянных (жестких) по двум вариантам: одна или

две стойки устанавливают в центральной части свода выработки, либо две стойки в месте расположения замков рамы. Центральные стойки противодействуют вертикальному горному давлению (в совокупности с рамой и опорно-анкерным креплением), но никак не повышают сопротивление рамы боковым нагрузкам.

Вокруг выемочной выработки образуется ряд аномальных областей, связанных с перераспределением горного давления и процессами разупрочнения горных пород. Это установлено многочисленными исследованиями, в том числе и моделированием состояния приконтурных пород и крепи в зоне влияния очистных работ при применении опорно-анкерного крепления. Особенности состояния вмещающих пород заключаются в следующем.

С одной стороны, в приконтурных породах кровли образуется область расслоения от действия растягивающих вертикальных напряжений  $\sigma_y$ , а также горизонтальных напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_x$ , активизирующих процесс разупрочнения. Известно, что слабые породы Западного Донбасса имеют весьма низкое сопротивление растяжению (обычно до 1,5 – 3,5 МПа), к тому же благодаря воздействию ослабляющих породу факторов такое сопротивление фактически отсутствует. Тем не менее, из-за густой сетки армирования кровли анкерами область расслоения в форме свода не столь значительна, а вес пород внутри свода многократно меньше сопротивления рамной крепи вертикальным нагрузкам. Кроме того, если длина анкеров обычно превосходит размеры свода, то они сами (за счет подхватов и металлической сетки межрамного ограждения) вполне способны удержать объем отслоившихся пород.

Другая особенность углевмещающей толщи Западного Донбасса заключается в весьма слабом сцеплении по поверхностям контактов слагающих породных слоев; на многих участках такое сцепление практически отсутствует. Также следует учесть действие вблизи выработок геостатических аномалий горного давления, которые нарушают и без того слабые контакты. Породные слои вблизи выемочной выработки деформируются отчасти независимо друг от друга [33 – 42].

Аналитическими, численными и экспериментальными методами установлено, что в боках выработки повышенное горное давление разупрочняет некоторый объем слабых пород, что увеличивает их подвижность. Опускающиеся вышележащие породные слои пригружают нижележащие, в том числе разупрочненные объемы пород непосредственной кровли. Угольный пласт ограничивает вертикальные перемещения боковых пород и их вектор перемещения изменяет направление в полость выработки, нагружая стойки рамы. Этот процесс в зоне опорного давления развивается более интенсивно в связи с повышенной вертикальной составляющей горного давления. Интенсификация эффекта «штампа» происходит и в породах непосредственной почвы. Со стороны лавы развиваются аналогичные процессы выдавливания пород боков и почвы выработки, но они усиливаются за счет деформирования породных блоков. Поэтому появляется асимметрия нагрузки по всему периметру выемочной выработки, которую необходимо учитывать при построении геомеханических моделей и расчетов параметров комбинированной крепежной системы.

Схематическое представление механизма сдвижения надугольной толщи в поперечном сечении выемочной выработки дополнено рассмотрением в ее продольном направлении. Известна общепризнанная закономерность плавного изгиба породных слоев кровли впереди очистного забоя и их послойное обрушение в выработанное пространство с образованием породных консолей переменной длины [25 – 34, 43 – 49]. Для Западного Донбасса имеет место характерное нарушение контактов между слоями углевмещающей толщи и весьма низкое сопротивление растягивающим усилиям при развитой трещиноватости (обычно две-три основные системы трещин) обуславливают некоторую специфику процесса деформирования надугольной толщи впереди очистного забоя. Повышение опорного давления по мере приближения лавы усиливает относительно независимое деформирование неоднородных слоев надугольной толщи, при изгибе которых возникают растягивающие горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  (в верхней части мощности каждого слоя) еще на подходе к максимуму опорного давления. В слабых трещиноватых породах достаточно весьма небольших

растягивающих  $\sigma_x$  для зарождения и роста трещин техногенного происхождения. В сечении слоя, где образовалась трещина, резко снижается момент сопротивления и здесь наиболее вероятно дальнейшее развитие трещин (по мере приближения лавы), которые, в конце концов, смыкаются с областью разрушенных пород (от концентрации сжимающих  $\sigma_x$ ) в нижних частях каждого слоя и происходит их разделение на породные блоки.

С точки зрения устойчивости выемочной выработки образование трещин в близлежащих породных слоях впереди лавы повышает их деформацию и снижает сопротивление опорному давлению, что неизбежно приводит к интенсификации процесса выдавливания пород в боках и почве выработки. Поэтому, для повышения надежности прогноза проявлений горного давления в разрабатываемых геомеханических моделях следует учитывать дискретную нарушенность породных слоев, усиливающуюся по мере приближения очистного забоя. Здесь один из основных вопросов заключается в том, каким образом учитывать эту дискретную нарушенность, для чего рассмотрен факт деформирования частично нарушенной породной плиты с эпюрами распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ , за счет действия которых возникает реакция сопротивления горному давлению (см. рис. 1.4). В таком представлении между частично нарушенными породными плитами в зоне опорного давления возникает подобие распорной системы, обладающей, с одной стороны, повышенной деформацией, а, с другой, – определенной несущей способностью за счет действия только сжимающих напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  по мощности слоя. При отсутствии растягивающих напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  в сечении породной плиты ее несущая способность реализуется за счет восстанавливающего момента от плеча равнодействующих усилий на противоположных поперечных плоскостях  $YX$  и  $YZ$  плиты как интегральных величин сжимающих  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ , по площадям их распределения на торцевых плоскостях. Такой механизм деформирования и взаимодействия близлежащих породных слоев с дискретными пространственными нарушениями более достоверен, чем традиционные представления о сплошно-

сти массива (в зоне опорного давления впереди лавы) и появлении некоторых областей нарушенных пород.

Таким образом, сформулированы выводы и рекомендации по принципам создания геомеханической модели сдвижения массива и нагрузки крепи выемочной выработки в зоне влияния очистных работ.

Во-первых, частичное разупрочнение породных слоев надугольной толщи в виде дискретных нарушений в областях растягивающих напряжений (в основном горизонтальных  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ ) и высоких концентраций сжимающих напряжений. Это приводит к увеличению объемов пород, подверженных активным деформациям, а их разделение на систему взаимодействующих плит интенсифицирует процесс выдавливания частично разупрочненного приконтурного массива в боках и почве выработки.

Во-вторых, создание и совершенствование (по пути повышения достоверности и объективности) геомеханической модели должно пройти ряд последовательных этапов, отражающих реальный процесс зарождения и развития дискретных нарушений в слоистой надугольной толще.

### **1.5 Цель и задачи исследований**

Цель работы – обоснование параметров системы крепления выемочных выработок сталеполимерными и канатными анкерами с учетом закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния окружающих пород и их упрочнения для реализации возможности повторного использования.

Цель работы реализована решением следующих основных задач:

– выполнить анализ структурных преобразований надугольной толщи и механизма нагрузки крепежной системы выемочных выработок в зоне влияния очистных работ;

– построить и обосновать геомеханические модели вычислительных экспериментов систем комбинированного анкерного крепления выемочных выработок;

- установить закономерности влияния геомеханических факторов на НДС комбинированной анкерной системы в своде выемочной выработки;
- разработать рациональные параметры комбинированной анкерной системы для упрочнения пород свода выемочной выработки;
- провести шахтные испытания усовершенствованной крепежной системы и оценить эффективность ее применения.

### **Выводы к разделу 1**

Анализ современных работ в области поддержания выработок в зоне влияния очистных работ комбинированными анкерными системами свидетельствует о том, что имеет место перспектива их широкомасштабного применения:

- во-первых, весьма важен учет особенностей горно-геологических и горнотехнических условий поддержания выемочных выработок как определяющего фактора в выборе параметров средств анкерного крепления, на что указывают большинство исследователей, а также схематический перенос существующих рекомендаций на специфические условия Западного Донбасса недопустим;
- во-вторых, наиболее перспективным методом исследований данных сложных геомеханических систем является вычислительный эксперимент в сочетании с шахтными инструментальными наблюдениями;
- в-третьих, при выполнении вычислительных экспериментов обязательен учет строения близлежащего массива, его природных и техногенных нарушений, что позволит повысить адекватность исследований и достоверность разрабатываемых рекомендаций по расчету параметров комбинированных анкерных систем.

## Раздел 2

# ОБОСНОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД И БАЗОВОЙ КРЕПЕЖНОЙ СИСТЕМЫ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

## 2.1 Построение геомеханических моделей проведения вычислительных экспериментов

Проведение вычислительных экспериментов на базе метода конечных элементов (МКЭ) осуществлено с использованием рекомендаций [20, 50, 51 – 54] моделирования геомеханических процессов сдвижения углевмещающего массива в окрестности выемочных выработок. Технология моделирования предполагает синтез общей геомеханической системы из двух составляющих: модель углевмещающего массива и схема крепления выработки. Последняя для объективной оценки выполняется в двух вариантах: существующая крепёжная система согласно технической документации на проведение выемочной выработки, которая названа нами «базовая» схема и усовершенствованная схема крепления, обосновывается на основе исследований состояния породного массива и опыта поддержания повторно используемых выемочных выработок.

В методическом плане составляющие исследования представлены следующим образом:

- обобщение представлений о механизме сдвижения надугольной толщи и нагружения крепёжной системы выемочных выработок;
- анализ НДС породного массива в окрестности выработки;
- оценка НДС грузонесущих элементов базовой крепёжной системы;
- разработка и обоснование усовершенствованной схемы крепления;
- расчет и анализ НДС геомеханической системы «массив – рама – комбинированная анкерная крепь»;
- установление закономерностей влияния основных геомеханических факторов на НДС грузонесущих элементов комбинированной анкерной системы



при упрочнении свода выемочной выработки и в сочетании с крепью КШПУ;

– разработка методики расчета параметров анкерной системы выемочной выработки;

– проведение и анализ шахтных испытаний разработанной крепежной системы повторно используемых выемочных выработок.

Для реализации данного объема исследований создана общая геомеханическая модель и ее составляющие с использованием следующих основных положений.

Первое – обоснование размеров общей модели и условий на ее границах. Для этого произведен тестовый расчет общей геомеханической модели, отличающейся своими увеличенными размерами по координатам:  $y$  – высота,  $x$  – ширина и  $z$  – толщина вдоль осевой координаты выработки. Здесь учитываются возмущения НДС, обусловленные проведением выработки в шахтном поле. Чтобы установить границы аномалий в распределении компонент напряжений необходимо их сравнение с таковыми для нетронутого массива. В этом плане обоснование размеров модели неразрывно связано с условиями нагружения на ее границах, которые обусловлены выбором модели исходного состояния нетронутого массива.

В существующей горнотехнической литературе [49 – 57] нет единого представления об исходном состоянии нетронутого массива: гидростатическое ( $\sigma_y = \sigma_x = \sigma_z$ ) или негидростатическое ( $\sigma_y \neq \sigma_x = \sigma_z$ ). В решенных геомеханических задачах выбрано негидростатическое исходное состояние, как преобладающее в ракурсе описания поведения углевмещающего массива. В исследованиях автора диссертационной работы использована модель негидростатического исходного состояния нетронутого массива, характеризующаяся следующими начальными условиями:

$$\sigma_y = \gamma H; \quad (2.1)$$

$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H, \quad (2.2)$$

где  $H$  – глубина размещения выработки;

$\gamma$  – средневзвешенный объемный вес пород надугольной толщи до дневной поверхности;

$\mu$  – коэффициент Пуассона (поперечной деформации) горной породы.

По данным геологической службы шахты выбрана наибольшая глубина проведения участка выработки и в соответствии со структурой надугольной толщи рассчитан ее средневзвешенный объемный вес, а затем, используя формулу (2.1), определены исходные вертикальные напряжения нетронутого массива.

Горизонтальные напряжения  $\sigma_x = \sigma_z$  будут отличаться для каждой литологической разности ввиду разного значения коэффициента Пуассона. Учет данного обстоятельства выполнен по отработанной в МКЭ методике путем введения по вертикальным границам модели условия «симметрия». При этом расчет горизонтальных напряжений  $\sigma_x = \sigma_z$  выполняется автоматически по назначенным для каждого литотипа значениям  $\mu$ . Информация о коэффициенте  $\mu$  взята из данных геологической службы шахты, а недостающие сведения – по результатам исследований физико-механических свойств пород Западного Донбасса, изложенных в работах [58, 59].

Таким образом, на верхней горизонтальной границе модели прикладывается равномерное рассчитанное геостатическое давление  $\sigma_y$ , а на вертикальных границах действуют напряжения  $\sigma_x = \sigma_z$  в соответствии с формулой (2.2). Нижняя горизонтальная поверхность модели опирается на жесткое основание в соответствии с наработанными рекомендациями [60 – 62].

По обоснованным граничным условиям произведен тестовый расчет модели массива с отверстием в форме выработки под крепь КШПУ без ее установки, так как влияние крепи распространяется лишь на близлежащие приконтурные породы. Размеры тестовой модели были намеренно завышены, чтобы в ней гарантированно разместились все аномалии НДС, вызванные ведением горных работ. Кроме того, опыт выполнения вычислительных экспериментов

показывает возникновение аномалий НДС в районе границ модели, которые обусловлены приложением нагрузки и действием других граничных условий. Эти краевые эффекты исчезают при движении к выработке и, если размеры модели выбраны достаточными, то влияние краевых эффектов и выработки не накладываются друг на друга.

Исходя из вышеприведенных условий, были проведены тестовые расчеты на модели размерами: высота  $y=60$  м, ширина  $x=70$  м, толщина  $z=8$  м из расчета моделирования в дальнейшем десяти комплектов рамной крепи. Результаты тестовых расчетов показали, что вполне достаточно высоты модели  $y=40$  м, ширины  $x=40$  м, а по толщине  $z$  модели краевые эффекты распространяются менее 1,0 м в массив. Поэтому на первом этапе тестовых расчетов с некоторым запасом принято  $z=6$  м, что по данным работы [40] гарантированно обеспечит объективность НДС в центральной (по толщине) части модели.

Строение модели горного массива полностью отвечает структуре углевмещающей толщи в районе размещения выработки и ее ориентировке относительно пласта  $C_6$ . Для повышения достоверности расчетов в модели имитируются реальные процессы нарушения контактов по плоскостям напластований смежных литологических разностей [51, 52, 63, 64].

Перечисленные положения являются содержанием второго этапа тестовых исследований. Что касается структуры углевмещающего массива, то здесь не требуется никакого обоснования, а выполнено построение модели в соответствии с данными прогнозного геологического разреза по горным выработкам.

Более важной структурной особенностью явилось установление степени целостности контактов смежных литологических разностей, так как из работы [51] известно, что нарушение контактов между породными слоями кардинально меняет НДС окружающего выработку массива.

Методика исследований заключается в сравнении величины касательных напряжений  $\tau_{yx}$  и  $\tau_{yz}$ , действующих в плоскости контакта какой-либо пары смежных слоев с величиной предельно допустимых касательных напряжений  $\tau_{don}$ , которые, согласно теории прочности Кулона-Мора определяются по

формуле

$$\tau_{дон} = C + \sigma_y \cdot f_{mp}, \quad (2.3)$$

где  $C$  – величина сцепления по плоскости напластования слоев;

$f_{mp}$  – коэффициент трения смежных литотипов в плоскости контакта.

Из данных горно-геологического прогноза следует, что структура близлежащих к выработке углевмещающей толщи характеризуется регулярным чередованием породного слоя (аргиллита и алевролита) с угольными пластами  $C_6$  и  $C_6^1$  или угольными прослоями мощностью 0,1 м. То есть, в любом из контактов участвует угольный пласт или прослой. Из работ [58, 59] известно, что в условиях Западного Донбасса сцепление угля с другими горными породами практически отсутствует. Поэтому с некоторым запасом в «минус» устойчивости массива можно положить величину сцепления, равной нулю ( $c=0$ ) и формула (2.3) предельно упростится. Величина коэффициента трения  $f_{mp}$  угля по аргиллиту (алевролиту) взята из исследований [65, 66] и снижена на 50% в соответствии с рекомендациями [67] по причине увлаженности либо обводненности контактов.

Используя изложенную методику, выявлена протяженность контактов, где не выполняются условия их целостности

$$\left. \begin{array}{l} \tau_{yx} < \tau_{дон}; \\ \tau_{yz} < \tau_{дон}. \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

По площади данных нарушенных контактов введено условие «среда без трения», которое моделирует режим проскальзывания смежных литотипов относительно друг друга при их деформировании. В итоге построена модель структуры массива в окрестности выработки, которая максимально адекватна реальным условиям ее поддержания.

Физико-механические свойства каждой литологической разности модели соответствуют данным горно-геологического прогноза и экспериментальным исследованиям характеристик литотипов Западного Донбасса [58, 59]. Прочно-

стные свойства пород непосредственной и основной кровли и почвы введены в модель с учетом влагонасыщения по данным испытаний ИГТМ. Для остальных литологических разностей учет обводненности пород выполнен в соответствии с нормативными документами [67, 68], а трещиноватости и реологии из документов [67, 68] и исследований, представленных в работах [58, 59].

Третий этап подготовки геомеханической модели к проведению вычислительного эксперимента состоит в обосновании физико-механических свойств каждого литотипа углевлещающего массива на основе данных, полученных из вышеуказанных источников. Здесь, в первую очередь, необходимо определиться с выбором модели состояния горной породы: упругая, упруго-пластическая, вязко-пластическая, с учетом или без учета разупрочнения и разрыхления в предельной стадии деформирования. Наиболее проста и надежна при выполнении расчетов (минимальное количество так называемых «отказов» вычислительного процесса) упругая модель поведения горной породы, в которой учет неупругих деформаций осуществляется путем использования модуля деформации взамен модуля упругости в линейной диаграмме связи напряжений и относительных деформаций [63]. Но, упругая модель не отражает процесс образования и влияние областей предельного и запредельного состояния породы на изменение НДС окружающего массива. Модель полной диаграммы деформирования горной породы и реологическая модель весьма сложны [69] и характеризуются низкой степенью надежности из-за постоянных «сбоев» вычислительного процесса по причинам несовершенства программного обеспечения или недостатка вычислительных ресурсов.

Выход из данной ситуации найден в компромиссном подходе с учетом конкретных горно-геологических условий проведения вычислительного эксперимента. Достаточно крепкие породы кровли способствуют локализации областей разупрочнения в небольших объемах приконтурных пород. Пропорционально этим объемам и происходит влияние на изменение НДС углевлещающего массива. Степень влияния локальных областей разупрочнения можно оценить как малосущественную в близлежащих относительно крепких породах кровли и

угольного пласта. Тем не менее, состояние и этих небольших объемов нарушенных пород смоделировано условием пластического течения, что весьма характерно для глинистых пород [70]. Алевролит и аргиллит, залегающие в непосредственной и основной почве, имеют чрезвычайно низкие прочностные характеристики, как в естественновлажном, так и водонасыщенном состояниях. Поэтому, данные литотипы весьма склонны к пластическому течению. Отображение состояния пластического течения обеспечивается билинейной диаграммой деформирования горной породы, которая и использована в вычислительных экспериментах. Первый линейный участок моделирует допредельную стадию нагружения с использованием в качестве деформационной характеристики значение модуля деформации каждого литотипа. Предельные и запредельные стадии имитируются условием пластичности при постоянстве элементарного объема горной породы [70]. В итоге, данная модель поведения углевмещающего массива достаточно адекватно отражает реальные условия его деформирования и относительно стабильна в технологическом процессе проведения вычислительного эксперимента.

Принцип отображения механических характеристик горной породы следующий. В модели каждого литотипа используются такие физико-механические показатели: предел прочности при одноосном сжатии  $\sigma_{сж}$ , предел прочности при одноосном растяжении  $\sigma_p$ , модуль деформации  $E$ , коэффициент Пуассона  $\mu$  и объемный вес  $\gamma$ . Эти сведения взяты из данных геологической службы шахты и дополнены результатами исследований механических свойств горных пород Западного Донбасса [58, 59].

При выполнении расчетов учитывалось действие ослабляющих породу факторов: обводненности, трещиноватости и реологии путем введения поправочных коэффициентов в соответствии с действующим нормативным документом [67] и работами [53, 58, 59, 64].

Расчетное сопротивление породы сжатию  $R$  и расчетный модуль деформации  $E_{расч}$  определяется по формулам [67]

$$R = \sigma_{сж} \cdot K_c \cdot K_w \cdot K_t; \quad (2.5)$$

$$E_{расч} = E \cdot K_t^2, \quad (2.6)$$

где  $K_c$  – коэффициент, учитывающий «дополнительную нарушенность массива пород поверхностями ослабления без сцепления и малой связностью»; определяется по табл. 2.1;

$K_w$  – коэффициент, учитывающий «разупрочнение обводняемых пород в результате фильтрации по массиву воды водоносных горизонтов»; определяется по табл. 2.2;

$K_t$  – коэффициент, учитывающий снижение механических характеристик породы при длительном нагружении; рассчитывается по формуле

$$K_t = \sqrt{1 - \frac{x}{\beta}}, \quad (2.7)$$

здесь  $\frac{x}{\beta}$  – реологический показатель; определяется в соответствии с работами [48, 49] по формуле

$$\frac{x}{\beta} = 0,8 - 0,326 \lg \sigma_{сж}.$$

Таблица 2.1 – Коэффициент структурного ослабления пород

Среднее расстояние между поверхностями ослабления пород, м	$K_c$
Более 1,5	0,9
1,5 – 1,0	0,8
1,0 – 0,5	0,6
0,5 – 0,1	0,4
Менее 0,1	0,2

Таблица 2.2 – Коэффициент разупрочнения обводненных пород

Тип пород	$K_w$
Песчаники и сланцы кремнистые	0,8
Песчаники известковые и известняки	0,7
Песчаники глинистые и алевролиты	0,6
Аргиллиты и мергели	0,5
Глины	0,4 – 0,5

Третий этап является завершающим в комплексе тестовых расчетов по созданию геомеханической модели массива; по их итогам полностью обоснована и подготовлена к вычислительному эксперименту модель углевмещающей толщи в окрестности исследуемой выработки.

Следующим (четвертым) обязательным этапом подготовки вычислительного эксперимента является обоснование и тестирование второй составляющей общей геомеханической модели – крепежной системы выработки и условий ее взаимодействия с окружающим массивом.

Моделирование базовой схемы крепления (рис. 2.1) выполнен в полном соответствии с паспортом проведения выработки. Механические характеристики крепежных материалов взяты из данных [16].

Для наиболее достоверного отражения работы крепежной системы использованы методические разработки [22, 53, 54, 71, 72].

Исследования четвертого этапа по обоснованию геомеханической модели включали следующий состав работ.

Ориентировка выработки относительно пласта  $C_6$  выполнена в полном соответствии с технической документацией на ее проведение. Поперечное сечение выработки ориентировано по простиранию пласта, продольное сечение – по его падению. Воспроизведена комбинированная подрывка непосредственной кровли и почвы пласта  $C_6$ . По контуру рамной крепи с межрамным ограждением, а также породного контура с межрамным ограждением действуют нормальные и касательные усилия.

Таким образом, полностью отражаются реальные геометрические параметры, в том числе, воспроизведено поперечное сечение СВП. Для этого сетка покрытия СВП конечными элементами имеет масштаб, отличающийся, на два и более порядка от масштаба покрытия горного массива, что обеспечивает высокую точность определения компонент напряжений в рамной крепи. Моделирование узлов податливости рамы осуществлено по рекомендациям [71], сущность которых сводится к следующему. Точное отражение конструкции замка податливости в модели крепи КШПУ не вызывает принципиальных затруднений.



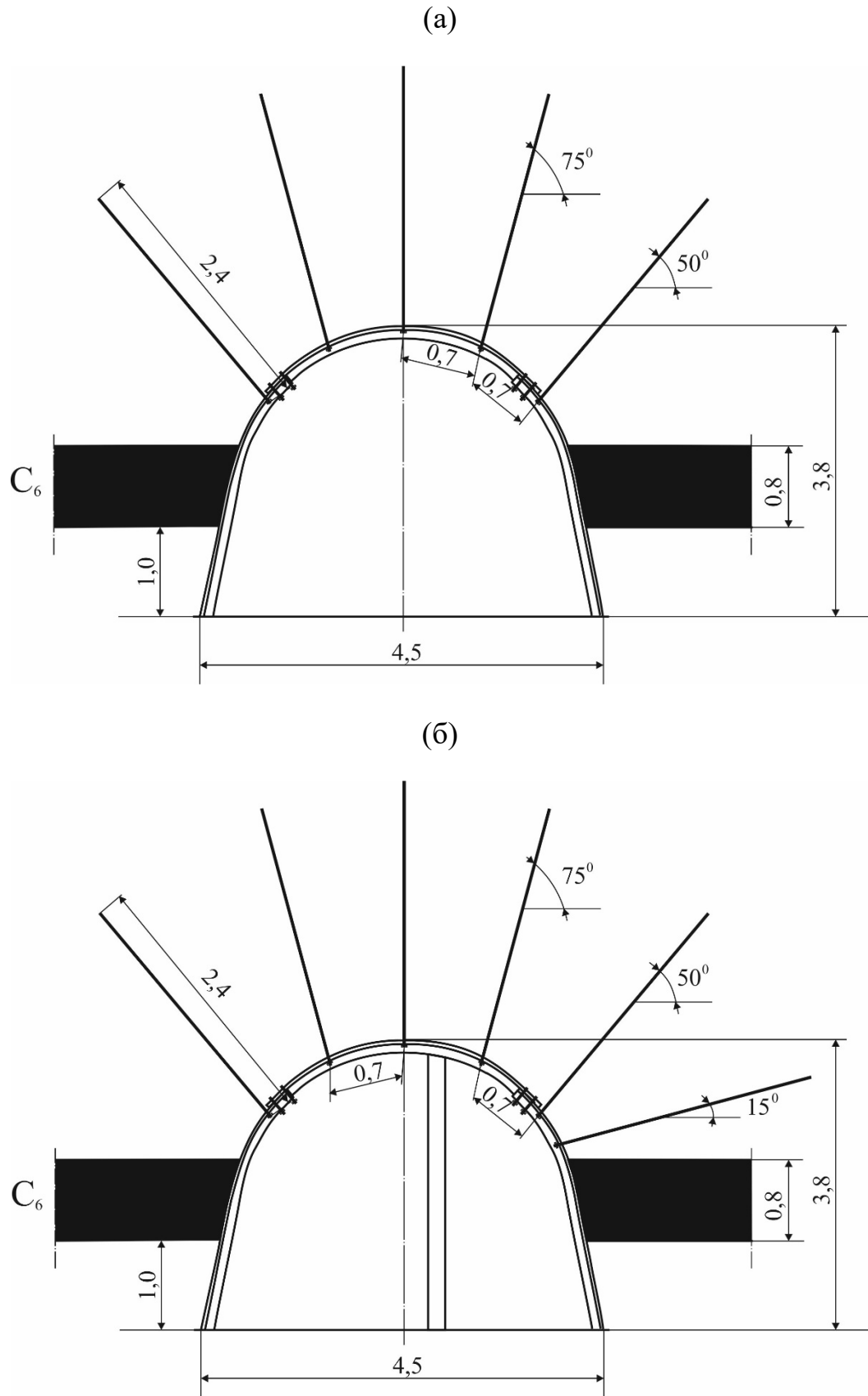


Рисунок 2.1 – Модели «базового» варианта схемы крепления выработки: впереди лавы вне зоны (а) опорного давления и в ней (б)

Однако, из-за конструктивных несовершенств геометрического порядка верхняя рама имеет локальные участки контакта со стойкой, особенно, в режиме податливости крепи, когда площадь этих контактов произвольным образом меняется. При этом возникает некоторая статическая неуравновешенность конструкции с увеличением степени свободы перемещения сопряжения стойки с верхняком в любом направлении. Из-за несоответствия этих перемещений шагу приращений напряжений и деформаций в конечно-элементной сетке рамы стабильно возникают «отказы» вычислительной системы. Для устранения указанных недостатков в данной модели рамной крепи КШПУ использован имитатор узла податливости в виде участка СВП с неизменной геометрией поперечного сечения, но с другим пределом текучести материала по сравнению со сталью Ст.5, из которой обычно изготавливается спецпрофиль СВП. По длине замка податливости механические свойства стали СВП остаются неизменными за исключением величины ее предела текучести. Таким образом, достигается полное соответствие конструктивной податливости реальной рамы и модели без искажения сущности процесса.

Что касается механических характеристик материала рамной крепи, то профиль СВП изготавливается из стали Ст.5 и ее механические характеристики введены в модель согласно данным [19]. Поскольку нередко наблюдается пластический изгиб верхняка или стоек рамы, то для его отображения использована упруго-пластическая модель поведения стали, диаграмма деформирования которой, при переходе на площадку текучести, весьма достоверно отображается условием идеальной пластичности, что использовано нами при проведении вычислительного эксперимента.

Для моделирования сталеполлимерных и канатных анкеров использована еще более мелкая конечно-элементная сетка, чем для рамной крепи. Это обусловлено конструктивными особенностями сталеполлимерного и канатного анкеров, которые полностью отображены в модели. Несущий стержень с механическими характеристиками согласно данным [16], а быстротвердеющий полимерный состав с механическими характеристиками согласно технической докумен-

тации завода-изготовителя с дополнениями из сведений работы [70]; опорная плита с натяжной гайкой со свойствами стали Ст.3.

Параметры установки анкеров взяты из технической документации на поддержание выработки, а на новом (экспериментальном) участке – согласно усовершенствованной крепежной системе. В обоих вариантах анкера устанавливаются посередине длины межрамного пространства.

С точки зрения отображения реального режима работы сталеполимерных и канатных анкеров, то анализ горнотехнической литературы и опыт эксплуатации выработок с анкерной крепью указывает на ее достаточно жесткую деформационно-силовую характеристику. Это означает, что анкеры не допускают сколь-нибудь существенного удлинения или скольжения относительно породных стенок шпура по причине высокой адгезии полимера с породой или металлом.

Поэтому, наиболее объективно моделирование жесткого контакта арматуры анкера с породными стенками шпура, что и осуществлено при проведении вычислительного эксперимента.

По изложенным данным смоделирована работа крепежной системы в целом и проведен тестовый расчет, преследовавший две цели.

Первая – выявление каких-либо принципиальных противоречий в сравнении с результатами современных исследований геомеханических процессов в окрестности пластовой выработки. Результаты тестирования подтверждают существующие представления о процессах сдвижения углевмещающего массива вокруг выработки вне зоны влияния очистных работ.

Вторая – обосновать толщину модели (по координате  $Z$ ) с учетом установки рамной крепи и анкеров. При этом выявлено, что искажения НДС модели вблизи ее вертикальных границ (по плоскостям  $YX$ ) происходит не глубже как до второй рамы, начиная от граничной плоскости. Тогда, все последующие рамы будут достаточно объективно отображать характер их НДС. Принято решение о моделировании в продольном сечении выработки пяти комплектов рам и шести рядов анкерной крепи. Центральная рама и соседние ряды анкеров находятся вне зоны влияния приграничных аномалий НДС модели. Таким обра-

зом, реализованы все положения, предусмотренные планом исследований крепёжной системы.

Кроме того, выполнение поставленных задач потребовало изменения параметров геомеханической модели по сравнению с участком поддержания выемочной выработки вне зоны влияния очистных работ. С одной стороны, изменяется напряженное состояние окружающего горного массива по сравнению с таковым на участке вне зоны влияния очистных работ – появляются аномалии горного давления вокруг выемочной выработки, обусловленные очистными работами. Учет влияния очистных работ (на участке подхода лавы) при обосновании геомеханических и построенных моделей выемочной выработки осуществлен исходя из следующих положений.

Первое – опорная зона впереди лавы характеризуется повышенными вертикальными напряжениями  $\sigma_y$  в углевмещающем массиве, концентрация которых усиливается по мере приближения к угольному пласту [73 – 82]. При этом возникает вопрос – какую величину концентрации  $\sigma_y$  задавать в качестве граничного условия при построении и расчете геомеханических моделей.

Второе – области опорного давления по бокам выемочной выработки также характеризуются концентрацией  $\sigma_y$ , увеличивающейся по мере приближения выработке и угольному пласту, но величина  $\sigma_y$  разная для левого и правого бортов выработки и отличается в зоне опорного давления впереди лавы. Здесь присутствует тот же вопрос относительно концентрации  $\sigma_y$ , используемой в модели.

Следовательно, необходимо согласовать указанные аномальные области для наиболее адекватного и достоверного отражения влияния очистных работ в модели. Это согласование произведено на основе анализа поля  $\sigma_y$  в работе [51] по следующим условиям:

– во-первых, области с одинаковым коэффициентом концентрации

$k = \frac{\sigma_y}{\gamma H}$  должны распространяться в кровлю угольного пласта на примерно рав-

ную высоту в зоне опорного давления впереди лавы и областей опорного давления в боках выработки;

– во-вторых, высота (по координате  $Y$ ) распространения коэффициента концентрации должна превышать суммарную мощность слоев основной кровли, формирующих нагрузку, как на концевые секции механизированной крепи, так и на крепежную систему выемочной выработки, что не вносит изменений в их НДС.

Одновременное выполнение указанных условий достигается в базовой модели на высоте 18,5 – 18,9 м от угольного пласта, где действует коэффициент концентрации  $k = 1,8 - 2,1$ . По данным параметрам обоснованы граничные условия нагружения модели: на верхней границе модели, проходящей по контакту алевролита и песчаника на высоте 18,95 м, действуют начальные вертикальные напряжения  $\sigma_y = 2\mathcal{H}$ ; остальные граничные условия остаются без изменений.

Другая сторона изменений геомеханической модели касается введения дополнительных крепежных элементов:

– впереди очистного забоя на расстоянии не меньше 20 м устанавливаются центральные деревянные стойки крепи усиления под верхняк рамы с некоторым смещением в сторону рабочего борта выработки;

– в районе замка податливости рамы устанавливается дополнительный анкер длиной 2,4 м под углом 10 – 20° к горизонтали. Этот анкер предназначен для поддержания кровли непосредственно над бермой штрека после прохода лавы.

## **2.2 Проявление интенсивности напряжений в породах вокруг выемочной выработки в зоне опорного давления впереди лавы**

Анализ интенсивности напряжений выполнен отдельно для породного массива вокруг выемочной выработки и для ее крепежной системы, что способствует более детальному и точному изучению полей напряжений [83 – 86].

Приняты во внимание существенные изменения полей напряжений при приближении лавы к рассматриваемому сечению выемочной выработки. Уча-

сток длины выработки, где действует опорное давление от приближающейся лавы, относительно невелик, а мероприятия по усилению крепежной системы проводятся на участке – не менее 20 м. При стабильной работе лавы это расстояние она проходит за 4 – 7 сут. В течение этого времени реологические процессы находятся в начальной стадии. Но, учитывая повышенную напряженность массива, смоделированы три состояния при разном расстоянии до лавы: в начале зоны опорного давления (коэффициент концентрации 1,1); посередине участка опорного давления ( $k = 1,65$ ); вблизи очистного забоя ( $k = 2,0$ ). Эти состояния геомеханической системы проиллюстрированы на соответствующих эпюрах полей напряжений (рис. 2.2 – 2.4.).

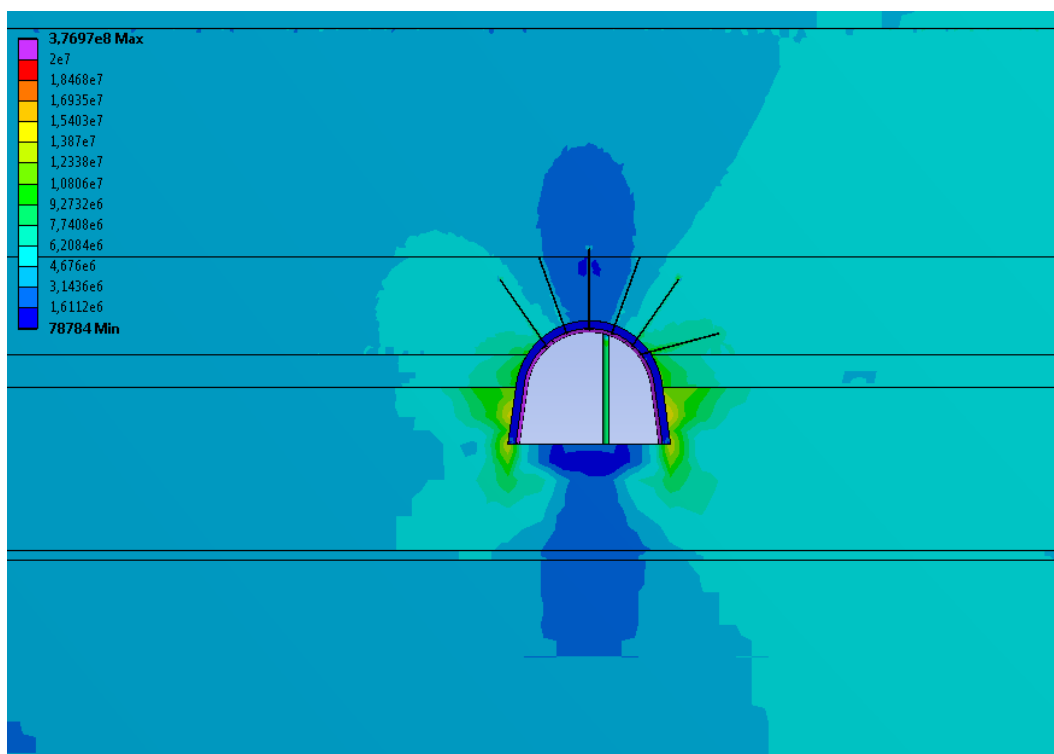


Рисунок 2.2 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  в окружающем выемочную выработку породном массиве в начале зоны опорного давления впереди лавы

Основной результирующей компонентой оценки состояния близлежащего к выработке породного массива является интенсивность напряжений  $\sigma$  [22, 87, 88].

В начале зоны опорного давления эпюра  $\sigma$  характеризуется небольшой асимметрией распределения (относительно вертикальной оси выработки) в сторону приближающейся лавы (см. рис. 2.2). Зоны разгрузки затрагивают первые слои основной кровли и почвы с уровнем действующих напряжений  $\sigma = 1 - 3$  МПа. В боках выработки концентрация  $\sigma = 14 - 17$  МПа имеет весьма ограниченное распространение до 0,4 м, а ширина действия  $\sigma = 10 - 13$  МПа не превышает 1,9 м в верхней части непосредственной почвы. Также невысокая концентрация  $\sigma = 10 - 14$  МПа действует под опорами стоек рамной крепи. Приведенные данные указывают на слабое влияние зоны опорного давления в начальной период его воздействия, что вполне согласуется с экспериментальными исследованиями по замеру перемещений породного контура выемочной выработки.

По мере подхода лавы к рассматриваемому сечению выработки ее влияние усиливается (см. рис. 2.3 и 2.4):

- степень разгрузки  $\sigma$  в кровле и почве снижается и локализуется в небольших областях, а в остальных объемах пород величина  $\sigma = 5 - 7$  МПа уже несколько превышает исходное состояние массива;

- в боках выработки усиливается асимметрия распределения  $\sigma$ : если со стороны смежного выемочного участка величина напряжений  $\sigma = 11 - 12$  МПа распространяется на высоту до 13 – 16 м и ширину до 7 – 8 м, то со стороны подошедшей лавы такие напряжения доходят до границ модели;

- в приконтурных боковых породах на всю высоту выработки и под опорами стоек рамы действуют разрушающие концентрации  $\sigma = 20 - 70$  МПа, распространяющиеся по ширине до 2,1 м.

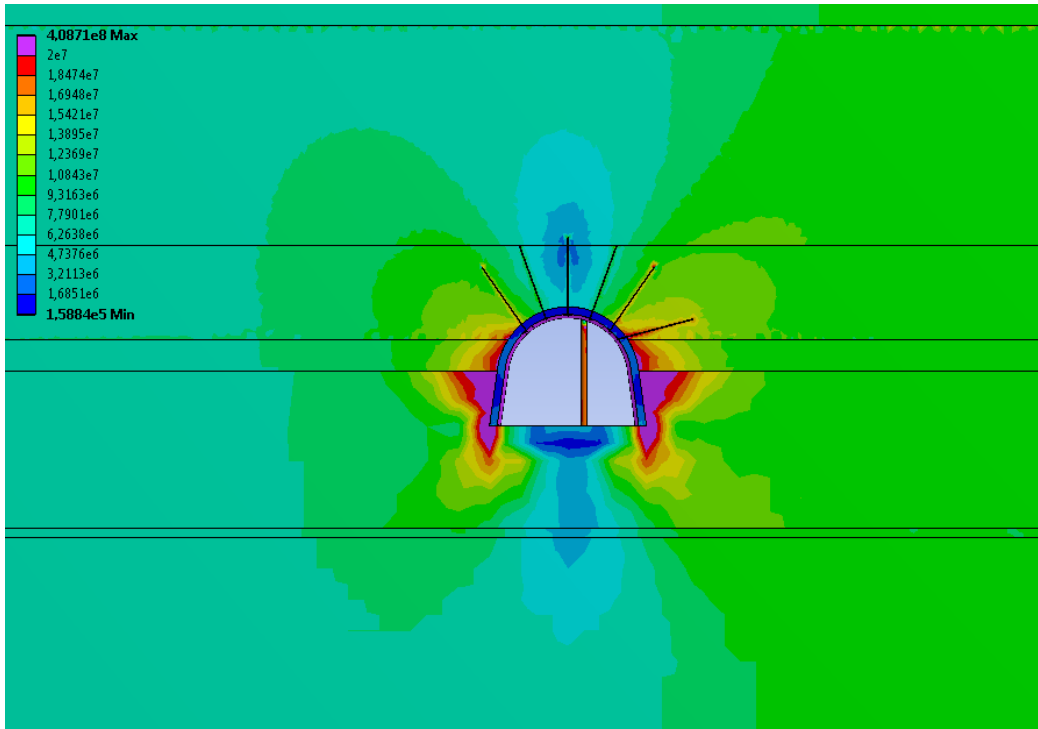


Рисунок 2.3 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  в окружающем выемочную выработку породном массиве по середине участка опорного давления впереди лавы

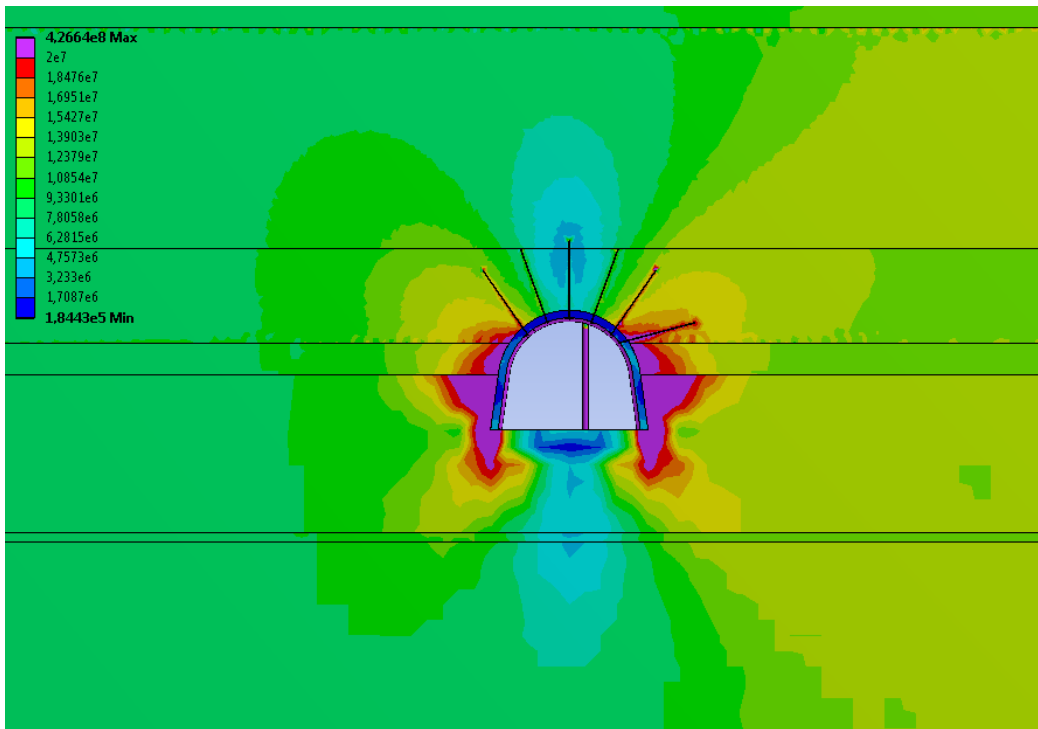


Рисунок 2.4 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  в окружающем выемочную выработку породном массиве вблизи очистного забоя



Таким образом, отмечается достаточно неустойчивое состояние приконтурных пород в боках выемочной выработки, занимающих существенный объем и по этой причине способных создавать повышенную боковую нагрузку на крепежную систему. Обращает внимание активное расслоение приконтурных пород почвы на глубину до 0,8 м, что провоцирует ее пучение.

### **2.3 Напряженное состояние базовой крепежной системы в зоне опорного давления**

Цель настоящего подраздела состоит в оценке НДС крепежной системы выемочной выработки на участке, попадающем в переднюю часть зоны опорного давления. Анализ компонент напряжений выполнен в каждом грузонесущем элементе: рамной крепи, анкерах и центральных стойках крепи усиления [22, 89, 90].

Итоговой компонентой, подвергнутой исследованию в крепежной системе выемочной выработки, являются интенсивность напряжений  $\sigma$ , эпюры которых приведены на рис. 2.5 – 2.7.

В начале зоны опорного давления впереди лавы (см. рис. 2.5) поле  $\sigma$  в элементах крепежной системы характеризуется следующими особенностями. В рамной крепи (как и на участке вне зоны влияния очистных работ) наиболее нагруженными являются стойки. Верхняк рамы, благодаря опорно-анкерному креплению и стойке крепи усиления, находится в относительно разгруженном состоянии:

– в центральной части свода  $\sigma$  составляют всего 52 – 70% от предела текучести стали Ст.5;

– в районе пяты свода напряжения увеличиваются до  $\sigma = 200 – 260$  МПа и приближаются к предельному состоянию;

– в локальной области контакта стойки крепи усиления с верхняком действуют концентрации  $\sigma = 180 – 250$  МПа, которые в дальнейшем приводят к активному изгибу верхняка с потерей его первоначальной формы.

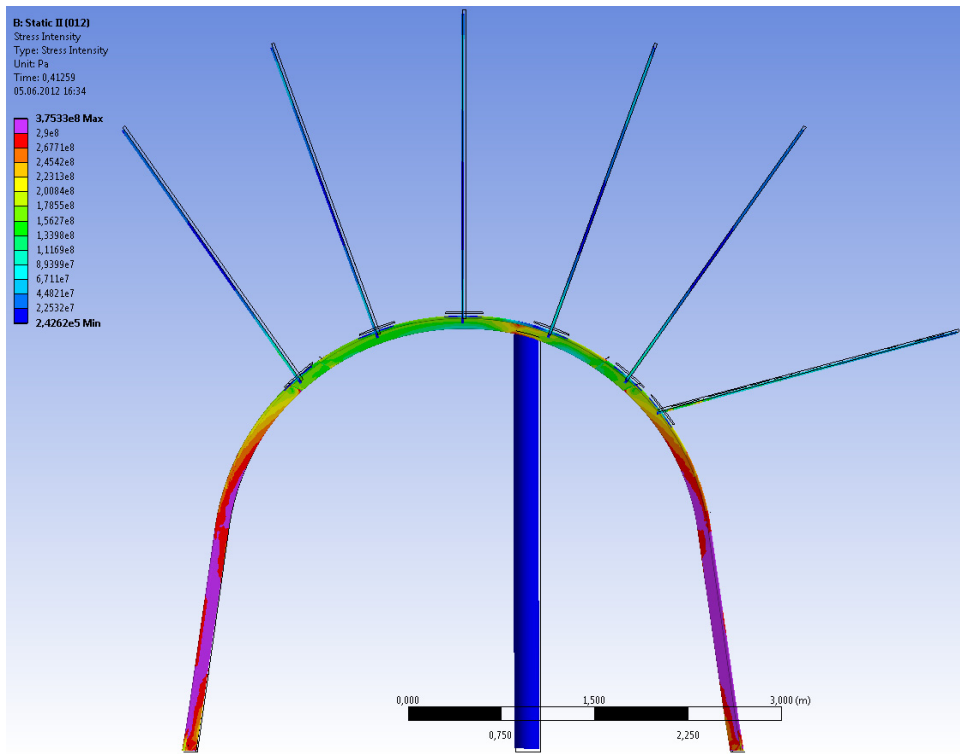


Рисунок 2.5 – Эпюры интенсивности напряжений  $\sigma$  в базовой крепежной системе выемочной выработки в начале зоны опорного давления

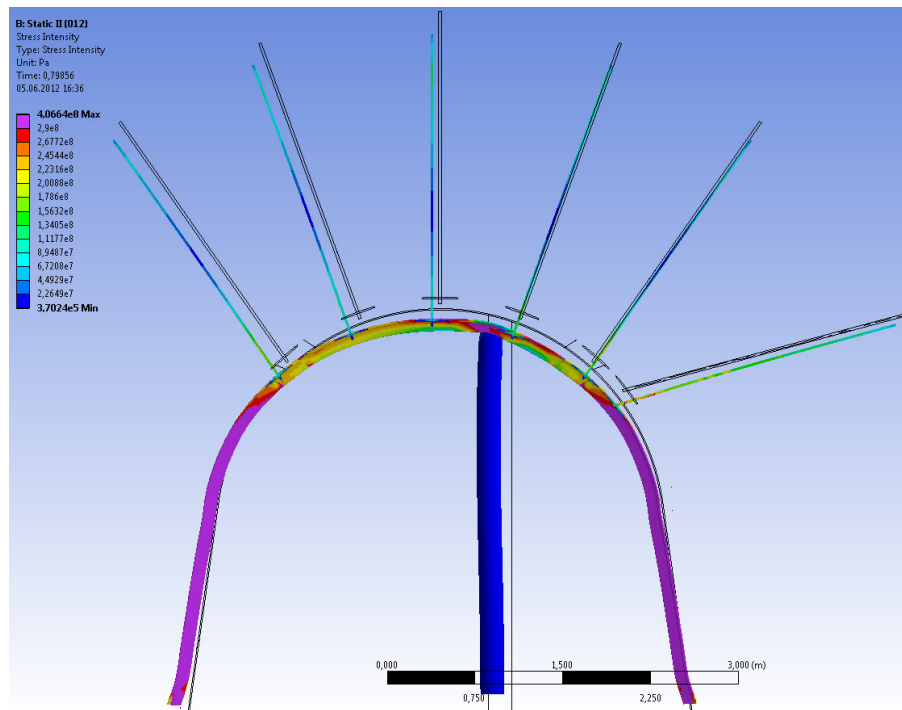


Рисунок 2.6 – Эпюры интенсивности напряжений  $\sigma$  в базовой крепежной системе выемочной выработки посередине участка опорного давления

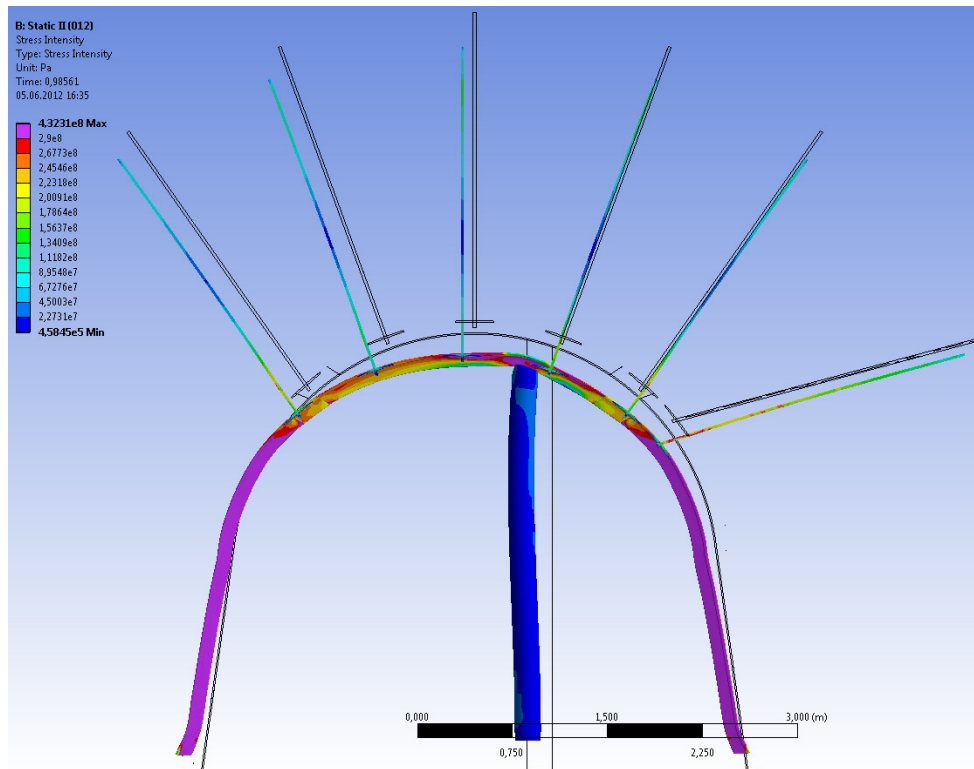


Рисунок 2.7 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  в базовой крепежной системе выемочной выработки вблизи очистного забоя

В стойках рамы, особенно по длине прямолинейной части  $\sigma = 260 - 300$  МПа вызывают пластическое состояние (или близкое к нему) их материала. Характер распределения  $\sigma$  по сечению СВП указывает на участки активного изгиба стоек:

- в полость выработки на высоте 1,8 – 2,2 м;
- в сторону боковых пород на высоте 1,4 – 1,7 м;
- в полость выработки на высоте 0,7 – 1,3 м;
- в сторону боковых пород в районе опоры стойки на высоте до 0,3 – 0,5 м.

Такой знакопеременный изгиб вызывает потерю устойчивости стойки рамы и требует ее усиления.

Центральная стойка крепи усиления характеризуется достаточно равномерным распределением  $\sigma$  по длине и в поперечном сечении; уровень  $\sigma = 20 - 40$  МПа указывает на ее устойчивость в целом, но верхняя граница  $\sigma$  уже достигает предела прочности на сжатие сосны вдоль волокон.

Анкера в системе опорно-анкерного крепления пока не испытывают значительной нагрузки ( $\sigma = 50 - 90$  МПа) по большей части своей длины и только на ближних к контуру выработки участках  $\sigma = 110 - 140$  МПа. Исключение составляет дополнительный анкер со стороны лавы, где максимумы  $\sigma = 180 - 210$  МПа уже приближаются к расчетному пределу текучести арматуры анкера.

При подходе лавы (см. рис. 2.6 и 2.7) наблюдаются следующие закономерности изменения интенсивности напряжений в крепежной системе выемочной выработки. Верхняк рамной крепи выполаживается с появлением предельного состояния ( $\sigma = 260 - 290$  МПа) в верхней части поперечного сечения СВП, а в области контакта со стойкой крепи усиления пластические деформации развиваются еще более интенсивно ( $\sigma \geq 290$  МПа), что вызывает перегиб верхняка и еще раз указывает на отрицательное воздействие установки жестких центральных стоек крепи усиления.

Стойки рамной крепи практически по всей своей длине переходят в пластическое состояние и требуют усиления в боковом направлении.

Интенсивность напряжений в центральной стойке крепи усиления изменяются не столь существенно, однако в ее верхней части, где наблюдается максимальный изгиб, появляются локальные области с разрушающими напряжениями  $\sigma = 45 - 55$  МПа. Обеспечение конструктивной податливости центральных стоек крепи усиления позволит выполнить две позитивные функции: снизить напряжения и деформации изгиба в самих стойках и одновременно ограничит пластические деформации в верхняке рамы и его перегиб в области контакта со стойкой крепи усиления.

В анкерах опорно-анкерной крепи, особенно периферийных, происходит увеличение  $\sigma$  до значений  $200 - 260$  МПа на примыкающих к выработке участках их длины. В дополнительном анкере действуют повышенные напряжения (до  $290$  МПа) на более протяженном участке его длины. Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  в анкерах (вблизи очистного забоя) указывает на практически полную загрузку периферийных анкеров, а наименее нагруженным является центральный вертикальный анкер.

## 2.4 Интенсивность напряжений пород в зонах начала сопротивления охранной полосы и стабилизации проявления горного давления

После прохода первой лавы рассмотрено изменение поля приведенных напряжений  $\sigma$  от участка начала работы охранной системы (рис. 2.8) до участка стабилизации проявлений горного давления (рис. 2.9).

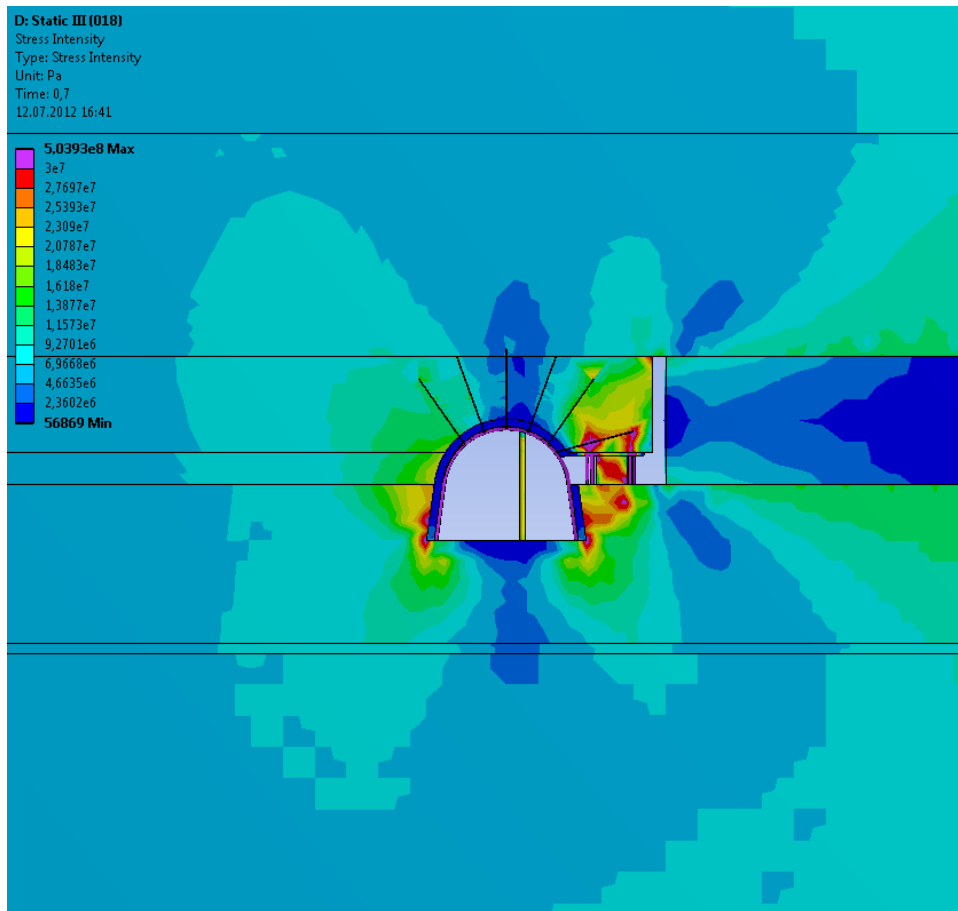


Рисунок 2.8 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  во вмещающем выработку породном массиве в начальный период сопротивления охранной системы

После возведения охранной системы она, как более жесткий элемент, начинает воспринимать повышенную нагрузку со стороны опускающихся породных слоев кровли и передавать ее на берму выработки с формированием соответствующих концентраций  $\sigma$  (см. рис. 2.8) в породах непосредственной кровли и почвы. В непосредственной кровле над охранной системой концентрация разрушающих напряжений  $\sigma = 30 - 80$  МПа действуют только в локальных

областях над более жесткими рядами деревянных стоек. Эти очаги  $\sigma_{max}$  пока не представляют существенной опасности, так как за их пределами величина  $\sigma = 18 - 23$  МПа еще не превысила сопротивление породы сжатию.

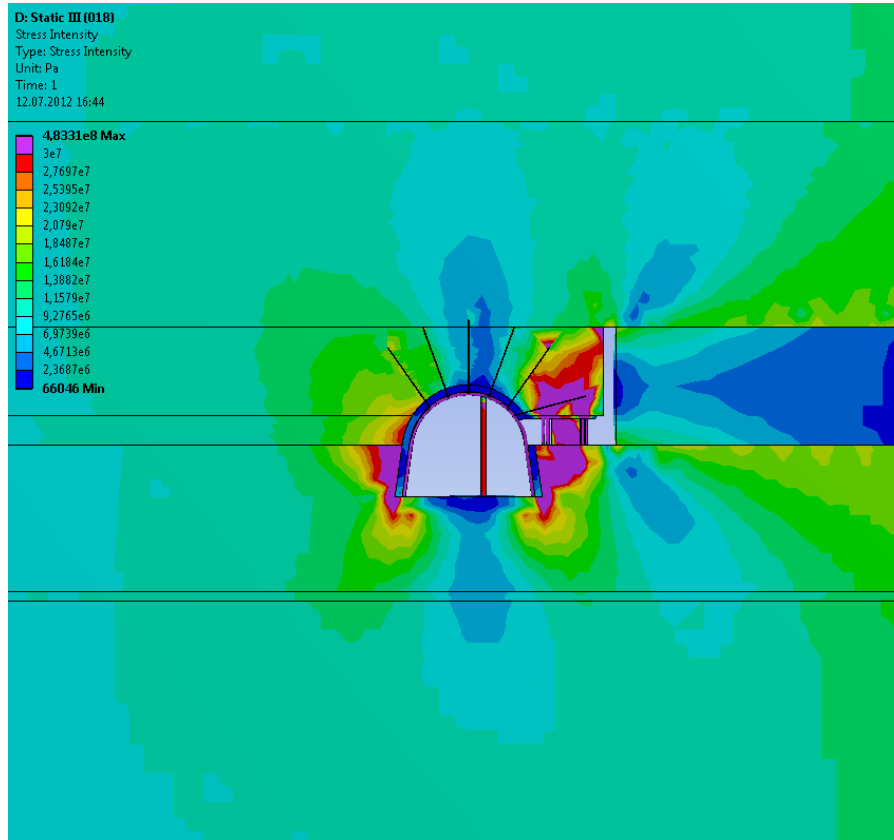


Рисунок 2.9 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  во вмещающем выработку породном массиве на участке стабилизации проявлений горного давления

При возрастании проявлений горного давления в указанных областях начинается разрушение непосредственной кровли с развитием повышенных вертикальных нагрузок на крепежную систему. Механизм протекания этого процесса обусловлен увеличением податливости разупрочненного объема пород над охранной системой. Следовательно, опускающиеся слои основной кровли будут преимущественно нагружать крепежную систему. Поэтому важно ограничить объемы разупрочнения непосредственной кровли над ближней к выработке частью охранной системы, а основную нагрузку перенести в глубь выработанного пространства.

Аналогичные процессы происходят в породах непосредственной почвы под охранной системой. Здесь концентрации  $\sigma = 30 - 50$  МПа пока имеют еще более ограниченное распространение, но возникает ряд очагов в районе стоек рам, которые впоследствии сформируют повышенную боковую нагрузку. То есть, целесообразно разгрузить приконтурные породы бермы опять-таки с помощью введения переменной жесткости в конструкцию охранной системы.

Со стороны нетронутого массива локальные области опасных концентраций образуются только в приконтурных породах непосредственной почвы по высоте ее подрывки. И здесь существует перспектива роста боковой нагрузки на стойки рамной крепи.

Указанные предположения подтверждаются расчетом поля  $\sigma$  в близлежащем массиве на участке стабилизации проявлений горного давления после прохода лавы (см. рис. 2.9). Действительно, происходит расширение зон опорного давления с увеличением концентраций  $\sigma$  уровня 30 – 49 МПа. Так, со стороны нетронутого массива отмеченная концентрация  $\sigma$  распространяется по всей высоте подрывки почвы и ниже опор стоек рамы и в бока на расстояние до 0,8 – 1,0 м. Здесь однозначно будет происходить разрушение даже необводненной породы с образованием повышенной боковой нагрузки на стойки рамной крепи. В породах непосредственной кровли и почвы в районе размещения охранной системы указанные выше разрушающие концентрации  $\sigma$  многократно расширяют область своего действия. Например, в кровле ширина зоны разупрочнения достигает 2,0 – 2,2 м, а высота – 1,2 – 1,4 м. Разупрочненная порода частично «обгрызает» охранную систему, проникая в имеющиеся полости и пустоты. Реакция на породные слои основной кровли снижается, а при их опускании усиливается горное давление на крепежную систему. В породах непосредственной почвы по всей высоте бермы на ширину до 1,8 – 2,0 м происходит ее разрушение с перемещением в полость выработки и деформированием стоек рам.

## 2.5 Анализ характера проявления напряжений в элементах базовой охранной и крепежной системах позади лавы

После прохода лавы и возведения охранной системы поле распределения интенсивности напряжений отчасти меняется по сравнению с участком опорного давления впереди лавы, сохраняя общие черты (рис. 2.10).

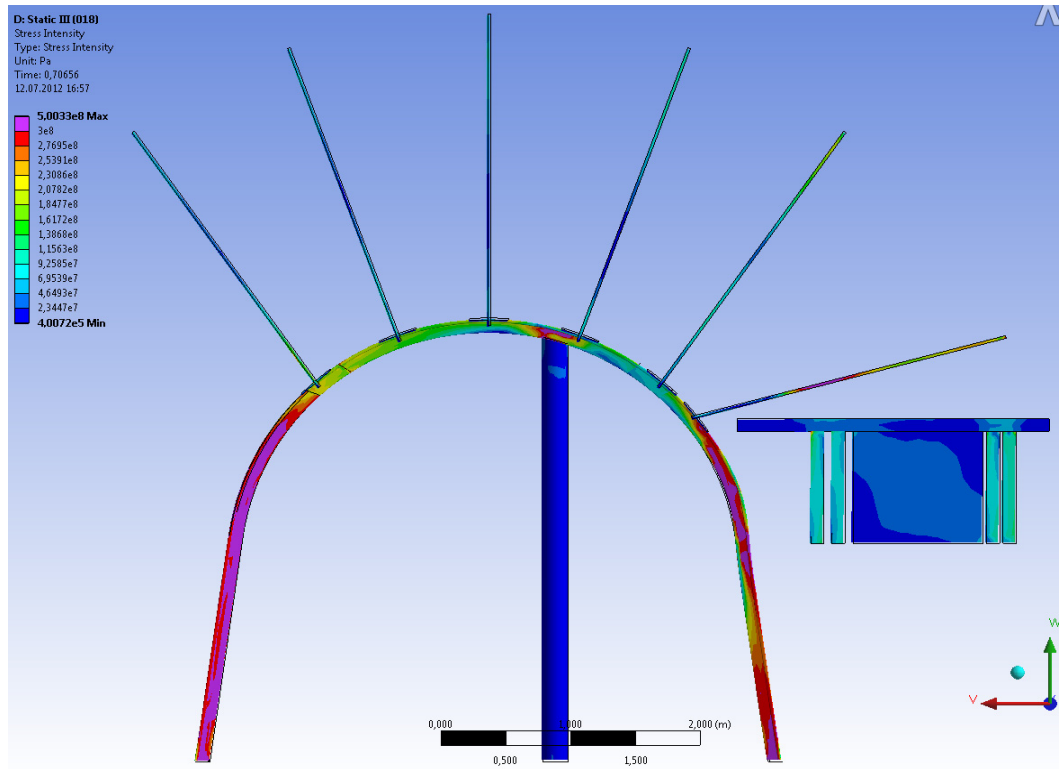


Рисунок 2.10 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  в базовой крепежной и охранной системах в начальный период ее сопротивления

Верхняя рама остается наименее нагруженной с образованием пластического контакта со стойкой крепи усиления. Относительная равномерность распределения  $\sigma$  в стойках рамы нарушается появлением деформаций изгиба:

- со стороны нетронутого массива изгиб стоек рамы менее интенсивен и направлен в полость выработки в центральной части, а в опоре стойки – в сторону массива;

- со стороны выработанного пространства происходит более активный изгиб стойки рамы с регулярным изменением знака кривизны: в полость выра-



ботки на уровне извлеченного угольного пласта; в сторону массива по высоте бермы и в районе опоры стойки.

Напряжения  $\sigma$  в центральной стойке крепи усиления достаточно равномерны и остаются на прежнем уровне ( $\sigma = 20 - 40$  МПа) по сравнению с зоной опорного давления впереди лавы.

Среди анкеров наиболее загруженным является дополнительный анкер, устанавливаемый в кровле над охранной конструкцией; в его арматуре интенсивность напряжения превышает предел текучести  $\sigma_T$  стали на срединном участке длины, а на заглубленном участке приближаются или равны  $\sigma_T$ . Это объясняется высокой интенсивностью напряжений и перемещений в области опорного давления над охранной конструкцией.

Остальные анкера находятся в упругом состоянии. Наиболее нагруженными являются периферийные анкера, где на заглубленных участках и ближних к контуру выработки, величина  $\sigma$  приближается к пределу текучести стали арматуры. Такая особенность распределения  $\sigma$  по длине анкеров соответствует сложившимся представлениям о механизме работы сталеполлимерных анкеров и указывает на процесс их смещения в полость выработки совместно с упрочняемыми породами непосредственной кровли, которые расслаиваются более интенсивно в приконтурной части выработки и менее интенсивно – в заглубленной части длины анкеров. Также следует, что активные смещения пород кровли выходят за пределы длины анкеров в 2,4 м: состояние кровли со стороны лавы (особенно, над охранной конструкцией) требует не только более густой сетки армирования, но и его более глубокого распространения.

Один из вариантов технологического решения данной проблемы – установка канатных анкеров, которые могут выполнять функцию более глубокого упрочнения пород кровли, ограничивая ее расслоение. Если разместить два канатных анкера (с шагом  $L = 1,6 - 2,0$  м) в поперечном сечении симметрично по 0,8 – 1,0 м от вертикальной оси выработки под углом  $70 - 80^\circ$  к горизонтали, то они упрочняют объем кровли на ширину до 7,5 – 8,0 м. Данной ширины зоны упрочнения недостаточно для полного перекрытия области опорного давления над охранной

конструкцией, но повышенная устойчивость породных консолей этого и не требует по причине ограничения размеров зоны предельного состояния.

В охранной конструкции в достаточно устойчивом состоянии при небольшом смятии древесины находится только накатный костер и брусья перекрытия. Все деревянные стойки испытывают напряжения  $\sigma$ , в 1,5 – 3 раза превышающие их сопротивление сжатию. По этой причине они активно деформируются, а процесс вдавливания в породы почвы и кровли определенным образом предохраняет стойки от полного разрушения.

При дальнейшей эксплуатации выработки в зоне стабилизации проявлений горного давления наблюдается ряд изменений в поле интенсивности напряжений  $\sigma$  (рис. 2.11) с общей тенденцией некоторого усиления нагруженности крепежной и охранной систем. Это касается следующих грузонесущих элементов. В стойке рамы со стороны выработанного пространства на высоте до 0,7 м от почвы увеличиваются до 10 – 15% напряжения  $\sigma$  и соответствующие размеры области однозначных пластических деформаций ( $\sigma \geq 300$  МПа). Наиболее существенно растет нагрузка на центральную стойку крепи усиления, которая практически по всему своему объему находится в предельном или близком к нему состояниях. Также значительно увеличиваются  $\sigma$  в двух периферийных анкерах опорно-анкерной крепи и, особенно в дополнительном анкере со стороны выработанного пространства. Это еще раз подчеркивает целесообразность усиленного упрочнения объема пород кровли над охранной системой, подвижки которого происходят достаточно длительный период. На это указывает также рост нагрузки во всех элементах охранной конструкции:

– в накатанном костре напряжения  $\sigma$  практически по всему объему близки или равны сопротивлению сосны сжатию, а в угловых частях заметно превышают его; однако, за счет смятия древесины, низкого отношения высоты костра к остальным его размерам (меньше единицы), вдавливания в породы почвы и кровли накатный костер продолжает выполнять функции опорной части охранной системы, но при этом уменьшается ее высота и, как следствие, – высота выемочной выработки;

– во всех деревянных стойках и без того высокие напряжения  $\sigma$  увеличиваются на 10 – 20% и способны их разрушить, несмотря на действие других факторов.

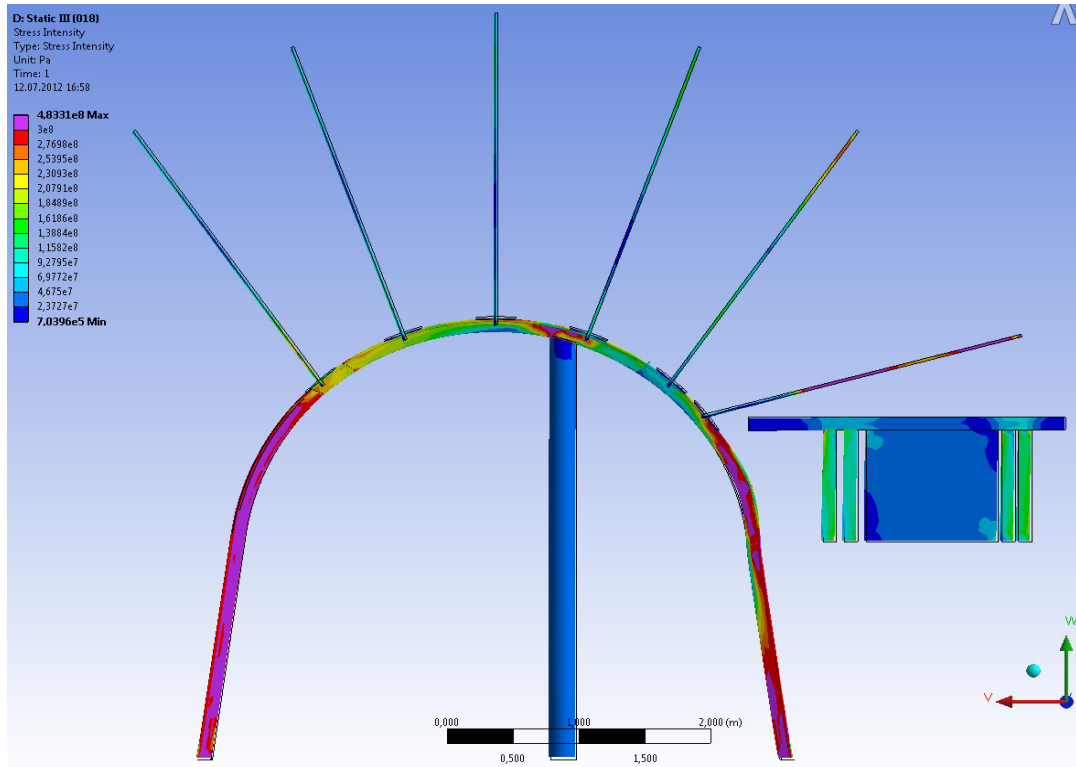


Рисунок 2.11 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  в базовой крепежной и охранной системах в зоне стабилизации проявлений горного давления

Таким образом, установлена тенденция длительного развития опускания пород кровли со стороны выработанного пространства, следствием которой является рост нагруженности охранной системы, пород бермы и стоек рамы, а также центральных стоек крепи усиления и анкеров со стороны выработанного пространства. Остальные грузонесущие элементы крепежной системы (центральные анкера в своде, верхняк рамы и ее стойка со стороны нетронутого массива) практически не меняют свое напряженное состояние спустя длительный период после прохода лавы.

## 2.6 Методика шахтных исследований работы комбинированной анкерной системы

Оценка состояния выработок проводится по показателям проявлений горного давления в виде перемещений контура выемочного штреков на ключевых участках поперченного сечения. В направлении кровля – почва и боков выработки, изменение высоты штрека в зоне прохода людей, диагональ от угла в почве выработки до верхнего торца стойки рамы в противоположном борту штрека, высота от нижней кромки угольного пласта до почвы выработки, степень срабатывания замков податливости рамы. Производится визуальная оценка изменения геометрии верхняка рамы (его выполаживание или перегиб в месте установки стойки крепи усиления) и ее стоек в виде сближения их «ножек», кручения профиля СВП или изгиба прямолинейной части стоек в полость выработки.

Для конкретизации измерений текущих размеров штрека приведена соответствующая схема на рис. 2.12. Во времени и пространстве фиксация размеров выработок производится дифференцированно. На участке вне зоны влияния очистных работ (не менее чем за 60 – 80 м до очистного забоя) замеры производятся один раз в 3 – 4 сут. На участке действия фронтального опорного давления впереди лавы, в районе ее «окна» и позади лавы на расстояние не менее 60 – 80 м съём показаний производится один раз в сутки; далее на участке стабилизации проявлений горного давления замеры производятся один раз в 3 – 4 сут.

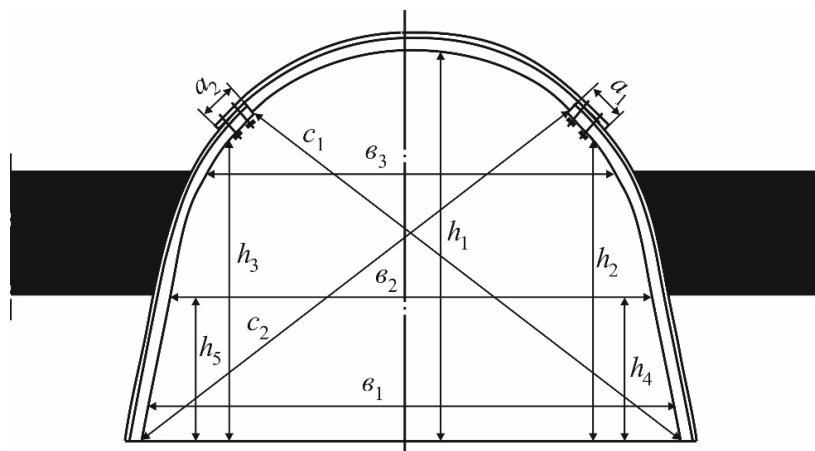


Рисунок 2.12 – Схема замеров размеров выемочных выработок по мере подвигания очистного забоя

Такая методика позволяла более точно отразить разную интенсивность развития перемещений контура выработки в период прохождения очистного забоя сечения штрека, в месте расположения замерной станции.

Для полноты представления об эпюре перемещений породного контура выемочных штреков и особенностях деформирования рамной крепи по ее контуру размещено достаточное количество замерных точек. Так, высота  $h_1$  выработки от замка свода до почвы и ее ширина  $b_1$  (вблизи почвы) дает общие сведения о потере сечения при сравнении с проектными размерами штреков. Не менее важны параметры  $b_2$  и  $b_3$  не только для оценки потери сечения штрека, но и для учета сближения его боков в зоне прохода людей; кроме того, сравнение величин изменения параметров  $b_{1,2,3}$  дает возможность выявить участки наибольших деформаций стоек рам, которые соответствуют областям повышенного горного давления в боках выработки.

Измерение высоты  $h_{2,3}$  штрека в рабочем и нерабочем бортах дает возможность оценить сразу две позиции: сближение кровли и почвы в зоне прохода людей с уточнением остаточной высоты выработки в этом месте, а также степень асимметрии деформирования рамы в разных боках штрека.

Уточнение уровня неравномерности деформирования рамы производится по двум параметрам  $c_{1,2}$ , которые измеряют диагональ от угла штрека до верхнего торца стойки рамы в противоположном борту выработки. Если изначально одинаковые величины  $c_1$  и  $c_2$  изменяются по-разному, то это свидетельствует о неравномерности нагружения рамы. В дополнение к указанным параметрам оценки асимметрии нагружения фиксируется величина нахлеста  $a_{1,2}$  верхняка и стойки в замках податливости рамы. При  $a_1 \neq a_2$  происходит концентрация нагрузки со стороны большей величины нахлеста. Кроме того, по значениям  $a_{1,2}$  оценивается работа рамной крепи в режиме податливости: насколько произошло срабатывание замка, и исчерпалась ли его конструктивная податливость. При этом визуально оценивается качество соединения верхняка и рамы и возможные нарушения самого замка податливости. Остались еще два размера  $h_{4,5}$ , опреде-

ляющие расстояние от нижней кромки пласта до почвы выработки. Эти размеры косвенно отмечают величину пучения пород почвы штрека с определенной погрешностью, обусловленной деформацией краевой части пласта под воздействием опорного давления.

В целом, на наш взгляд, описанные измерения позволяют достаточно полно отразить реальные проявления горного давления в выемочных штреках, что обеспечивает объективность сравнительного анализа различных схем установки анкеров в кровле выработок. Результаты измерений представляются в виде графиков изменения того или иного размера в зависимости от расстояния  $z$  до очистного забоя. Таким образом, прослеживается динамика нарастания смещений контура выработки с охватом всех наиболее характерных участков ее поддержания.

## **Выводы к разделу 2**

В целом, по результатам исследований эффективности применяемой охранной и крепежной систем сформулированы следующие выводы:

1. Наибольшую опасность устойчивости крепежной системе несут стойки рамы, особенно, со стороны выработанного пространства они пластически деформируются по всей длине; верхняк рамы выполаживается с изгибом в полость выработки в центральной части и появлением предельного состояния ( $\sigma = 260 - 290$  МПа) в верхней части СВП, а в области контакта с центральной стойкой крепи усиления пластические деформации развиваются еще более интенсивно ( $\sigma \geq 290$  МПа); среди анкеров наиболее загруженным является дополнительный анкер, размещенный в кровле выработки над охранной полосой и отчасти периферийные анкера, а центральные анкера в своде выработки не догружены; центральные стойки крепи усиления (деревянные) по всему своему объему находятся в предельном состоянии, а на контакте с верхняком рамы – в предельном состоянии.

2. Особенность распределения  $\sigma$  по длине анкеров соответствует сложившимся представлениям о механизме работы сталеполлимерных анкеров и

указывает на процесс их смещения в полость выработки совместно с упрочняемыми породами кровли, которые расслаиваются более интенсивно в приконтурной части выработки и менее интенсивно – в заглубленной части длины анкеров. Также следует, что активные смещения пород кровли выходят за пределы длины анкеров в 2,4 м: состояние кровли со стороны лавы (особенно, над охранной конструкцией) требует не только более густой сетки армирования, но и его более глубокого распространения. Один из вариантов технологического решения данной проблемы – установка канатных анкеров, которые одновременно могут выполнять функцию более глубокого упрочнения пород кровли, ограничивая ее расслоение. Так, если разместить два канатных анкера (с шагом  $L = 1,6 - 2,0$  м, то есть, через две рамы по длине выработки) в поперечном сечении симметрично по  $0,8 - 1,0$  м от вертикальной оси выработки под углом  $70 - 80^\circ$  к горизонтали, то они упрочняют объем кровли на ширину до  $7,5 - 8,0$  м, что достаточно для повышения устойчивости породных консолей и ограничения размеров зоны предельного состояния пород.

### Раздел 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ АНКЕРНОЙ СИСТЕМЫ В КРОВЛЕ ВЫРАБОТКИ

### 3.1 Напряженное состояние вмещающих пород при устойчивом проявлении горного давления

Проведенные многовариантные вычислительные эксперименты достаточно обширны, что не позволяет поместить все полученные эпюры в рамки настоящей работы. Поэтому выбран один из вариантов комбинированных анкерных систем (два сталеполимерных анкера в центральной части свода и два канатных анкера в его периферийной части), который сравнивается с традиционной схемой поддержания выемочного штрека, например, для условий отработки пласта  $C_6$ .

Для данного варианта изложены результаты сравнительного анализа по распределению трех основных компонент напряжений (вертикальных  $\sigma_y$ , горизонтальных  $\sigma_x$  и интенсивности напряжений  $\sigma$ ) в массиве и крепежной системе; но, во главу угла положены особенности эпюры распределения интенсивности напряжений  $\sigma$ , как обобщающей характеристики напряженного состояния любого горнотехнического объекта.

Анализ эпюры интенсивности напряжений (рис. 3.1) в окружающем выработку массиве при использовании комбинированной анкерной системы взамен базовой показал ряд изменений в состоянии близлежащих пород.

В кровле выемочного штрека образуется зона разгрузки  $\sigma$ , отличающаяся от таковой для базовой схемы крепления по своей форме и размерам. Во-первых, разгрузка практически не затрагивает породы непосредственной кровли. Со стороны выработанного пространства образуется локальная область с величиной  $\sigma$ , соответствующей состоянию нетронутого массива.



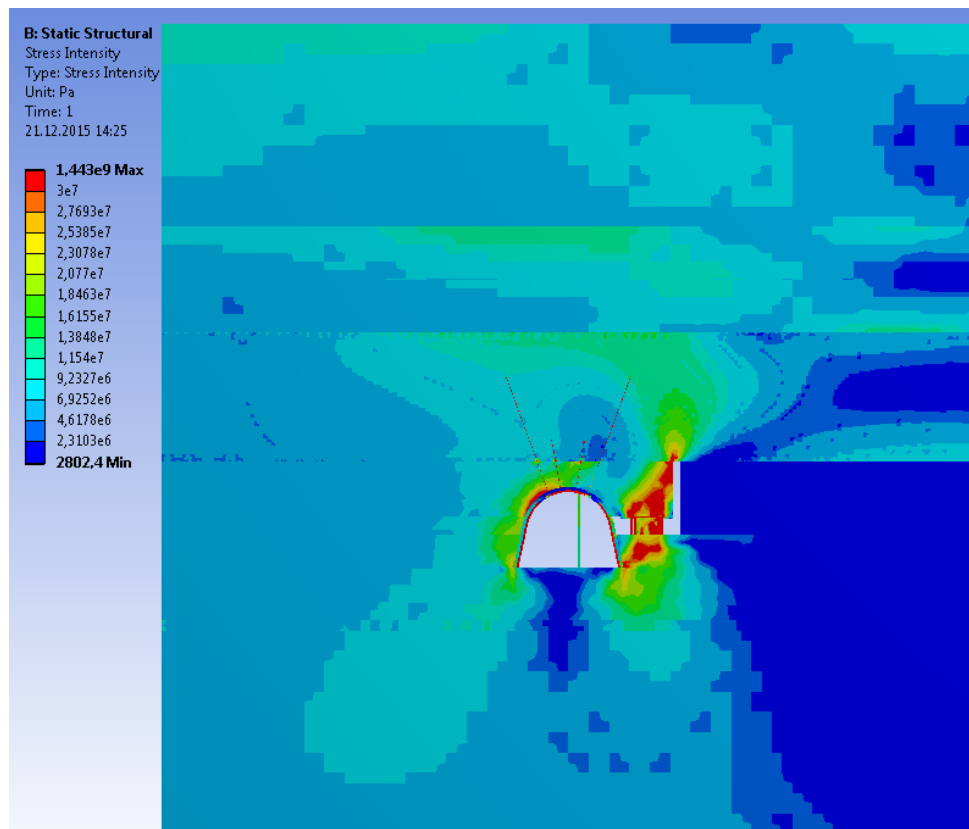


Рисунок 3.1 – Эпюра распределения интенсивности напряжений  $\sigma$  в породном массиве при комбинированных анкерных системах

Над центральной частью свода в породах возникает область с концентрацией  $\sigma$  уровня 1,6 – 2,0 от начального состояния нетронутого массива. По абсолютной величине эта концентрация  $\sigma$  не представляет опасности, так как в 3,0 – 3,8 раза ниже сопротивления сжатию песчаника непосредственной кровли. На данный факт необходимо обратить внимание по следующей причине. Обычно, в том числе и в базовой схеме крепления, в непосредственной кровле над выработкой образуется зона разгрузки, где пониженные  $\sigma$  характеризуют прогиб породного слоя в выработку с соответствующими его горизонтальными подвижками. Если породный слой целостный, то его горизонтальные подвижки не снижают сопротивления вертикальному горному давлению. Как правило, непосредственная кровля разбита трещинами разрыва на породные блоки и если породные блоки выйдут из контакта друг с другом, то при их прогибе распорной конструкции не образуется, а породные блоки обрушаются на рамную

крепь [11, 15, 68, 88]. При наличии горизонтального распора породные блоки сопротивляются вертикальному горному давлению, а именно небольшая концентрация  $\sigma$  указывает на повышенный горизонтальный распор породных блоков. Описанное состояние непосредственной кровли сформировалось благодаря ее соединению с основной кровлей посредством канатных анкеров, – образуется весьма мощная армопородная плита высокой несущей способности.

Во-вторых, характер распределения  $\sigma$  в первом слое основной кровли (представленном мощным алевролитом) указывает на возможность частично независимого прогиба основной и непосредственной кровли с некоторыми горизонтальными подвижками относительно друг друга благодаря ограниченной податливости каната за счет его удлинения при растяжении. Возможность горизонтальных перемещений относительно друг друга слоев непосредственной и основной кровли способствует появлению в последней локальной области разгрузки размерами в плоскости сечения  $0,7 \times 1,0$  м. Уровень разгрузки составляет  $0,4 - 0,8$  от величины начального состояния нетронутого массива. Это указывает на сохранение части горизонтального распора в пределах этой локальной области, выше которой состояние алевролита переходит в исходное начальное. На половине мощности породного слоя основной кровли действует концентрация  $\sigma$  уровня  $1,2 - 2,0$ . Данная концентрация характеризует действие распорных усилий при сопротивлении прогибу нижнего слоя основной кровли, а абсолютные значения  $\sigma$  в  $1,75 - 2,91$  раза ниже сопротивления сжатию алевролита.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: абсолютной жесткости армопородной плиты из основной и непосредственной кровли добиться не удалось. Но этого и не требуется по причине их совместного и активного сопротивления горному давлению в пределах напряжений  $\sigma$ , весьма далеких от разрушающих значений. В то же время, в базовой схеме крепления зона разгрузки проходит через всю мощность непосредственной кровли с весьма вероятным ее обрушением.

Негативным обстоятельством является появление участка разупрочненных

пород на глубину до 0,15 – 0,20 м в приконтурной области со стороны нетронутого массива. Однако, это не может существенно повлиять на сопротивление непосредственной кровли горному давлению. Концентрация  $\sigma$  лишней раз подчеркивает активное вовлечение пород непосредственной кровли в противодействие процессам сдвижения надугольной толщи.

В прилегающих боковых породах со стороны нетронутого массива наблюдается еще одна особенность в распределении интенсивности напряжений – пониженные  $\sigma$  в сравнении с базовым вариантом крепления. Так, концентрация  $\sigma$  составляет 1,6 – 2,0 на ширину в массив до 2,1 м, которая многократно меньше сопротивления сжатию, как пород непосредственной кровли, так и угольного пласта; в слабых породах непосредственной почвы такая концентрация вызывает их разупрочнение и способствует интенсификации процесса пучения.

Если сравнивать боковое опорное давление при использовании комбинированной анкерной системы, то оно в 2 – 3 раза ниже по отношению к базовому варианту крепления. Очевидно, это происходит потому, что сформированная армопородная плита в кровле имеет повышенную площадь опоры на боковые породы; тогда их напряженность снижается. Более высокие концентрации  $\sigma$  наблюдаются только в приконтурных породах на ширину до 0,3 – 0,7 м, но ни для пород непосредственной кровли, ни для угольного пласта они не представляют опасности в плане разупрочнения.

Со стороны выработанного пространства над и под охранной конструкцией формируются высокие концентрации напряжений что обусловлено относительно небольшой площадью опоры в виде охранной системы, которая провоцирует разупрочнение определенных объемов пород непосредственной кровли и почвы.

Повышенная крепость пород непосредственной кровли ограничивает область разупрочнения. На контакте с охранной конструкцией разупрочнение прогнозируется по всей ее ширине, а на границе с основной кровлей ширина разупрочнения пород не превышает 0,3 м. В породах непосредственной почвы глубина разупрочнения достигает 6,5 м при ширине до 3,1 м, что, безусловно,

генерирует активное сдвижение пород почвы пласта в полость выработки.

Из приведенных сведений следует, что для повышения жесткости опоры со стороны выработанного пространства необходимо ограничение области разупрочнения над и под охранной конструкцией. Но, это представляет уже другую, отдельную задачу, которая рассмотрена в работе [77]. Здесь же отметим, что по ширине влияния канатного анкера (со стороны выработанного пространства) в примыкающих к выработке породах непосредственной кровли концентрация напряжений не разрушающаяся, как и в нижнем слое основной кровли. Прогнозируется целостность армопородной плиты, формируемой комбинированной анкерной системой. Следовательно, эта плита будет активно противодействовать вертикальному горному давлению.

В слабых породах почвы выемочной выработки по ее ширине образуется зона разгрузки, распространяющаяся по глубине до 5,5 м. В угловых частях выработки действуют разрушающие напряжения в обширных областях пород почвы. Данные области будут способствовать перемещению пород в зону разгрузки и далее в выработку. Поэтому можно прогнозировать достаточно интенсивное пучение пород почвы штрека. Здесь влияние комбинированной анкерной системы прослеживается в меньшей степени. Основным фактором пучения является весьма низкая крепость пород почвы. Тем не менее, размеры областей разупрочнения в почве заметно ниже, чем при базовом варианте крепления и главной причиной тому является не интенсивное опорное давление в боках выемочной выработки.

Подводя итоги особенностям распределения интенсивности напряжений в близлежащем породном массиве, следует отметить позитивное влияние комбинированной анкерной системы на состояние пород кровли, где формируется армопородная плита достаточно высокой устойчивости. Под ее защитой прогнозируется удовлетворительное состояние выемочной выработки.

Позитивные особенности, подчеркивающие процесс формирования армопородной плиты в кровле с помощью комбинированной анкерной системы, достаточно четко проявляются на эпюре горизонтальных напряжений  $\sigma_x$

(рис. 3.2). Область их концентраций распространяется по всей ширине свода и мощности непосредственной кровли. Величина  $\sigma_x \leq 18 - 25$  МПа и высока в сравнении с исходным состоянием нетронутого массива (коэффициент концентрации  $k_x = 5,2 - 7,3$ ). Разупрочнения пород непосредственной кровли это не вызывает. Повышенные горизонтальные сжимающие напряжения действуют по всей мощности слоя, создавая такой распор в породных блоках непосредственной кровли, который не допускает существенных ее прогибов в полость выработки. В боковых частях (по отношению к выработке) непосредственной кровли также имеет место относительно неоднородное поле распределения сжимающих  $\sigma_x$  по ее мощности, – здесь, опять-таки, происходит распор породных блоков. В результате распорная блочная система в непосредственной кровле не только устойчива, но и активно сопротивляется нагрузке со стороны основной кровли.

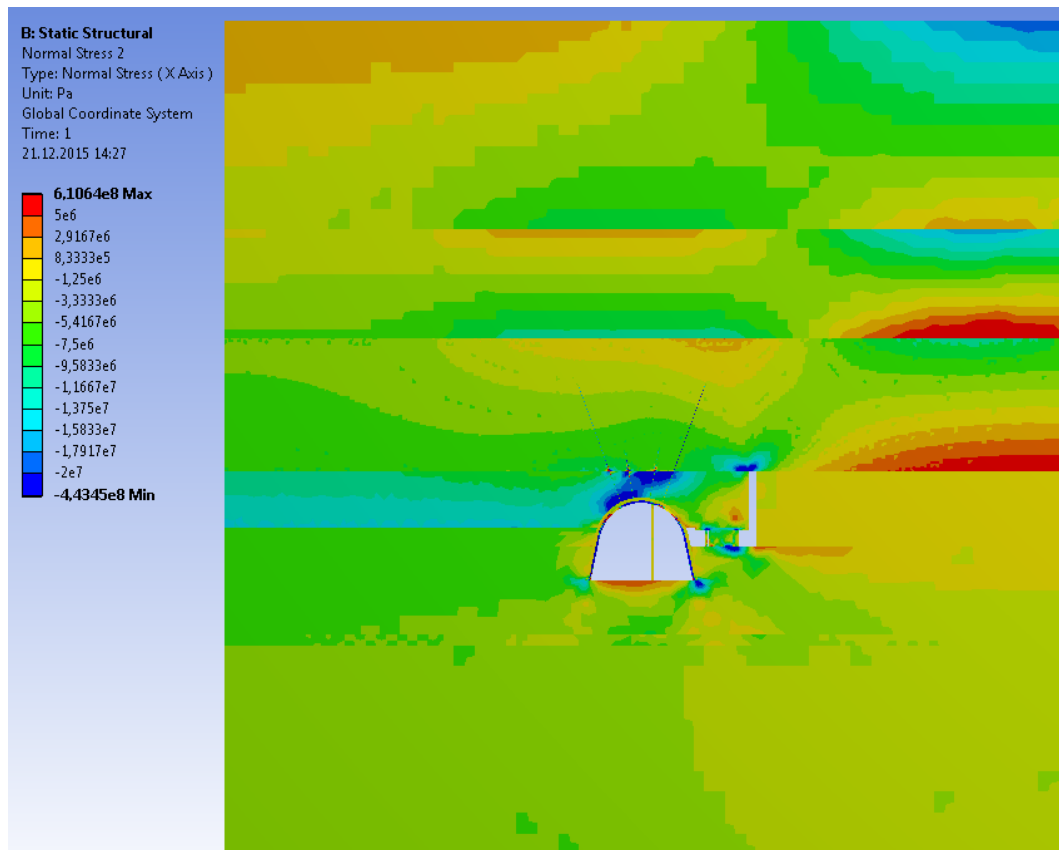


Рисунок 3.2 – Эпюра распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  в породном массиве при комбинированных анкерных системах

В породных слоях основной кровли наблюдается изгиб по мощности каждого литотипа. Со стороны выработанного пространства изменение знака кривизны слоев фиксирует направление поверхности полных сдвижений (опускание блоков основной кровли на обрушенные породы непосредственной) в соответствии с существующими представлениями о процессах сдвижения надугольной толщи при очистной выемке [29, 86 – 89]. Начало этой поверхности находится за пределами ширины охранной системы и удалено в сторону выработанного пространства на расстояние 2,5 – 3,0 м. В данной области прослеживается изгиб породных слоев основной кровли с появлением небольших растягивающих  $\sigma_x$  до 1,0 – 2,5 МПа в верхней части каждого слоя. Растяжения ограничено и составляет 5 – 10% от мощности слоев.

Следовательно, вероятность развития трещин разрыва в слоях основной кровли также ограничена. По остальной мощности слоев действуют сжимающие напряжения, обеспечивающие их устойчивое состояние за счет распора. В большей части областей основной кровли напряжение изменяется в диапазоне, близком к начальному состоянию нетронутого массива, и меньшем величин сопротивления литотипов сжатию.

Таким образом, по фактору распределения компоненты  $\sigma_x$  в породах кровли прогнозируется их устойчивое состояние; особенно это касается непосредственной кровли, где комбинированная анкерная система создает высокие усилия распора между породными блоками, связывает их с породами основной кровли и обеспечивает, тем самым, достаточное сопротивление вертикальному горному давлению.

Образованная армопородная плита в кровле имеет расширенную площадь опоры на породы в боках выработки. Об этом свидетельствует практически однородное поле напряжений  $\sigma_x$  за исключением локальных участков приконтурных пород на ширину до 0,8 м. В базовом варианте аномалии горизонтальных напряжений распространяются на 4,0 – 4,5 м в боку выработки.

Со стороны выработанного пространства в породах непосредственной почвы (по глубине нижней подрывки штрека) возмущения горизонтальных напряжений не столь развиты, как в базовом варианте крепления и в большей части данной области имеют небольшие отклонения от начального состояния нетронутого массива. Здесь можно предположить пониженное боковое опорное давление за счет того, что опускающиеся в выработанное пространство породные блоки основной кровли имеют определенный распор с породными слоями над выработкой и за счет него сохраняют часть несущей способности по противодействию вертикальному горному давлению.

В области пород почвы непосредственно под выработкой аномалии напряжений также не столь велики, но имеется область растяжения глубиной до 0,6 м, где происходит расслоение и перемещение пород в выработку.

По результатам анализа поля распределения горизонтальных напряжений можно подтвердить ранее сделанный вывод о том, что комбинированная анкерная система способствует созданию достаточных усилий распора для сохранения устойчивости непосредственной кровли, с одной стороны, а, с другой, – объединяя непосредственную кровлю с основной, создает армопородную плиту высокой несущей способности.

В заключение анализа НДС близлежащего породного массива рассмотрим особенности распределения вертикальных напряжений  $\sigma_y$ , эпюра которых приведена на рис. 3.3.

В кровле штрека зона разгрузки от вертикальных напряжений  $\sigma_y$  существенно отличается от базовой схемы крепления в сторону снижения размеров зоны и степени разгрузки:

– разгрузка уровня  $k_y = 0,47 - 0,83$  распространяется в кровлю всего до 1,8 м против 4,3 м в базовой схеме крепления;

– более глубокая степень разгрузки ( $k_y = 0,10 - 0,47$ ) имеет место в приконтурных породах на высоту до 0,6 м и шириной до 1,9 м. В базовой схеме крепления эти размеры составляют 2,0 и 3,5 м соответственно. Это указывает

на распространение весьма глубокой разгрузки по всей мощности непосредственной кровли и по большей части ширины свода выработки;

– полной разгрузки ( $\sigma_y = 0$ ) с появлением растягивающих вертикальных напряжений практически не наблюдается в отличие от базовой схемы крепления.

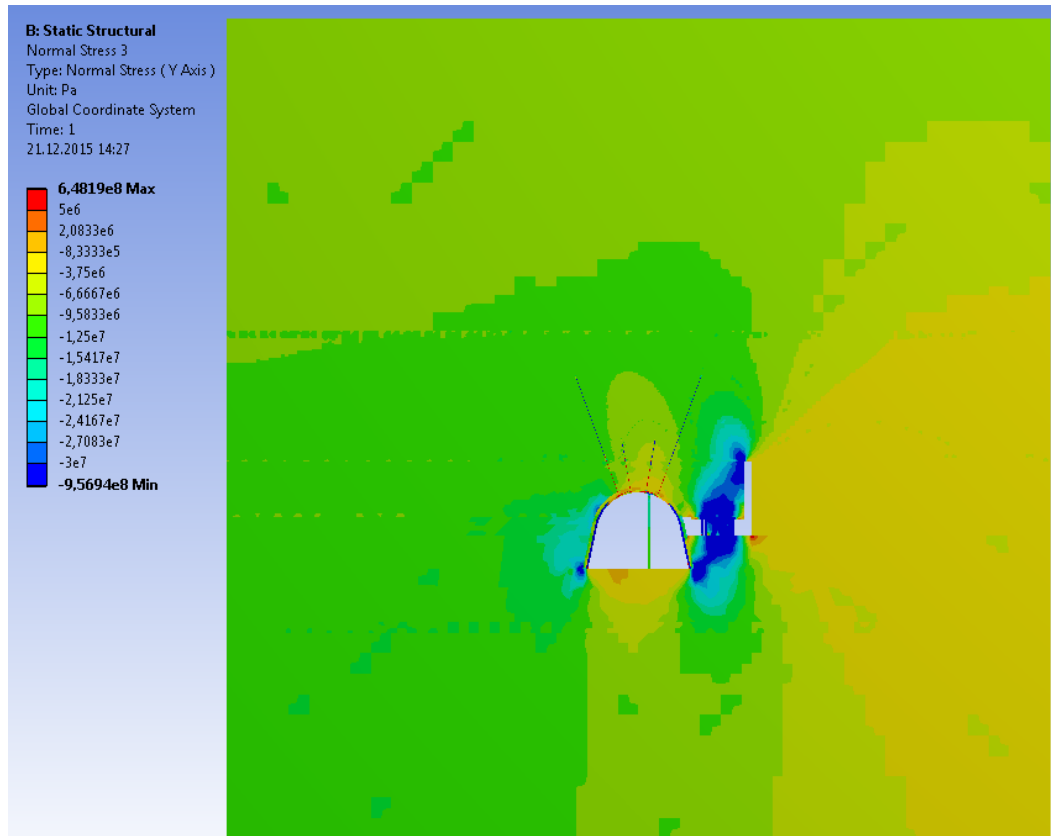


Рисунок 3.3 – Эпюра распределения вертикальных напряжений  $\sigma_y$  в породном массиве при комбинированных анкерных системах

Приведенные данные свидетельствуют об отсутствии свода предельного равновесия, который образуется при расслоении пород кровли за счет действия растягивающих напряжений. Это обусловлено формированием (с помощью канатных анкеров) мощной армопородной плиты, не допускающей значительных прогибов над выработкой, а локальные расслоения в центральной части свода предупреждают два сталеполимерных анкера.

Другой особенностью является маловыраженная зона опорного давления со стороны нетронутого массива. Здесь наблюдается концентрация сжимающих



( $k_y = 1,2 - 1,9 \mathcal{H}$ ) и лишь в локальных областях приконтурных пород на ширину 0,2 – 0,5 м действуют повышенные концентрации уровня ( $k_y = 3,0 - 4,2 \mathcal{H}$ ). Такое поведение пород в боку выработки объясняется повышенной площадью опоры армопородной плиты в кровле, распределяющей вертикальную нагрузку более равномерно. Со стороны выработанного пространства действует высокая концентрация ( $k_y = 3,0 - 4,2 \mathcal{H}$ ) над и под охранной конструкцией, но эта область распространяется по высоте в кровлю в 1,7 раза и по глубине в почву в 2,1 раза меньше, чем при базовой схеме крепления.

Главная причина здесь видится в частичном сохранении распорных усилий между породными блоками над выработкой и со стороны выработанного пространства. Эти усилия позволяют создать противодействие вертикальной составляющей горного давления и распределить его по большей площади, в том числе, и в сторону выработанного пространства. Большая площадь его распределения снижает концентрацию.

В почве выработки зона разгрузки  $\sigma_y$  также меньше как по размерам, так и по величине в сравнении с базовой схемой крепления. Это обусловлено снижением параметров зон опорного давления в боках выработки.

Таким образом, анализ состояния углевмещающего массива вокруг выемочной выработки убедительно доказывает, что применение комбинированных анкерных систем позволяет более эффективно использовать несущую способность пород кровли за счет сохранения усилий распора между породными блоками и формирования армопородной плиты. Действуя по аналогии с «цепной реакцией» снижается интенсивность аномалий НДС в боках и почве выемочной выработки. Из этого следует вывод о позитивном влиянии комбинированных анкерных систем на устойчивость окружающего породного массива, что ограничивает проявления горного давления в выемочной выработке.

### 3.2 Напряженное состояние элементов крепежной системы выемочной выработки

Анализ поведения массива в окрестности выемочной выработки позволил предположить, что комбинированная анкерная система способствует созданию таких распорных усилий, которые позволяют рассматривать непосредственную кровлю и нижний слой основной как армопородную плиту, воспринимающую большую часть вертикального горного давления и защищающую, тем самым, рамную крепь от чрезмерных нагрузок.

Следующий этап исследований состоит в комплексной оценке состояния всех крепежных элементов, руководствуясь эпюрами распределения вертикальных  $\sigma_y$ , горизонтальных  $\sigma_x$  напряжений и их интенсивности  $\sigma$ . В первую очередь рассмотрим поле интенсивности напряжений, поскольку этот параметр включает в себя определенную комбинацию всех компонент напряжений и является интегральным показателем состояния того или иного крепежного элемента. Эпюра интенсивности напряжений приведена на рис. 3.4.

Верхняя часть рамной крепи находится в разгруженном состоянии, которое весьма часто фиксируется при проведении вычислительных экспериментов для условий шахт Западного Донбасса. Однако, степень недогруженности верхняка при использовании комбинированной анкерной системы существенно отличается от таковой для базового варианта крепления, что рассмотрено более подробно. Периферийный участок верхняка в районе замков податливости характеризуется минимальной напряженностью ( $\sigma \leq 20 - 25$  МПа), что вполне объяснимо штатным режимом их работы. В базовом варианте крепления на концевом участке верхняка со стороны выработанного пространства величина интенсивности напряжений составляет уже 47 – 93 МПа, то есть, возрастает в несколько раз. Со стороны нетронутого массива концевой участок верхняка подвержен действию  $\sigma = 185 - 270$  МПа; верхняя граница этого диапазона уже соответствует расчетному пределу текучести стали Ст.5, из которой обычно изготавливается спецпрофиль СВП.

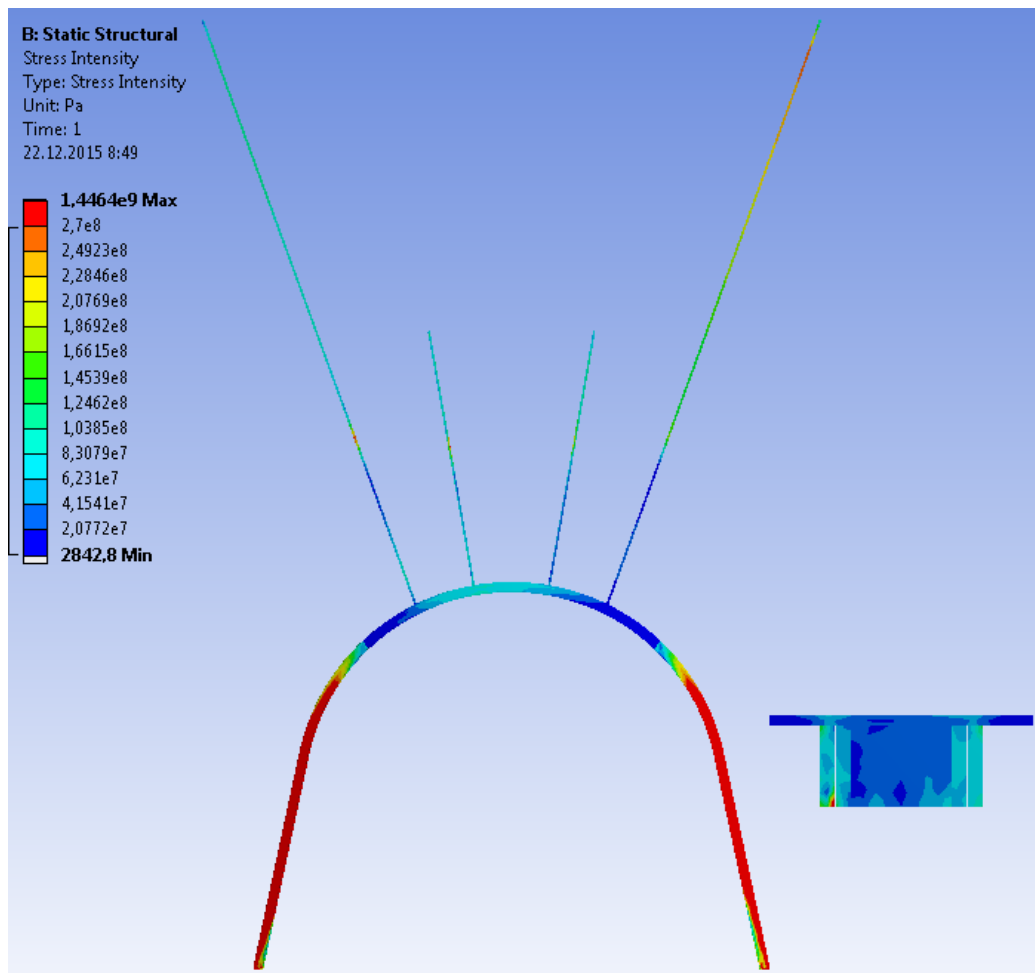


Рисунок 3.4 – Эпюра интенсивности напряжений  $\sigma$  в крепежных элементах выемочной выработки при использовании комбинированной анкерной системы

Такая высокая интенсивность напряжений свидетельствует о наступлении жесткого режима работы узла сопряжения верхняка и стойки по причине истощения вертикальной податливости рамы. Далее, при движении к центральной части свода (в базовом варианте крепления) интенсивность напряжений снижается до 70 – 185 МПа со стороны нетронутого массива и повышается со стороны выработанного пространства. В месте опоры верхняка на центральную (деревянную) стойку крепи усиления возникает область его пластического состояния протяженностью до 0,7 м. Таким образом, по длине верхняка базового варианта крепления наряду с участками разгрузки наблюдаются области его предельного состояния, где вероятен пластический изгиб верхняка с изменением его первоначальной формы.

чальной формы. Иная ситуация наблюдается в верхняке при установке комбинированной анкерной системы. Здесь происходит плавный рост интенсивности напряжений до 83 – 104 МПа в центральной части свода. Заметим, что эти значения существенно ниже, чем в базовом варианте крепления и составляет всего 31 – 39% от расчетного предела текучести стали СВП, т. е., состояние верхняка далеко от предельного на всей его длине. На наш взгляд, главная причина выявленных отличий в состоянии верхняка – это действие пониженной вертикальной нагрузки за счет формирования армопородной плиты (комбинированной анкерной системой) с надлежащими усилиями распора в непосредственной кровле и нижнем слое основной кровли.

В противоположность весомых отличий в состоянии верхняка рамы распределение  $\sigma$  в ее стойках достаточно схоже для обоих сравниваемых вариантов крепления. Основная черта этой схожести заключается в высокой загруженности (на уровне предельного состояния) стоек рам, но имеются и некоторые отличия в распределении интенсивности напряжений.

Во-первых, в стойке со стороны выработанного пространства интенсивность напряжений близка к расчетному пределу текучести стали СВП (92 – 98%), но не превосходит его; то есть, наблюдается состояние, близкое к предельному. По большей части длины стойки распределение интенсивности напряжений равномерное в ее поперечном сечении, что указывает на отсутствие сколь-нибудь существенного изгибающего момента. Исключение составляет нижняя часть стойки на высоту до 0,7 м от почвы, где происходит ее изгиб в полость выработки. В базовой крепежной системе таких участков изгиба стойки несколько, они имеют разное направление и расположены по всей высоте стойки от ее криволинейной части до опоры. Кроме того, величина интенсивности выше на 10 – 40%, так что по высоте стойка находится в предельном состоянии и требует усиления по противодействию боковому горному давлению.

Во-вторых, в стойке со стороны нетронутого массива интенсивность напряжений либо равна, либо превосходит расчетный предел текучести стали СВП. Интенсивность напряжений распределяется равномерно, а изгибающий

момент действует только в районе опоры стойки на высоту до 0,4 м от почвы. В базовом варианте крепления изгибающий момент переменного знака (хотя и пониженной величины) возникает по всей длине стойки, а величина  $\sigma$  увеличивается до 30%.

Таким образом, следует отметить повышенную нагрузку стоек рамы в базовом варианте крепления, что подтверждает тезис о снижении вертикальной нагрузки на рамную крепь при использовании комбинированной анкерной системы в кровле выработки.

Рассмотрим состояние анкеров в кровле выемочной выработки при базовой схеме крепления – пять сталеполимерных анкеров, установленных по контуру свода в пределах протяженности верхняка рамы, имеют разную степень нагрузки. В центральной части свода три анкера подвержены воздействию напряжений  $\sigma$  от 8 – 26% до 34 – 51% от расчетного предела текучести стали арматуры анкера. Два периферийных анкера нагружены в большей степени:

- в приконтурной части длины анкера до 0,4 м (со стороны нетронутого массива) действуют  $\sigma$  уровня 68 – 85% от его несущей способности. Это указывает на активное расслоение породного массива в области установки анкера, а остальная часть его длины нагружена в меньшей степени;

- периферийный анкер со стороны выработанного пространства, напротив, испытывает повышенную нагрузку (77 – 100% от предела текучести стали) на заглубленном участке длиной до 0,5 м. Это обусловлено сопротивлением анкера горизонтальным подвижкам породных блоков непосредственной кровли, опускающихся на охранную конструкцию, а остальная часть длины анкера также остается слабонагруженной.

Таким образом, в базовой схеме крепления отмечается повышенное сопротивление горному давлению только у периферийных анкеров, установленных в районе замков податливости рамы.

В комбинированной анкерной системе в своде выработки наблюдаются следующие особенности распределения интенсивности напряжений. Два сталеполимерных анкера, установленных в центральной части свода, преимущест-

венно нагружены на заглубленном участке своей длины, которая составляет порядка 52% для анкера со стороны выработанного пространства, а анкер со стороны нетронутого массива загружен по всей своей длине. Уровень напряжений на этих участках соответствует 31 – 77% от расчетного предела текучести стали анкера. Со стороны нетронутого массива присутствует ограниченный участок, где напряжения развиваются до 84 – 92% его несущей способности. Если сравнивать уровень сопротивления центральных сталеполимерных анкеров, то он заметно выше у комбинированной анкерной системы, что указывает на их более эффективную работу по созданию распорной конструкции из породных блоков в непосредственной кровле.

Установление канатных анкеров также активно противодействуют развитию горного давления, и это относится к участкам их длины, расположенных в нижнем слое основной кровли. Так, для канатного анкера со стороны нетронутого массива на участке до 75% его длины действует напряжения 60 – 90% от несущей способности. Для канатного анкера со стороны выработанного пространства длина участка активного сопротивления немного ниже (до 70%), но на его заглубленной части расширяется участок практически полной загрузки анкера – до 100% от несущей способности.

Здесь можно провести сравнение между интенсивной работой комбинированной анкерной системы и снижением аномалий НДС в породном массиве, особенно, в кровле выработки. Эти процессы, безусловно, взаимосвязаны и доказывают обоснованность применения комбинированных анкерных систем в кровле выемочных выработок.

Есть еще один косвенный довод в пользу комбинированных анкерных систем – степень нагруженности охранной конструкции выемочной выработки. Индивидуальные деревянные стойки на берме штрека и стойки рядов органной крепи нагружены в 1,5 – 1,7 раза меньше, чем в базовом варианте крепления. Это служит подтверждением ранее высказанному предположению о частичном сохранении распора между породными блоками над выработкой и блоками, которые опускаются на обрушенные породы в выработанном пространстве.

Такой частичный распор способствует восприятию некоторой доли вертикального горного давления породными блоками основной кровли, что снижает нагрузку на охранную конструкцию.

В развитие доказательной базы объективности целесообразности использования комбинированных анкерных систем рассмотрим особенности распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  (рис. 3.5) в крепежных элементах выемочной выработки.

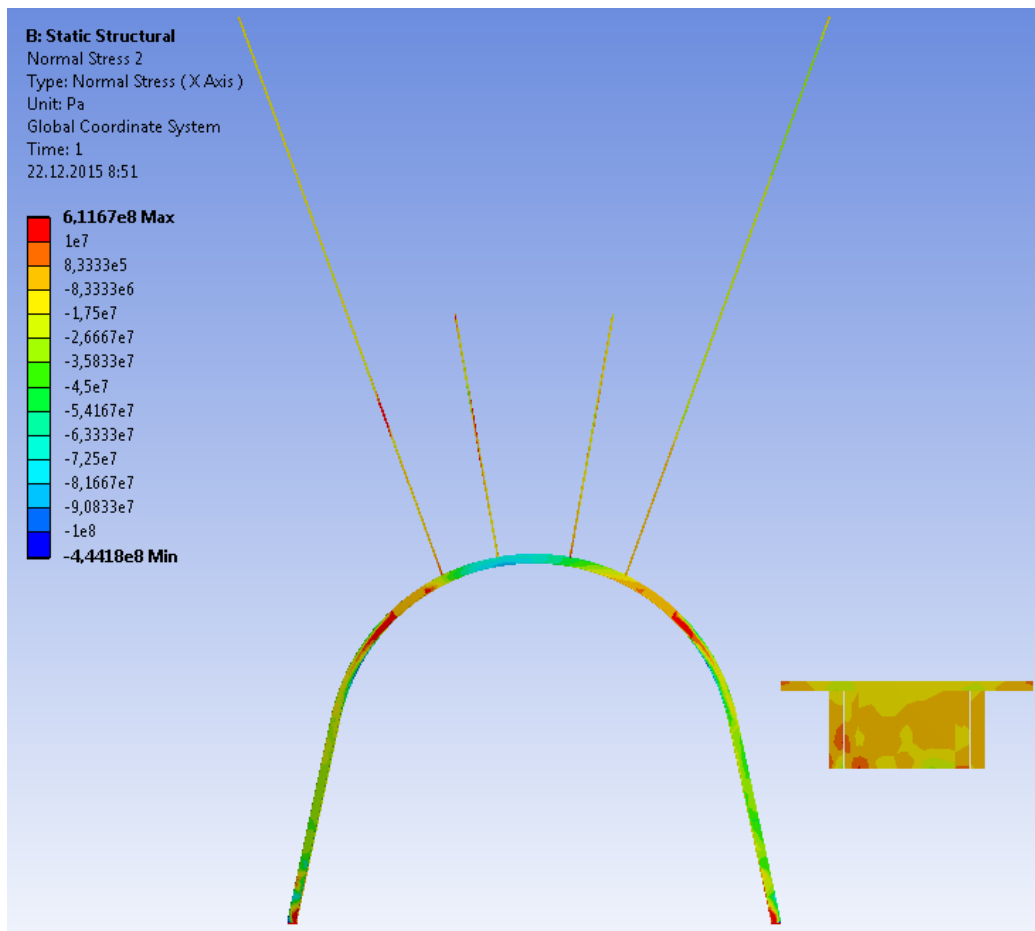


Рисунок 3.5 – Эпюра горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  в крепежных элементах выемочной выработки при использовании комбинированной анкерной системы

В верхняке рамы распределение  $\sigma_x$  наиболее информативное в плане выявления изгибающих моментов. В этой связи сразу же отметим, что на каж-

дом участке верхняка действуют разные горизонтальные напряжения, но в поперечном сечении СВП  $\sigma_x$  распределяются достаточно равномерно. Следовательно, можно зафиксировать отсутствие сколь-нибудь существенного изгибающего момента по длине верхняка. Это является одним из признаков пониженной вертикальной нагрузки, действующей на раму. По своей величине пониженные  $\sigma_x$  до 8 – 15 МПа распределены на периферийных участках верхняка, что свидетельствует о развитии небольших горизонтальных усилий в районе замков податливости и косвенно указывает на ограниченные горизонтальные подвижки непосредственной кровли по причине сопротивления комбинированной анкерной системы. В центральной части свода сжимающие  $\sigma_x$  увеличиваются от 25 – 35 МПа до 70 – 80 МПа в замке свода. Величины напряжений многократно ниже предельных для стали крепи из СВП, но, тем не менее, они характеризуют определенную нагрузку верхняка рамы, несмотря на создание грузонесущей армопородной плиты в кровле.

Если сравнивать приведенные данные с базовым вариантом крепления, то существенных отличий по величине сжимающих  $\sigma_x$  не наблюдается, однако, присутствуют два участка на полуарке со стороны выработанного пространства, где зафиксировано действие среднего по величине изгибающего момента разных знаков. Тем не менее, эти возмущения не играют решающей роли в наступлении предельного состояния верхняка рамы.

В стойках рамы действуют пониженные горизонтальные напряжения для обоих сравниваемых вариантов крепления выемочной выработки с отличиями, не вносящими существенный вклад в устойчивость рамной крепи; тем не менее, отметим основные из них.

Во-первых, в криволинейной части стойки со стороны нетронутого массива в базовом варианте крепления действуют сжимающие  $\sigma_x = 30 – 70$  МПа, а в рекомендуемом варианте – знакопеременные  $\sigma_x$  от 10 – 15 МПа растяжения около замка податливости и до 15 – 35 МПа сжатия внизу криволинейной части стойки. Эти результаты указывают на пониженное боковое давление (при



использовании комбинированной анкерной системы) по причине уменьшения концентраций опорного давления в боку выработки. В прямолинейной части стойки величина сжимающих напряжений оказалась несколько ниже в базовом варианте, чем в рекомендуемом варианте. Их абсолютное значение практически не влияет на устойчивость стойки.

Во-вторых, в стойке со стороны выработанного пространства эпюра распределения  $\sigma_x$  изменяется малосущественно (по сравнению с противоположной стойкой) для варианта применения комбинированной анкерной системы. Для базового варианта крепления в криволинейной части стойки происходит активное изменение знака кривизны ввиду действия знакопеременного изгибающего момента. Это происходит из-за высоких концентраций опорного давления в районе охранной конструкции, которые частично сглаживаются при использовании в кровле комбинированной анкерной системы.

Регулярная ссылка на эффективность работы комбинированной анкерной системы находит свое подтверждение при анализе распределения  $\sigma_x$  в сталеполлимерных и канатных анкерах. Для обоих типов анкеров, несмотря на их преимущественно вертикальное расположение, действуют небольшие растягивающие  $\sigma_x$  в пределах мощности непосредственной кровли, что указывает на ограничение ее горизонтальных подвижек с помощью комбинированной анкерной системы. В базовом варианте крепления три сталеполлимерных анкера в центральной части свода не участвуют в сопротивлении горизонтальным подвижкам непосредственной кровли, а растяжение арматуры усилиями  $\sigma_x$  проявляются только в приконтурной части периферийных сталеполлимерных анкеров.

В целом, результаты анализа распределения горизонтальных напряжений в крепежных элементах выемочной выработки подтверждают более благоприятное состояние рамной крепи при установке комбинированной анкерной системы.

В заключение анализа НДС элементов крепежных конструкций выемочной выработки рассмотрено распределение вертикальных напряжений  $\sigma_y$ , эпюра которых показана на рис. 3.6.

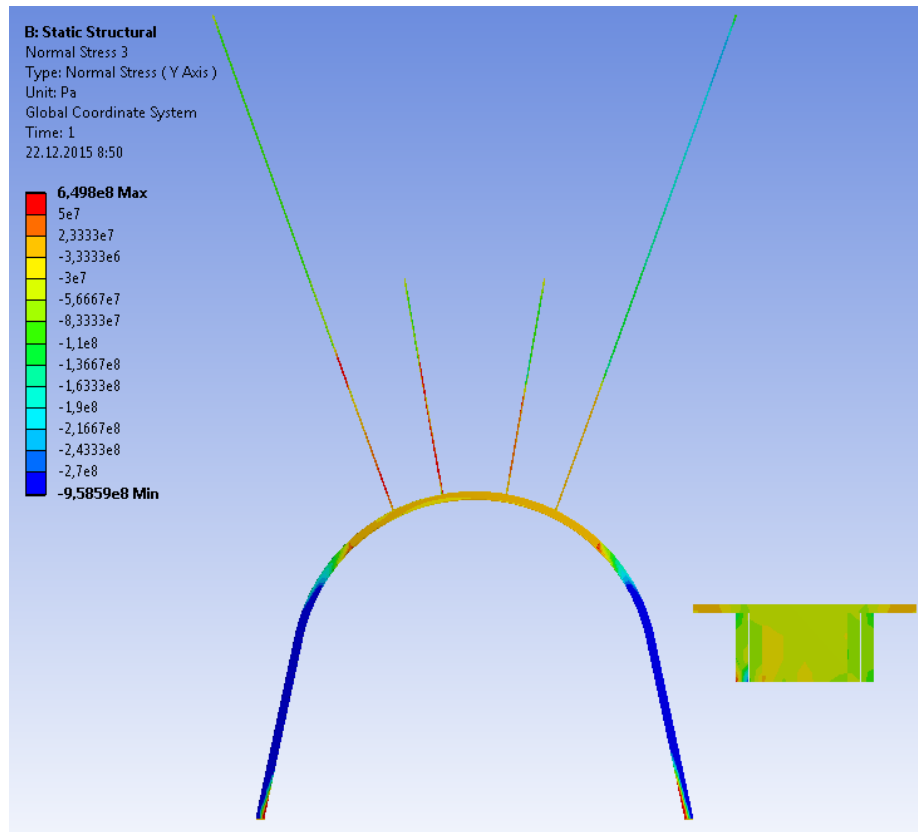


Рисунок 3.6 – Эпюра вертикальных напряжений  $\sigma_y$  в крепежных элементах выемочной выработки при использовании комбинированной анкерной системы

В обеих рассматриваемых крепежных конструкциях верхняк рамы находится в относительно разгруженном состоянии, но имеются отличия, как по степени разгрузки, так и по характеру распределения  $\sigma_y$  по длине верхняка и в его поперечном сечении.

Минимальная загрузка верхняка горным давлением со стороны пород наблюдается при установке в ней комбинированной анкерной системы. По всей длине верхняка  $\sigma_y$  изменяется от 15 – 20 МПа растяжения и до 25 – 30 МПа сжатия. Это проявляется на ограниченном участке длиной до 0,6 м в центральной части свода, несколько смещенным в сторону нетронутого массива. Здесь действует небольшой изгибающий момент, направленный в сторону пород кровли. На остальной длине верхняка распределение  $\sigma_y$  в его поперечном сечении достаточно равномерное без появления сколь-нибудь значимого изгибающего момен-

та. В районе расположения замков податливости возникают локальные очаги (размером до 100 – 150 мм) растягивающих  $\sigma_y \leq 40 - 50$  МПа, что обусловлено упругими деформациями сопряжения верхняка и стоек рамы.

В базовом варианте крепления по большей части длины верхняка величина  $\sigma_y$  также невелика – от 25 МПа растяжения до 75 МПа сжатия, а его прогиб в полость выработки наблюдается практически по всей центральной части свода. Аномалии  $\sigma_y$  действуют в районе опоры верхняка на центральную стойку крепи усиления. Здесь концентрация сжимающих  $\sigma_y$  повышается до 150 – 200 МПа, а в отдельных локальных очагах доходит до расчетного предела текучести стали СВП, что провоцирует пластический изгиб верхняка. На периферийных участках также имеет место рост сжимающих  $\sigma_y$  до уровня 100 – 150 МПа. Последний факт является весьма показательным. Сжатие верхняка в замковой части податливости указывает на выполаживание при деформировании центральной части свода в полость выработки. Хотя этот процесс находится в основном на упругой стадии деформирования, он характеризует повышенную вертикальную нагрузку на верхняк рамы со стороны пород кровли. Следовательно, можно отметить, что по фактору состояния верхняка наблюдается снижение вертикальной нагрузки на раму при использовании комбинированной анкерной системы.

Стойки рамы весьма загружены вертикальными напряжениями для обоих вариантов крепления, а некоторые отличия состоят в следующем. В варианте применения комбинированной анкерной системы подавляющая часть длины стоек загружена достаточно равномерно в их поперечном сечении. То есть, изгибающий момент практически отсутствует за исключением участков опор стоек высотой до 0,4 м со стороны выработанного пространства и до 0,3 м со стороны нетронутого массива. Здесь происходит изгиб опорной части стоек в полость выработки.

В базовом варианте крепления распределение  $\sigma_y$  в стойке со стороны нетронутого массива весьма схоже с вышеописанным. По высоте стойки со сто-

роны выработанного пространства возникают четыре участка пластического изгиба в сторону выработки. Эти участки могут существенно изменить геометрию стойки в направлении снижения ее устойчивости и существенной потери несущей способности рамной крепи в целом. Таким образом, анализ состояния стоек рамы по фактору  $\sigma_y$  также отмечает благоприятное воздействие комбинированной анкерной системы.

Далее рассмотрим распределение  $\sigma_y$  в анкерах, размещенных по контуру свода выработки. Во всех пяти сталеполимерных анкерах базовой схемы крепления наблюдается более-менее одинаковая картина напряжений. В приконтурной части анкеров действуют растягивающие  $\sigma_y$  до 50 – 75 МПа на длине арматуры 0,25 – 0,70 м. Причем, меньшее значение относится к центральному анкеру, а большее – к периферийному анкеру со стороны выработанного пространства. Эти данные указывают на противодействие расслоению приконтурной части пород непосредственной кровли, поскольку заглубленная часть анкеров свободна от растягивающих усилий.

В комбинированной анкерной системе крепления выемочных выработок растягивающие  $\sigma_y$  действуют на ближних к выработке участках, как сталеполимерных, так и канатных анкеров. Длина этих участков гораздо больше и изменяется в интервале 1,1 – 1,8 м с некоторым увеличением у анкеров, расположенных со стороны нетронутого массива. Здесь система сопротивляется расслоению практически по всей или подавляющей части мощности непосредственной кровли. Следовательно, в большей степени сохраняется ее целостность и способность противодействия вертикальному горному давлению.

Подводя итоги выполненному анализу НДС, констатируем всесторонне обоснованный факт снижения напряженности рамной крепи при установке в кровле выработки комбинированной анкерной системы. Этот факт вполне объясним, учитывая закономерности изменения напряженного состояния близлежащего массива (см. п. 3.1) в направлении повышения устойчивости пород кровли за счет формирования армопородной плиты высокой грузонесущей способности.

### **3.3 Закономерности влияния геомеханических факторов на сопротивление комбинированной анкерной системы горному давлению**

Сопротивление комбинированной анкерной системы определяется уровнем действия интенсивности напряжений  $\sigma$  и протяженностью наиболее нагруженных участков сталеполимерных и канатных анкеров, установленных в кровле выемочной выработки. Чем больше  $\sigma$  и длиннее участок его распространения, тем активнее противодействует система сдвигению пород кровли в выработку. Закономерность связи параметров сопротивления комбинированной анкерной системы с геомеханическими факторами, характеризующими условия поддержания выемочных выработок, установлены на основе проведения серий многовариантных вычислительных экспериментов. Алгоритм таких исследований и комплекс методических аспектов их реализации в полном объеме изложены в работе [85, 88], а в диссертации для сокращения ее объема приведены основные результаты.

Серии вычислительных экспериментов имеют конечную цель определения рациональных параметров установки комбинированной анкерной системы в зависимости от горно-геологических условий поддержания выемочной выработки. В этой связи, первый этап исследований состоит в установлении степени влияния ряда геомеханических факторов на уровень сопротивления сталеполимерных и канатных анкеров. При их низком сопротивлении правомерен вопрос о целесообразности применения комбинированной анкерной системы в данных горно-геологических условиях. Вполне вероятно здесь достаточно использование традиционных схем крепления.

На втором этапе исследований, необходимо определиться с количеством анкеров достаточным для формирования армопородной плиты в кровле, надежно защищающей выемочную выработку от проявлений горного давления. Поэтому представляется чрезвычайно важным очертить круг условий эффективного применения комбинированных анкерных систем на базе установленных закономерностей степени нагрузки анкеров и влияния геомеханических

факторов, характеризующих условия поддержания выработки.

На основе разработанного общего алгоритма [85] поиска рациональных параметров установки комбинированных анкерных систем в составе схемы поддержания выработки в целом выявлен и обоснован ряд геомеханических факторов, оказывающих наибольшее влияние на степень нагрузки анкеров. К ним относятся: глубина размещения выработки  $H$ , среднее расчетное сопротивление сжатию  $R$  близлежащих углевмещающих пород, отношение расчетного сопротивления сжатию пород непосредственной кровли угольного пласта

к ее мощности  $\frac{R_1^K}{m_1^K}$  [85]. *Для лучшего восприятия принятое отношение*

*выразим через выражение  $b_m^r$ , которое будем применять в полученных зависимостях.*

Для оценки степени нагрузки анкеров необходимо обосновать соответствующий критерий, что является непростой задачей ввиду значительных колебаний интенсивности напряжений  $\sigma$  по длине анкеров. Наиболее объективной характеристикой является длина участка, где анкер нагружен на уровне своей несущей способности, то есть, работает с максимальной эффективностью. Безусловно, следует признать достаточную эффективность работы анкера, когда он сопротивляется горному давлению на уровне, например, 70 – 90% от своей несущей способности. Но, тогда возникает многокритериальность и некоторая неоднозначность оценки его упрочняющего действия. К тому же участки длины анкера с указанной степенью нагрузки всегда соседствуют с участками предельного (пластического) состояния (загрузка 100%) его арматуры (несущего элемента). Поэтому условие появления участков пластического состояния несущего элемента автоматически включает в себя и участки допредельного состояния с высокой степенью сопротивления.

Также следует учесть разную длину анкеров в комбинированной анкерной системе. Наиболее объективным будет использование такого относительного параметра как отношение длины участка пластического состояния несущего элемента ко всей длине анкера. В качестве критерия оценки эффективно-

сти работы анкеров, в составе комбинированной анкерной системы, предложена относительная длина участка пластического состояния несущего элемента (арматура в сталеполимерных анкерах и канат в канатных анкерах), которая выражена в процентах.

Помимо прочего, возникает вопрос группирования анкеров, особенно при их достаточно большом количестве в кровле выработки. Это осуществлено на основе результатов предыдущих исследований по изучению распределения компонент напряжений по длине анкеров. Группирование (где это было возможным) выполнено по условию степени схожести их НДС и подобию тенденций влияния геомеханических факторов. В итоге приняты к изучению следующие критериальные параметры:

–  $\Delta$  – относительная длина пластического состояния несущего элемента сталеполимерных анкеров в центральной части свода выработки;

–  $\Delta_{л,м}^{кан}$  – относительная длина пластического состояния несущего элемента канатных анкеров в кровле со стороны выработанного пространства и нетронутого массива, соответственно.

Тенденции влияния глубины  $H$  размещения выемочной выработки на степень нагруженности анкеров в центральной части свода приведены на рис. 3.7 для одной из серий расчетов НДС исследуемой геомеханической системы. Общая закономерность для всех анкеров в составе комбинированной анкерной системы состоит в увеличении относительной длины участков пластического состояния с ростом параметра  $H$ . Все закономерности близки к линейным функциям  $\Delta(H)$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}(H)$ .

Отмечается разная степень нагрузки сталеполимерных и канатных анкеров. Так, в данной серии расчетов, приведенных в качестве одного из примеров, участки пластического состояния в сталеполимерных анкерах проявляются, начиная с глубины  $H = 428$  м, и развиваются до  $\Delta = 13,7\%$  при граничной глубине  $H = 600$  м выполнения вычислительных экспериментов. Для канатного анкера, размещенного со стороны выработанного пространства, участки пла-

стического состояния величиной  $\Delta_l^{кан} = 3,3\%$  присутствуют уже на глубине  $H = 200$  м и увеличиваются до  $\Delta_l^{кан} = 29,5\%$  при  $H = 600$  м. Со стороны нетронутого массива эти участки занимают промежуточное положение. Пластическое состояние каната появляется при глубине  $H = 293$  м и длина участка увеличивается до  $\Delta_M^{кан} = 26,7\%$  при граничном значении расчетов  $H = 600$  м.

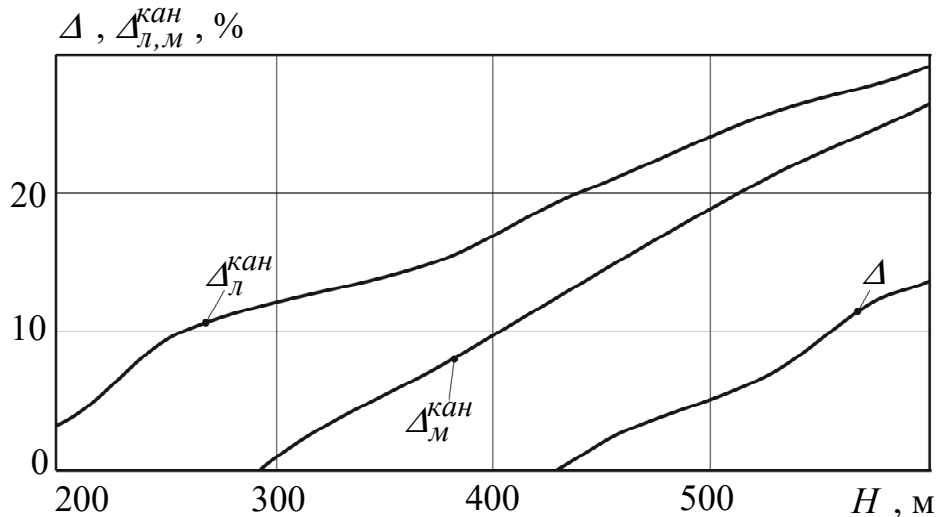


Рисунок 3.7 – Зависимости изменения относительной длины  $\Delta$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}$  участков пластического состояния несущего элемента анкера от глубины  $H$  размещения выработки

Приведенные данные позволяют сделать ряд выводов помимо уже отмеченной тенденции увеличения участков пластического состояния несущего элемента с увеличением глубины размещения выработки.

Во-первых, канатный анкер со стороны выработанного пространства более нагружен, чем со стороны нетронутого массива, что объясняется более интенсивным сдвижением надугольной толщи над выработанным пространством.

Во-вторых, проявляется стабильная тенденция пониженной нагрузки сталеполимерных анкеров. Это можно объяснить их меньшей длиной (2,4 м) по сравнению с канатным анкером (6 м). Известно, что анкер нагружается растягивающими усилиями за счет разницы смещений массива на контуре выработки и на заглубленном участке. Чем длиннее анкер, тем дальше от контура выработки



отстоит заглубленный участок и тем больше указанная разница в перемещениях. Но, присутствует еще один постоянно повторяющийся фактор. Чем ближе сталеполимерный анкер к вертикальной оси выработки, тем он менее нагружен. Таким образом, при разных координатах расположения сталеполимерных анкеров по протяженности верхняка рамы линия  $\Delta(H)$  будет занимать разное положение. Стабильной остается тенденция пониженной величины  $\Delta$  по отношению к  $\Delta_{л,м}^{кан}$ .

В-третьих, суммируя вышеизложенное, следует отметить высокий уровень сопротивления канатных анкеров при любой глубине размещения выработки (в пределах  $200 \text{ м} \leq H \leq 600 \text{ м}$  диапазона проведения вычислительного эксперимента), в то время как сталеполимерные анкера активно сопротивляются горному давлению, начиная с глубины  $H \approx 400 \text{ м}$  для описанной серии расчетов.

Вторым геомеханическим фактором, существенно влияющим на степень нагрузки анкеров в составе комбинированной анкерной системы, является величина среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  породных слоев близлежащей углевмещающей толщи; один из фрагментов закономерностей влияния приведен на рис. 3.8.

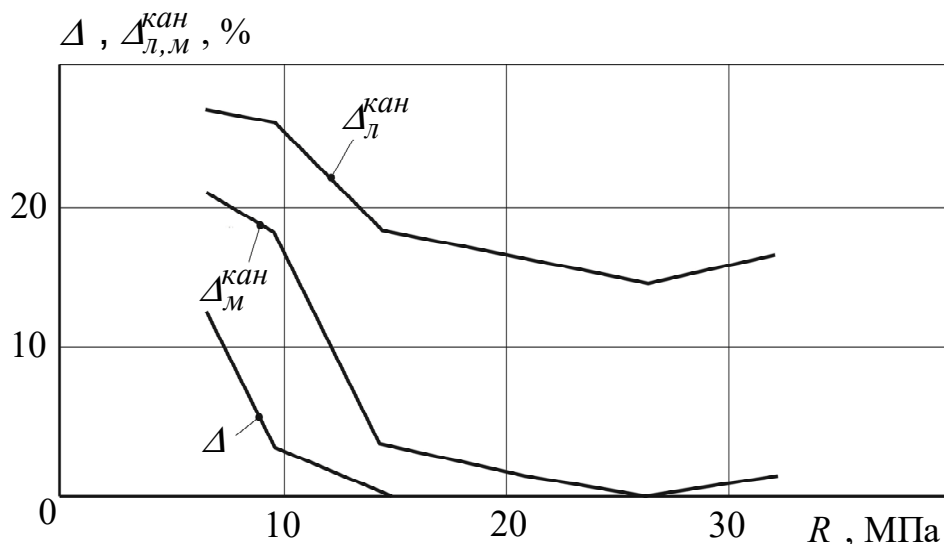


Рисунок 3.8 – Зависимости изменения относительной длины  $\Delta$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}$  участков пластического состояния несущего элемента анкера от среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  близлежащего массива

Общая тенденция для всех анкеров состоит в увеличении относительной длины участков пластического состояния  $\Delta$ ,  $\Delta_{л,м}^{кан}$  при снижении параметра  $R$ , но зависимости  $\Delta(R)$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}(R)$  существенно отличаются друг от друга. Так, для сталеполлимерных анкеров участок пластического состояния появляется только при  $R \leq 14,5$  МПа и при дальнейшем снижении  $R$  происходит достаточно интенсивный рост  $\Delta$  по явно нелинейной зависимости: при  $R = 6,6$  МПа величина  $\Delta$  составляет уже 12,7%.

Иная закономерность изменения функции  $\Delta_{л,м}^{кан}(R)$  наблюдается для канатного анкера, установленного со стороны выработанного пространства. В данном примере в диапазоне  $14,3 \leq R \leq 32,1$  МПа величина  $\Delta_{л}^{кан}$  достаточно стабильна и колеблется в интервале  $\Delta_{л}^{кан} = 14,9 - 18,1\%$ . При  $R < 14,3$  МПа происходит некоторый рост относительной длины участка пластического состояния с максимумом  $\Delta_{л}^{кан} = 26,7\%$  при  $R = 6,6$  МПа.

Для канатного анкера, установленного со стороны нетронутого массива, закономерность связи  $\Delta_{м}^{кан}$  и  $R$  качественно похожа, но количественно график располагается ниже зависимости  $\Delta_{л}^{кан}(R)$ . Так, в диапазоне  $14,3 \leq R \leq 32,1$  МПа величина  $\Delta_{м}^{кан}$  близка к нулю с максимумом 3,3% при  $R = 14,3$  МПа. Если  $R$  нижеуказанного значения, то происходит увеличение параметра  $\Delta_{м}^{кан}$ , который достигает значения 21,2% при  $R = 6,6$  МПа.

При выявлении описанных закономерностей подтвержден факт снижения степени нагрузки сталеполлимерных анкеров при их установке ближе к вертикальной оси выработки и, напротив, увеличения  $\Delta$  при смещении координат установки сталеполлимерных анкеров к периферийным участкам верхняка.

Примечателен еще один вывод по результатам анализа зависимостей  $\Delta(R)$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}(R)$ . Существует некоторое значение параметра  $R$ , ниже которого развивается достаточно интенсивно нагрузка всех анкеров в составе комбинированной анкерной системы. В приведенном примере – это  $R = 14,3$  МПа. Такое

явление может быть объяснено частичной потерей устойчивости распорной системы из породных блоков непосредственной кровли. Созданный распор не может удержать свой вес от обрушения за счет сил распора. Необходимы дополнительные усилия со стороны анкеров для сохранения устойчивости распорной блочной системы в непосредственной кровле.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что на степень нагрузки анкеров в составе комбинированной анкерной системы существенно влияет отношение  $b_m^r$  расчетного сопротивления сжатию  $R_1^K$  пород непосредственной кровли к ее мощности  $m_1^K$ . Фрагменты зависимостей  $\Delta b_m^r$  приведены на рис. 3.9.

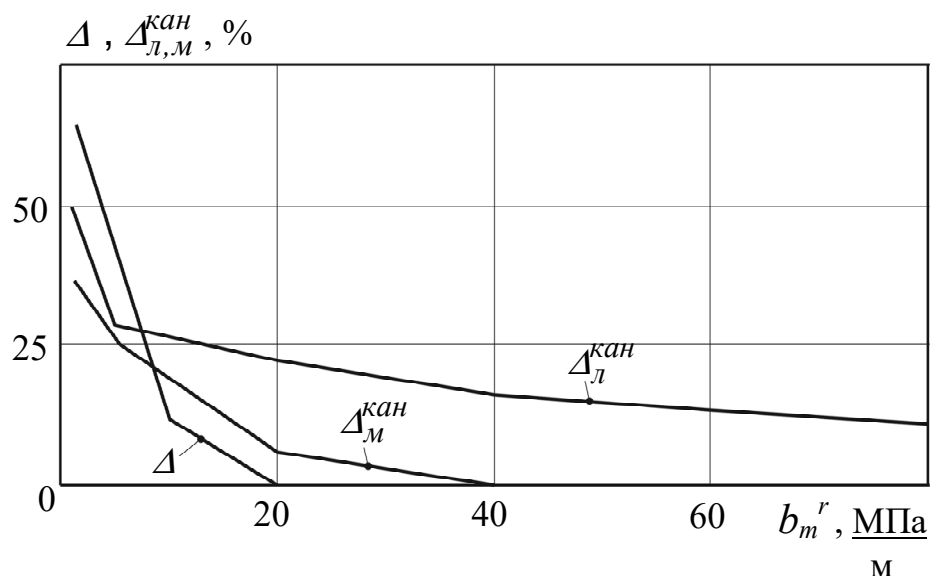


Рисунок 3.9 – Зависимости относительных длин  $\Delta$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}$  участков пластического состояния несущего элемента анкера от изменения параметра  $b_m^r$

Здесь частично нарушено уже ставшее традиционным соотношение между параметрами  $\Delta$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}$ . Так, до величины  $b_m^r \geq 7,5 - 8,3$  МПа/м относительная длина участка пластического состояния сталеполимерных анкеров заметно меньше, чем таковая для канатных анкеров. Участки пластического состояния в сталеполимерных анкерах появляются только при  $b_m^r \leq 20$  МПа/м. При снижении

параметра  $b_m^r$  ниже отмеченной границы в 7,5 – 8,3 МПа/м относительная длина участка пластического состояния арматуры сталеполимерных анкеров  $\Delta$  резко возрастает, превышая соответствующие значения  $\Delta_{l,m}^{кан}$  и достигая величины 64,4% при  $b_m^r = 1,4$  МПа/м; при этом сама зависимость  $\Delta b_m^r$  весьма нелинейная. Объяснение такого стремительного роста  $\Delta$ , на наш взгляд, вполне очевидно. Низкие значения параметров  $b_m^r$  характеризуют условия залегания весьма слабой непосредственной кровли при достаточно большой ее мощности, что провоцирует интенсивное расслоение примыкающих к выработке пород на значительное расстояние в кровлю. Поэтому, противодействие сталеполимерных анкеров активному опусканию пород кровли затрагивает большую часть длины анкера с появлением протяженных участков пластического состояния их арматуры.

Для канатных анкеров, устанавливаемых со стороны выработанного пространства, зависимость  $\Delta_l^{кан}$  несколько иная. Здесь участок пластического состояния каната присутствует при любом значении  $b_m^r$  от 10,6% при  $b_m^r = 80$  МПа/м и до 22,0% при  $b_m^r = 20$  МПа/м. В данном диапазоне значений  $b_m^r$  наблюдается относительно медленный рост  $\Delta_l^{кан}$  при снижении параметра  $b_m^r$ ; при дальнейшем уменьшении отношения  $b_m^r$  градиент роста  $\Delta_l^{кан}$  увеличивается существенно нелинейно, достигая  $\Delta_l^{кан} = 50\%$  при  $b_m^r = 1,4$  МПа/м.

В канатных анкерах, установленных со стороны нетронутого массива, зависимость  $\Delta_m^{кан}$  от  $b_m^r$  занимает, как всегда, промежуточное положение, как по величине  $\Delta_m^{кан}$ , так и по степени нелинейности связи этих параметров. Участки пластического состояния каната появляются при  $b_m^r \leq 40$  МПа/м и интенсивно растут их длина до 36,1% при  $b_m^r = 1,4$  МПа/м. Отмеченный интенсивный рост участков пластического состояния канатов с обеих сторон выработки объясняется все той же неустойчивостью пород непосредственной кровли при низких значениях  $b_m^r$ .

Активное расслоение слабой и достаточно мощной непосредственной кровли увеличивает нагрузку на канатные анкера, закрепленные в основной кровле. Эта составная часть кровли испытывает меньшие перемещения в направлении выработки и за счет натяжения канатов удерживает породы непосредственной кровли от обрушения. Поэтому часть снижения устойчивости непосредственной кровли перекладывается на увеличение нагрузки на канатные анкера и длина участков пластического состояния канатов возрастает.

Выявленные закономерности дают оценку степени влияния геомеханических факторов на нагрузки всех анкеров, входящих в состав комбинированной анкерной системы, что является одной из основ при разработке методики расчета ее рациональных параметров в зависимости от условий поддержания выемочной выработки.

В результате выполненных исследований сформулировано **первое научное положение**: Область применения сталеполимерных анкеров в крепежной системе с канатными анкерами определяется показателем интенсивности проявления горного давления  $b^r$ , который находится в экспоненциальной зависимости от отношения расчетного сопротивления сжатию пород непосредственной кровли угольного пласта к его мощности  $b_m^r$ . Это позволяет обеспечить сопротивление всех элементов крепежной системы пропорционально их несущей способности для реализации повторного использования выемочных выработок.

### **Выводы к разделу 3**

В результате выполненных исследований НДС углевмещающей толщи, окружающей выемочную выработку, и крепежной системы сталеполимерных и канатных анкеров в кровле выемочной выработки сформулированы следующие выводы.

1. В породах кровли за счет комбинации канатных и сталеполимерных анкеров формируется армопородная плита, высокая грузонесущая способность которой достигается за счет сохранения горизонтальных усилий распора даже в

условиях разбиения слоев кровли на породные блоки. Снижаются концентрации всех компонент напряжений до уровня ниже прочностных характеристик литотипов, а появление растягивающих напряжений  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  носит локальный характер. Поэтому мощная армопородная плита в кровле предохраняет крепежную систему выемочной выработки от чрезмерного вертикального горного давления.

2. Впервые установлена зависимость координат установки и угла наклона сталеполимерных анкеров в своде выемочной выработки от интенсивности проявления горного давления  $b^r$  при учете его проявления в породах непосредственной кровли в зависимости от мощности вынимаемого пласта  $b_m^r$ . Эффективность противодействия армопородной плиты вертикальному горному давлению повышается за счет снижения напряженности пород в боках выработки, которые являются опорами для распорной системы в кровле.

3. Снижение концентраций напряжений и размеров областей разупрочнения пород в боках выработки благоприятно сказывается на уровне напряженности пород почвы, что позволяет прогнозировать менее интенсивное развитие процесса пучения.

4. Установлено снижение напряженности верхняка и стоек рамной крепи при использовании в кровле комбинированной анкерной системы, которое обосновано восприятием части вертикального горного давления армопородной плитой, сформированной в кровле благодаря активному сопротивлению сталеполимерных и канатных анкеров процессам сдвижения углевмещающего массива.

5. Уточнен диапазон изменения параметров установки канатных анкеров в составе комбинированной системы в зависимости от типоразмера сечения выемочной выработки. Компоненты напряжений  $\sigma$ ,  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  во всех элементах схем крепления практически не подвержены влиянию реакции центральных податливых стоек крепи усиления за исключением локальных участков в верхняке рамы в районе их совместного контакта. Это указывает на целесообраз-

ность исключения центральной стойки крепи усиления.

6. Обоснован критерий оценки уровня сопротивления анкеров в составе комбинированной анкерной системы, который использован для установления наиболее влияющих геомеханических факторов в части степени нагруженности системы: глубина размещения выработки, среднее расчетное сопротивление сжатию близлежащего массива пород, отношение расчетного сопротивления сжатию пород непосредственной кровли к ее мощности.

7. Установлены закономерности степени нагрузки (дифференцированно) анкеров в составе комбинированной анкерной системы от основных влияющих геомеханических факторов. Доказана градация уровня сопротивления анкеров проявлениям горного давления: максимум противодействия создают канатные анкера, установленные со стороны выработанного пространства; минимум – сталеполимерные анкера.

8. Впервые установлены рациональные координаты размещения анкеров в центральной части свода выемочной выработки и углы их наклона в зависимости от типоразмера сечения выемочной выработки. Полученные закономерности являются основой для поиска рациональных параметров комбинированной анкерной системы с конечной целью разработки методики выбора ее параметров в зависимости от горно-геологических условий поддержания выемочной выработки.

## Раздел 4

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОРОД КРОВЛИ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК СИСТЕМОЙ СТАЛЕПОЛИМЕРНЫХ И КАНАТНЫХ АНКЕРОВ

#### 4.1 Обоснование параметров расположения

##### сталеполимерных анкеров в породах свода выработки

В соответствии с общей стратегией выбора параметров элементов крепежной системы выемочной выработки в зависимости от горно-геологических условий ее поддержания основная задача настоящего раздела состоит в определении рациональных параметров размещения сталеполимерных и канатных анкеров, упрочняющих породы кровли пластовой выработки. Под рациональными параметрами сталеполимерных и канатных анкеров понимаются такие, которые реализуют два условия: с одной стороны, анкера совместно с упрочненными породами кровли должны максимально разгружать рамную крепь для эффективного ограничения потери сечения выработки; с другой стороны, анкера в кровле должны работать с максимальной реакцией сопротивления горному давлению, то есть, устанавливаться в минимально достаточном количестве.

Отдельное рассмотрение сталеполимерных и канатных анкеров в кровле выработки продиктовано следующим обстоятельством.

Во-первых, длина канатных анкеров в два и более раза превышает длину сталеполимерных, что предопределяет разные области упрочнения приконтурных пород.

Во-вторых, их функции существенно отличаются друг от друга. Сталеполимерные анкера при упрочнении пород непосредственной кровли свода выработки ограничивают ее расслоение и совместно с боковыми анкерами создают связи между отдельными породными блоками. В конечном итоге формируется породная плита, воспринимающая на себя часть горного давления, что снижает нагрузку на рамную крепь.



Канатные анкера связывают непосредственную и основную кровлю, что повышает устойчивость как одного, так и другого породных объемов над выработкой и защищают крепь от горного давления.

Перечень параметров установки сталеполимерных анкеров, размещенных в кровле выработки по контуру верхняка рамы, состоит из определения угла наклона  $\beta_i$  анкера к горизонтальной оси выработки и его несущей способности (выраженная через диаметр  $d_i$  «арматуры»). Задается длина сталеполимерных  $l_i$  анкеров (2,4 м), что обусловлено их функцией по формированию грузонесущей армопородной плиты в кровле выработки. Размеры свода предельного равновесия в кровле (в зоне стабилизации проявлений горного давления) таковы, что в большинстве случаев этой длины недостаточно для закрепления их замков в устойчивых породах и эту функцию делегируют канатным анкерам. Четвертым параметром является координата установки каждого элемента  $x_i$ , которая отсчитывается от вертикальной оси выработки по горизонтали.

При выявлении связи координат установки  $x_i$  сталеполимерных анкеров с геомеханическими факторами по сформулированным выше условиям использованы закономерности (см. подраздел 3.3) изменения степени нагруженности анкеров. Силовой потенциал сталеполимерных анкеров в кровле реализуется только при интенсивном проявлении вертикальной составляющей горного давления. Это важно для условий Западного Донбасса, где глубина заложения выработки  $H \geq 400 - 450$  м и слабые породы близлежащего углевмещающего массива ( $R \leq 10 - 15$  МПа), а также низкое сопротивление сжатию пород непосредственной кровли при ее повышенной мощности ( $b_m^r \leq 15 - 20$  МПа/м). Здесь сталеполимерные анкера активно сопротивляются процессам расслоения и опускания пород кровли выработки, что предполагает повышенную плотность их установки. На практике данная горно-геологическая ситуация характеризуется размещением в кровле выработки порядка 7 – 9 анкеров. В более благоприятных горно-геологических условиях количество анкеров в кровле существенно снижается (до 3 – 5 анкеров), поскольку они остаются недогруженными, как показывают

результаты вычислительных экспериментов [20, 85].

Вопрос о минимально необходимом количестве сталеполимерных анкеров в кровле совмещен с поиском координаты  $x_i$  расположения каждого анкера. При этом перебор вариантов расчета существенно упрощается исходя из следующих соображений.

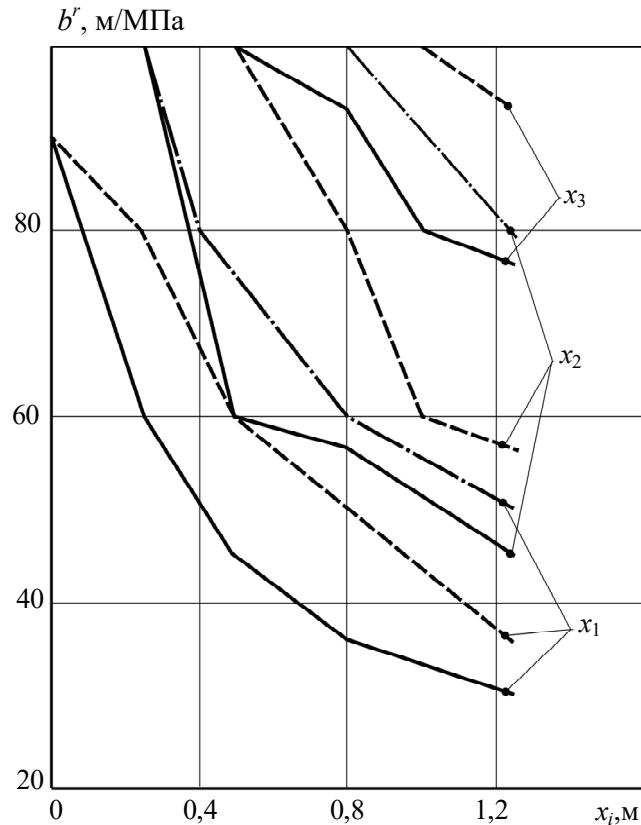
Во-первых, установлено, что степень нагрузки анкеров прямо пропорционально глубине  $H$  размещения выработки и обратно пропорциональна величине среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  близлежащей углевмещающей толщи. Под этим термином понимается радиус влияния выемочной выработки на окружающие ее породы, который составляет 3 – 5 ширины выработки. Таким образом, подтверждаются известные тенденции развития горного давления, интенсивность которого традиционно связывают с отношением  $\frac{H}{R}$ , которое *для упрощения обозначим через  $b^r$  и в дальнейшем используем его в наших исследованиях.* Кроме того, по причине постепенного увеличения параметра  $H$  (по технологии расчета упруго-пластической задачи) в ходе одного вычислительного эксперимента можно получить набор значений по степени нагруженности анкеров.

Во-вторых, используя данные исследований [20, 85], варианты с повышенным количеством сталеполимерных анкеров в кровле рассчитываются только для ограниченного круга сложных горно-геологических условий, отмеченных выше.

В-третьих, при существенной недогрузке каких-либо анкеров они исключаются из рассмотрения при сохранении их результатов. При этом нагрузка, воспринимаемая недогруженными анкерами, учитывается при увеличении интенсивности напряжений за счет резерва сопротивления, обусловленного площадкой и стадией упрочнения любой стали «арматуры» анкера.

Используя изложенный подход, получены графики зависимостей координат  $x_i$  установки сталеполимерных анкеров от параметров  $b^r$  и  $b_m^r$ , которые приведены на рис. 4.1. Предварительно установлено, что размещать более шести

анкеров в центральной части кровли не рационально ввиду их низкой загруженности. Это подтверждается как серией многовариантных расчетов НДС крепежной системы [20, 85], так и опытом поддержания выемочных выработок. Тогда при симметричной (относительно вертикальной оси выработки) схеме установки анкеров необходимо проанализировать изменение трех координат  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) в зависимости от горно-геологических условий.



—  $b_m^r = 4,8$  МПа/м; - - -  $b_m^r = 10,2$  МПа/м; - · - · -  $b_m^r = 15,6$  МПа/м

Рисунок 4.1 – Связь координат  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) установки сталеполимерных анкеров в центральной части свода выработки от параметра  $b^r$

Наблюдается обратно пропорциональная связь координат  $x_i$  с величиной отношений  $b^r$ , которая стабильно повторяется для всех вариантов расчета вне зависимости от количества анкеров в своде выработки. При большой величине отношения  $b^r$  (повышенная глубина расположения выработки при пониженной

крепости окружающего массива) сталеполимерные анкера целесообразно сосредотачивать ближе к замку свода, что продиктовано весьма интенсивным расслоением кровли преимущественно посередине пролета выработки, то есть, в центральной части ее свода. При повышенной устойчивости вмещающих пород (снижение величины  $b^r$ ) координаты установки анкеров перемещаются ближе к пяте свода, а количество анкеров в кровле снижается, что не противоречит существующим представлениям и рекомендациям. Анкера, для которых координата  $x_i$  достигает или превышает координату расположения замка податливости рамы, переходит в иное качество – верхних боковых анкеров и их рациональные параметры уже установлены в работе [35]. При этом количество анкеров в кровле снижается.

Иным образом на координаты установки сталеполимерных анкеров влияет отношение  $b_m^r$ . С увеличением крепости породы кровли нагрузка на анкера снижается, и их количество целесообразно уменьшать, что соответствует увеличению расстояния между анкерами (смещению координат их установки от замка к пяте свода).

Выявленные закономерности связи рациональных координат установки сталеполимерных анкеров в своде выработки с геомеханическими параметрами ее поддержания позволили получить набор уравнений регрессии по расчету значений  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$

$$x_1 = -5,8 \cdot 10^{-2} b_m^r \ln(0,015b^r - 0,52), \text{ м}; \quad (4.1)$$

$$x_2 = 10^{-2} b_m^r [4,8 - 10,9 \ln(0,015b^r - 0,52)], \text{ м}; \quad (4.2)$$

$$x_3 = 10^{-2} b_m^r [12,6 - 17,2 \ln(0,015b^r - 0,52)], \text{ м}. \quad (4.3)$$

В приведенных выражениях индекс «1» обозначает координату  $x_1$  установки сталеполимерного анкера с минимальным расстоянием от вертикальной оси выработки, а индекс «3» – с максимальным расстоянием. Если величина  $x_3$  превышает горизонтальную координату расположения замка податливости

рамной крепи, то крайний анкер исключается из схемы установки анкеров в своде. Аналогичным образом рассматривается целесообразность установки в своде сталеполимерных анкеров с координатами  $x_2$  и  $x_1$ . Тогда в некоторой области соотношения геомеханических параметров нет необходимости в установке анкеров по контуру свода на участке между замками податливости рамы. Обоснованность данного утверждения состоит в том, что устойчивая кровля не нагружает анкера до уровня их активной работы по сопротивлению горному давлению. Оказывает влияние и длина анкеров, где имеет место разные смещения пород кровли в хвостовике и на участке замка. При увеличенной длине анкеров разница в указанных смещениях возрастает, что способствует их полноценной нагрузке. Следует отметить особенности работы рамной крепи по поддержанию кровли выемочной выработки. Верхняк рамы менее нагружен, чем ее стойки крепи, особенно, в благоприятных горно-геологических условиях шахт Западного Донбасса [19, 85].

Таким образом, существует область горно-геологических условий, когда наблюдается низкая эффективность упрочнения сталеполимерными анкерами пород кровли в пределах центральной части свода выработки. Для определения границ этой области получены следующие соотношения геомеханических параметров для выемочных выработок с крепью КШПУ:

– для КШПУ – 11,0 (11,7)

$$b^r \leq 34,7 + 66,7 \exp(-17,2b_m^r), \text{ м/МПа}; \quad (4.4)$$

– для КШПУ-15,0

$$b^r \leq 34,7 + 66,7 \exp(-19,8b_m^r), \text{ м/МПа}; \quad (4.5)$$

– для КШПУ-17,7

$$b^r \leq 34,7 + 66,7 \exp(-22,4b_m^r), \text{ м/МПа}. \quad (4.6)$$

При величине  $b^r$  меньше расчетной по формулам (4.4) – (4.6) не рекомендуется установка сталеполимерных анкеров в центральной части свода. В

противном случае координаты размещения анкеров и их количество определяются по формулам (4.1) – (4.3).

Для оперативной оценки целесообразности размещения анкеров в центральной части свода выработки построены графики, определяющие границу указанных областей по соотношениям геомеханических параметров  $b^r$  и  $b_m^r$ , которые приведены на рис. 4.2.

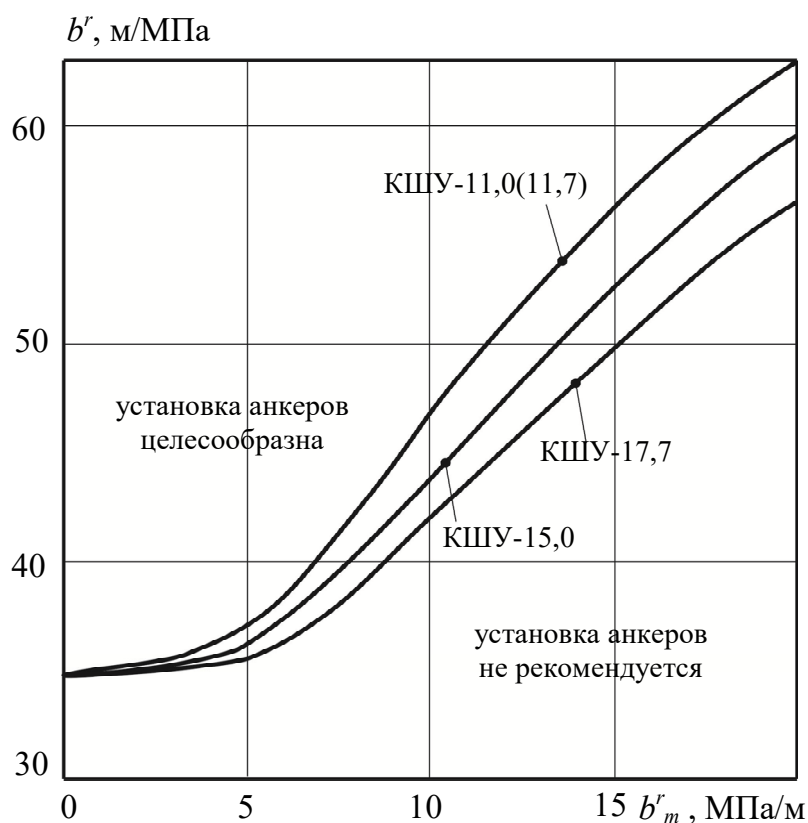


Рисунок 4.2 – Область целесообразного размещения сталеполимерных анкеров в центральной части свода выемочной выработки

Следующими параметрами установки сталеполимерных анкеров в своде выемочной выработки являются их угол наклона  $\beta_i$  и диаметр  $d_i$  несущего стержня. При исследовании постоянно отмечался факт недогрузки рассматриваемой группы анкеров. Здесь нецелесообразно применять анкера обычной конструкции, несущая способность которой оценивается порядка 200 кН [4, 91,

92]. Рекомендуются конструкции с уменьшенным диаметром «арматуры» в интервале  $d_i = 15 - 18$  мм, сопротивление разрыву которой до 2 – 2,5 раза ниже, чем у обычных конструкций. Этого вполне достаточно для формирования армопородной грузонесущей плиты в кровле выработки. Поэтому для данной группы анкеров нецелесообразно проводить исследования по выявлению закономерностей связи диаметра «арматуры» с геомеханическими параметрами поддержания выработки. Величина диаметра  $d_i$  выбирается постоянной для всей группы анкеров в пределах вышеуказанного интервала.

Иная ситуация имеет место с выбором рациональных углов  $\beta_i$  наклона сталеполлимерных анкеров к горизонтальной оси выработки. Этот параметр связан с координатой  $x_i$  и является переменным для анкеров, устанавливаемых в центральной части свода выработки. Максимальный эффект упрочнения массива достигается когда продольная ось анкера совпадает с вектором перемещений пород кровли при данной координате  $x_i$  [42, 85]. В соответствии с общей тенденцией изменения вектора перемещений пород от вертикального в замке свода до косонаправленного в его пяте получены закономерности связи угла  $\beta_i$  наклона анкера с координатой  $x_i$  его установки, которые отражены на графиках рис. 4.3. Наблюдается стабильное знакопеременное снижение  $\beta_i$  при смещении места установки анкера (увеличение координаты  $x_i$ ) в сторону замка податливости рамы. Эта стабильность подтверждается несущественным влиянием таких геомеханических параметров, как отношения  $b^r$  и  $b_m^r$ .

Так, при увеличении параметра  $b^r$  в 2 раза диапазон вариации угла наклона анкера составляет 0 – 10% с максимальным отклонением 11,8%. При уменьшении параметра  $b_m^r$  в 3,25 раза максимальное отклонение  $\beta_i$  не превышает 10%. Приведенные данные косвенно подчеркивают объективность критерия выбора угла наклона анкера по вектору перемещений окружающего массива в направлении полости выработки. Применение корреляционно-дисперсионного

анализа результатов вычислительного эксперимента позволило получить следующее уравнение регрессии

$$\beta_i = 90(1 - 0,41x_i^{0,8}), \text{ град.} \quad (4.7)$$

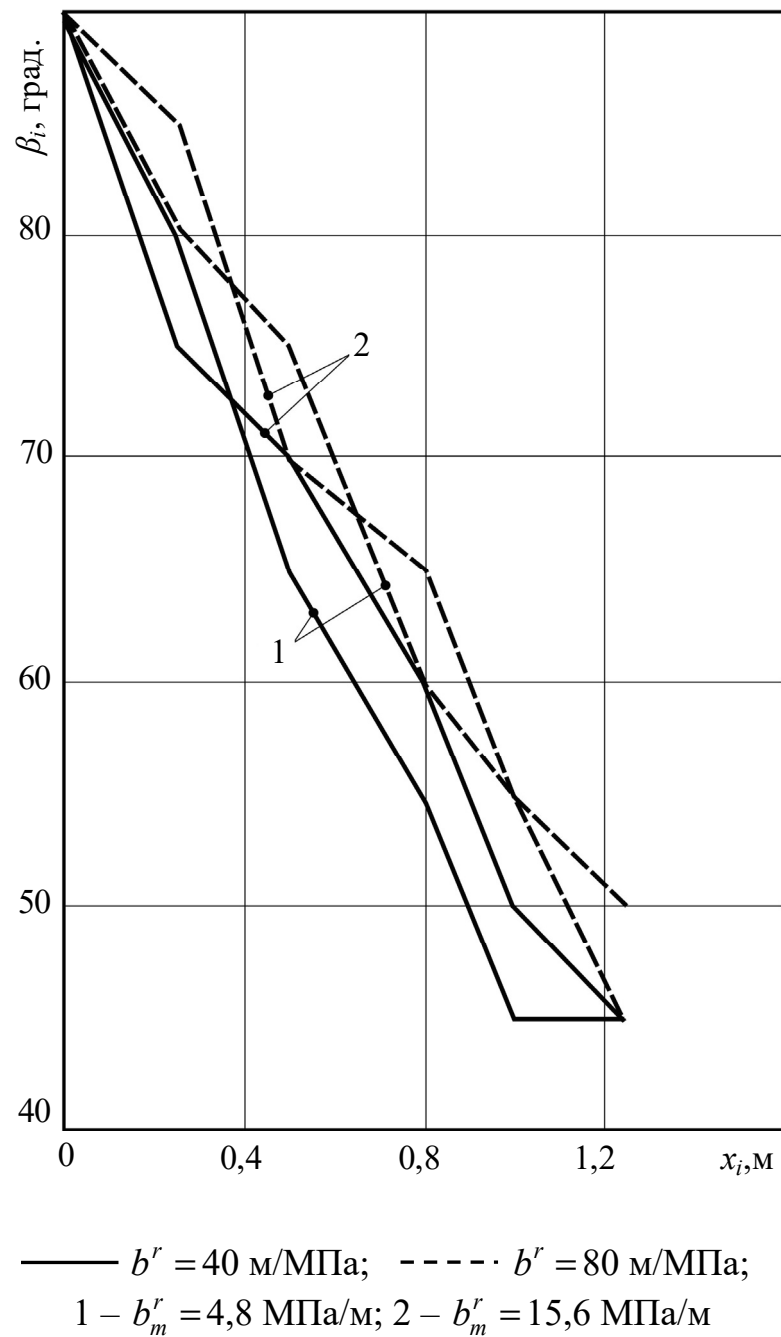


Рисунок 4.3 – Связь угла  $\beta_i$  наклона сталеполимерного анкера с координатой  $x_i$  его установки в своде выемочной выработки при разных значениях параметра  $b^r$



Полезность выражения (4.7) в совокупности с формулами (4.1) – (4.3) заключается в возможности обоснованного выбора параметров установки сталеполлимерных анкеров по контуру свода выемочной выработки.

#### **4.2 Параметры упрочнения пород свода выработки канатными анкерами**

Канатные анкера выполняют основную функцию в процессе поддержания выемочной выработки в зоне влияния очистных работ. Глубинное упрочнение пород кровли, основной эффект которого состоит в ограничении расслоения мощной структуры из пород непосредственной и основной кровли, не только ограничивает их опускание в выработку, но и повышает сопротивление горному давлению.

Приведенная функция канатных анкеров принципиально отличает их от сталеполлимерных. Для подтверждения данного тезиса на рис. 4.4 приведены эпюры интенсивности напряжений  $\sigma$  крепежных и охранных систем выемочных выработок на трех шахтах Западного Донбасса. В своде выработки четко прослеживается более высокая нагруженность канатных анкеров по сравнению со сталеполлимерными вне зависимости от горно-геологических условий поддержания выработки, схемы размещения анкеров и применяемого способа охраны.

Исходя из изложенного, для канатных анкеров разработана методика расчета рациональных параметров, включающих: длину  $l^{кан}$  анкера, диаметр  $d^{кан}$  каната, координату  $x^{кан}$  и угол  $\beta^{кан}$  наклона его установки. Предполагается симметричность установки канатных анкеров в поперечном сечении относительно вертикальной оси выработки. Данное решение обосновано тем, что в качестве основного аргумента приведена перспектива повторного использования выемочной выработки и выравнивание асимметрии протекания геомеханических процессов при подходе второй лавы.

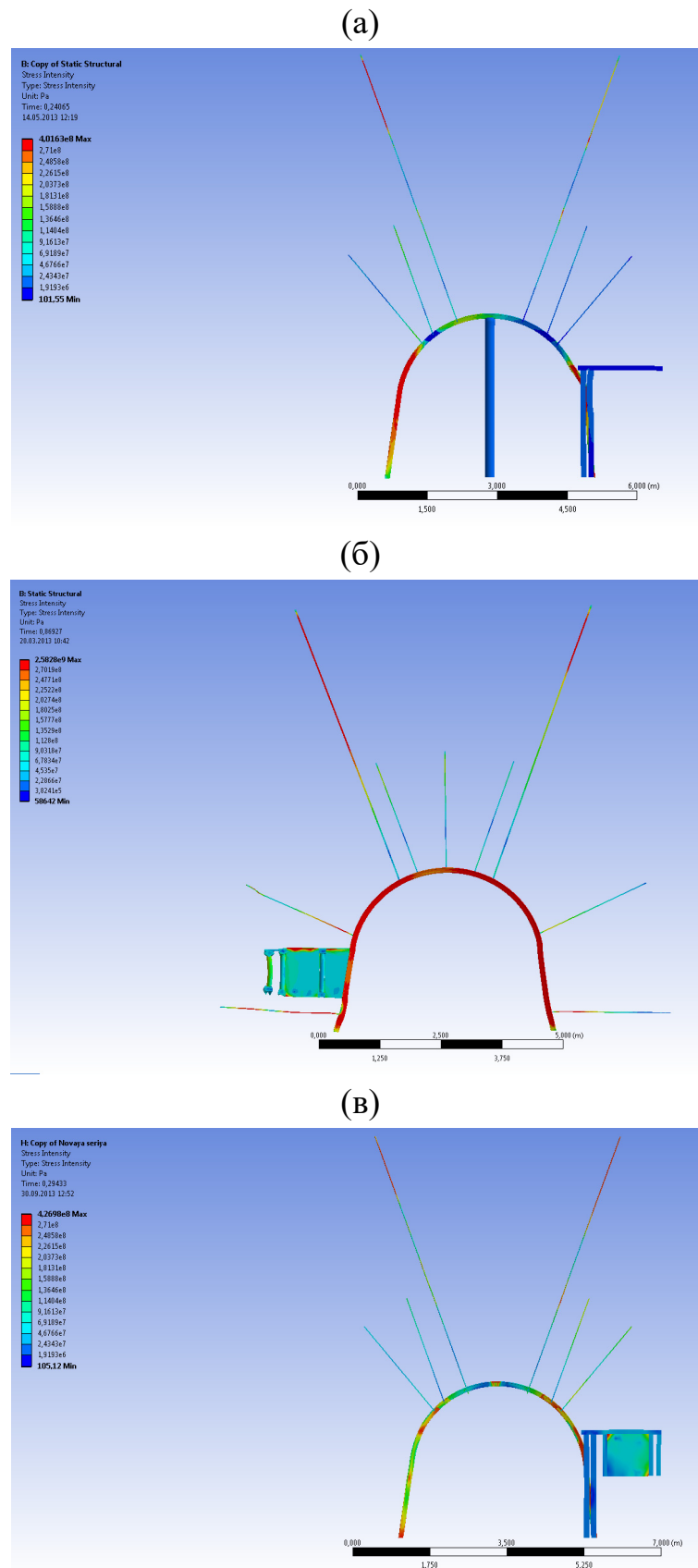


Рисунок 4.4 – Эпюры интенсивности напряжений  $\sigma$  в крепежной и охранной системах выемочных выработок шахт Западного Донбасса: (а) шахта «Самарская» ШУ «Терновское»; (б) шахта им. Героев Космоса ШУ «Героев Космоса»; (в) шахта «Степная» ШУ «Першотравенское»

Рациональная длина  $l^{кан}$  канатного анкера выбирается по условию закрепления его замковой части за пределами свода предельного равновесия, то есть в относительно устойчивых породах основной кровли. Это условие записано в виде

$$l^{кан} \geq l_{зам} + b_l^K + l_{хв}, \quad (4.8)$$

где  $l_{зам}$  – длина замка анкера;

$l_{хв}$  – длина хвостовой части анкера, выходящего в полость выработки; обычно принимают  $l_{хв} = 0,1$  м;

$b_l^K$  – ширина области разупрочнения боковых пород, определяется по формуле [54]

$$b_l^K = \frac{4,1l_{ох}^{0,73}}{R^{0,1}(R_1^K)^{0,21}} [1 - \exp(-5,9 \cdot 10^{-3} H)]. \quad (4.9)$$

Здесь  $l_{ох}$  – ширина охранной полосы.

В формуле (4.8) из неопределенных параметров остается только длина замка. Расчетами и испытаниями установлено, что несущая способность сталеполимерного анкера порядка 200 кН обеспечивается при длине замка  $l_{зам} = 0,6 - 0,7$  м. Как минимум не меньшая несущая способность канатных анкеров достигается при длине замка не более 1,0 – 1,1 м.

Для определения минимально достаточной длины канатного анкера необходимо знать границы контура свода предельного равновесия, чему посвящено много исследований, начиная от проф. М.М. Протодяконова [93], проф. П.М. Цимбаревича [94] и заканчивая современными методами моделирования геомеханических процессов [51, 69, 95]. Данные классические представления настолько аргументированы, что вошли в целый ряд нормативных документов [67, 68, 96, 97], в том числе и в отраслевой стандарт [67]. Однако, в указанном документе, наряду с расчетом высоты  $h$  свода, не учитывается ширина области разупрочненных пород в его боках, что доказано в работе [85] и определено по уравнению регрессии (4.9). Принимая во внимание области разупрочнения в

боках выработки, размеры свода предельного равновесия существенно увеличиваются, что обосновано еще проф. П.М. Цимбаревичем. Для уточнения размеров свода предложено использовать следующую комбинацию:

- высота свода  $h$  предельно равновесия определяется по документу [67];
- ширина области разупрочнения в боках выработки определяется согласно исследованиям [85];
- форма контура свода определяется уравнением параболы согласно проф. М.М. Протодяконову

$$y = h \left[ 1 - \frac{4x^2}{(B + 2b_l^K)^2} \right], \quad (4.10)$$

где  $y$  и  $x$  – вертикальная и горизонтальная координаты с точкой отсчета, расположенной в замке свода выработки;

$B$  – ширина выработки в проходке;

$b_l^K$  – определяется по формуле (4.9); этот параметр принят к расчету как максимальный размер ширины области разупрочнения в боку выработки со стороны лавы, что идет в некоторый запас надежности вычислений, а при повторном использовании выработки размеры  $b_l^K$  и  $b_m^K$  будут уравниваться по своим значениям.

Условие закрепления замковой части канатного анкера за границей свода предельного равновесия преобразуется по отношению к формуле (4.8) без изменения его физического смысла. Расчет минимальной длины  $l^{кан}$  канатных анкеров (устанавливаются симметрично относительно вертикальной оси выработки) производится по формуле

$$l^{кан} = l_{зам} + l_{хв} + \frac{h_г - h^{кан}}{\sin \beta^{кан}} + \frac{Z_2 - Z_1}{\cos \beta^{кан}}, \quad (4.11)$$

где  $h_г$  – высота выработки в проходке;

$h^{кан}$  – высота установки канатного анкера от почвы выработки;

$\beta^{кан}$  – угол наклона канатного анкера к вертикальной оси выработки;

$Z_1$  и  $Z_2$  – вспомогательные геометрические параметры, определяемые по формулам

$$Z_1 = x^{кан} + (h^с - h^{кан}) \operatorname{ctg} \beta^{кан}, \quad (4.12)$$

$$Z_2 = \frac{(B + 2b_{л}^K)^2}{8h} \left[ \sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta^{кан} + \frac{16h}{(B + 2b_{л}^K)^2} (h + Z_1 \operatorname{tg} \beta^{кан})} - \operatorname{tg} \beta^{кан} \right]. \quad (4.13)$$

В формуле (4.12) символом  $x^{кан}$  обозначено расстояние от вертикальной оси выработки до места установки канатного анкера. Задача выбора рациональных значений параметра  $x^{кан}$  решена перебором вариантов расчета НДС рассматриваемой геомеханической системы с учетом закономерностей, установленных в разделе 3. По аналогии с выбором параметров  $x_i$  для сталеполимерных анкеров критерием рациональности значений служит сочетание условий максимального сопротивления канатных анкеров и минимальной нагруженности рамной крепи [85]. Закономерности изменения  $x^{кан}$  таковы, что влияние геомеханических параметров оценивается неоднозначно по причине действия противоположных тенденций.

Во-первых, выявлено сколь-нибудь заметное влияние только двух геомеханических параметров, определяющих размеры предельного равновесия, – глубина  $H$  размещения выемочной выработки и среднее расчетное сопротивление сжатию  $R$  близлежащего массива. Данный факт представляется вполне логичным:

– глубина размещения выработки определяет общую напряженность массива, от которой зависят размеры свода предельного равновесия и степень нагруженности канатных анкеров;

– параметр  $R$  характеризует сопротивляемость близлежащего массива распространению границ свода предельного равновесия.

Параметры  $R_1^K$  и  $m_1^K$  непосредственной кровли входят в качестве составляющих в более общий показатель  $R$ , так как повышенная длина канатных

анкеров затрагивает и другие породные слои кровли на технически освоенную высоту до 9 м. Поэтому отношение  $b^r$  наиболее полно характеризует как размеры свода предельного равновесия, так и степень сопротивления канатных анкеров опусканию кровли выработки.

Во-вторых, влияние отношения  $b^r$  на координату  $x^{кан}$  определяется действием ряда противоположных тенденций. Чем больше высота свода, тем больше нагрузка в его центральной части и для активного сопротивления канатных анкеров их следует концентрировать ближе к замку свода (уменьшение координаты  $x^{кан}$ ). При увеличении высоты свода одновременно растет и его ширина, то есть увеличиваются объемы неустойчивых пород в боках выработки – соответственно возрастает нагрузка в этой части контура свода и целесообразность размещения здесь канатных анкеров (увеличение координаты  $x^{кан}$ ).

Результат действия перечисленных противоположных тенденций приводит к некоторой их взаимной компенсации и стабилизации рациональной координаты установки канатных анкеров в довольно узком диапазоне  $x^{кан} = 0,8 - 1,1$  м. Меньшее из значений  $x^{кан}$  соответствует меньшему типоразмеру сечения выработки (например, под крепь КШПУ-9,5), а больше из значений  $x^{кан}$  – повышенному размеру выработки (например, под крепь КШПУ-15,0). В целом, для сечения выемочных выработок под крепь КШПУ-11,7 (11,0) рекомендуется размещать хвостовик канатного анкера на расстоянии 1,0 м от вертикальной оси выработки.

Аналогичная ситуация выявлена при определении рационального угла  $\beta^{кан}$  наклона канатного анкера к вертикальной оси выработки. Здесь действуют два главных фактора. Первый – узкий диапазон изменения рациональной координаты  $x^{кан}$  установки канатного анкера предопределяет ограниченную вариацию значений его угла наклона. Второй фактор обусловлен повышенной длиной канатного анкера порядка 6 – 9 м. Вектор его перемещений изменяется. Ранее было отмечено, что анкер наиболее эффективно сопротивляется сдвигению мас-

сива, когда его продольная ось совпадает с вектором перемещения вмещающих пород. Особенность смещений пород кровли по ее высоте состоит в том, что изменение их вектора (по ширине свода) от вертикального до косонаправленного наиболее активно происходит в приконтурных породах. С удалением от контура в глубину кровли интенсивность изменения направления вектора смещений ослабевает. На заглубленном конце канатного анкера (с учетом координаты его установки  $x^{кан} = 0,8 - 1,1$  м) вектор перемещений направлен ближе к вертикальному положению, чем на контуре выработки. Изогнуть анкер (путем бурения криволинейного шпура) до такой степени, чтобы его продольная ось постоянно совпадала с вектором перемещений, не представляется технической возможности. Целесообразно задать усредненное направление канатному анкеру как среднее арифметическое из векторов перемещения массива на заглубленном его конце и на контуре выработки. Такая процедура была осуществлена для вышеуказанного диапазона изменения координаты  $x^{кан}$  и получен интервал вариации рационального угла наклона канатного анкера  $\beta^{кан} = 65 - 80^\circ$  для разных горно-геологических условий поддержания выемочной выработки. Этот интервал существенно отличается от углов наклона  $\beta_i$  сталеполимерных анкеров для одной и той же координаты  $x_i$ . Меньшее значение  $\beta^{кан}$  соответствует  $x^{кан} = 1,1$  м и более благоприятным горно-геологическим условиям; большее значение  $\beta^{кан}$  соответствует  $x^{кан} = 0,8$  м и более сложным горно-геологическим условиям.

Последним из искомых параметров канатных анкеров является рациональная величина их сопротивления сдвигению пород кровли, которое выражается через минимально достаточный диаметр «арматуры» канатного анкера  $d^{кан}$ . Критерий выбора рациональных значений  $d^{кан}$  остается прежним (как и для сталеполимерных анкеров) и его сущность состоит в реализации максимально возможной загрузки каната анкера в пределах допустимых напряжений на разрыв.

Анализ результатов многовариантных вычислительных экспериментов показал, что наиболее существенно влияют на степень загрузки анкеров два гео-

механических параметра – глубина  $H$  размещения выработки и величина среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  близлежащей углевмещающей толщи. Отношение  $b_m^r$  имеет определенное влияние в диапазоне  $b_m^r \leq 0 - 15$  МПа/м. Здесь существенно изменяется величина  $R$ , так как непосредственная кровля повышенной мощности ближе всего расположена к выработке. Согласно приведенным результатам в работе [67] этот параметр имеет максимальное влияние на величину среднего расчетного сопротивления массива сжатию. Он содержит в себе воздействие низких значений отношения  $b_m^r$  и нет необходимости в отделении влияния этого параметра на степень нагруженности канатных анкеров. Отмеченные закономерности подтверждены результатами выполненных серий вычислительных экспериментов, также как и то, что влияние каждого из оставшихся геомеханических параметров ( $H$  и  $R$ ) необходимо устанавливать отдельными зависимостями, поскольку отношение  $b^r$  не дает тесной корреляционной связи.

По итогам проведенных исследований получены зависимости связи минимально достаточного диаметра каната анкера с геомеханическими параметрами  $H$  и  $R$ , которые приведены на рис. 4.5. При увеличении глубины  $H$  диаметр  $d^{кан}$  каната увеличивается близко к линейному закону и обратно пропорционально к параметру  $R$ . Основным диапазоном изменения минимально достаточного диаметра канатного анкера ограничен величиной  $d^{кан} = 15 - 16$  мм, что хорошо коррелирует с шахтными наблюдениями по оценке устойчивости выработок, в кровле которых установлены канатные анкера диаметром  $d^{кан} = 15,2$  мм. Однако, при весьма низком значении  $R \leq 5 - 7$  МПа резко возрастает нагрузка на канатные анкера (интенсивно расширяются границы свода предельного равновесия), что требует увеличения диаметра их каната до 20 – 28 мм при рассматриваемой схеме установки.



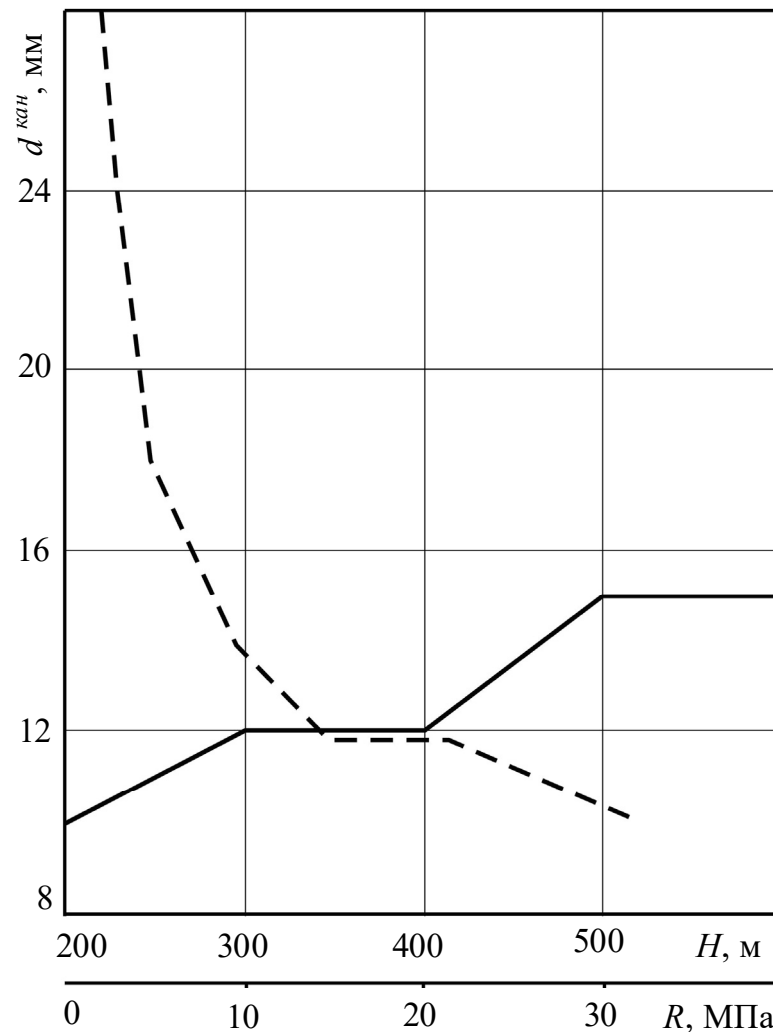


Рисунок 4.5 – Закономерности изменения минимально достаточного диаметра каната  $d^{кан}$  анкеров от глубины  $H$  размещения выработки (—) и среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  (----) близлежащего углевмещающего массива

Обработка результатов многовариантных расчетов позволила получить уравнение регрессии для прогнозирования минимально достаточного диаметра каната

$$d^{кан} = \frac{139}{\sqrt{\sigma^6}} \left[ \left( 1,7 + 9,1 \cdot 10^{-3} H \right) \left( \frac{14,3}{R^{1,8}} + 0,66 \right) \right]^{0,5}, \text{ мм.} \quad (4.14)$$

Уравнение (4.14) получено при рассмотрении варианта установки двух канатных анкеров с шагом  $L^{кан} = 3,2$  м, вдоль выработки, то есть в межрамном пространстве через каждые три рамы на четвертую, которые, в свою очередь,

устанавливаются с шагом  $L = 0,8$  м. Канатные анкера выпускают стандартных диаметров  $d_{ст}^{кан}$  (самый распространенный  $d_{ст}^{кан} = 15,2$  мм) ограниченного количества типоразмеров. Поэтому, если расчетное значение  $d^{кан}$  по формуле (4.14) позволяет выбрать ближайший больший типоразмер  $d_{ст}^{кан}$ , то именно он принимается к использованию в крепежной системе выемочной выработки. Если расчетное значение  $d^{кан}$  превышает стандартную величину  $d_{ст}^{кан}$  канатов, имеющихся в наличии, то увеличивается количество  $n^{кан}$  канатных анкеров на 1 п.м выработки по формуле

$$n^{кан} = 0,625 \frac{d^{кан}}{d_{ст}^{кан}}, \text{ шт/м,} \quad (4.15)$$

где  $d_{ст}^{кан}$  – диаметр канатного анкера, применяемого в конкретной выемочной выработке, мм.

Результаты многовариантных вычислительных экспериментов и их корреляционно-дисперсионный анализ позволили определить все параметры, необходимые для эффективного поддержания кровли выемочной выработки канатными анкерами.

В результате выполненных исследований сформулировано **второе научное положение**: Ресурсосберегающие условия равнопрочности элементов системы крепления выемочных выработок обеспечиваются стабильностью параметров расположения канатных анкеров (0,8 – 1,1 м от вертикальной оси выработки), их углов наклона к горизонтали (65 – 80°), а также параметрами размещения сталеполимерных анкеров: углы наклона изменяются по степенной зависимости от координат их установки, которые линейно связаны с параметром  $b_m^r$  и находятся в логарифмической зависимости от величины показателя  $b^r$ . Это позволяет в горно-геологических условиях шахт Западного Донбасса эффективно применять системы сталеполимерных и канатных анкеров для крепления выемочных выработках при повторном их использовании.

### 4.3 Методика расчета параметров комбинированной анкерной системы свода выемочных выработок на шахтах Западного Донбасса

Комплекс выполненных исследований создал все предпосылки, необходимые для разработки методики расчета и выбора параметров крепежной системы выемочных выработок в условиях интенсивной отработки угольных пластов на шахтах Западного Донбасса. Методика предусматривает следующую последовательность выполнения расчетов:

1. Группирование исходных данных, используемых при выполнении расчетов. Этот пункт нацелен на определение расчетного значения каждого из параметров, участвующих в вычислениях.

Группа геомеханических параметров включает:

- расчетная глубина  $H$  размещения выработки;
- среднее расчетное сопротивление сжатию  $R$  близлежащих пород кровли и почвы;
- мощность  $m_1^K$  и расчетное сопротивление сжатию  $R_1^K$  пород непосредственной кровли;
- мощность  $m_1^П$  и расчетное сопротивление сжатию  $R_1^П$  пород непосредственной почвы.

Перечисленные исходные параметры определяются по данным геологической службы шахты, исследованиям [58, 59] и нормативным документам [67, 68].

Группа горнотехнических параметров:

- типоразмер сечения выемочной выработки и ее крепи;
- ширина  $l_{ox}$  охранной системы;
- ширина  $B$  и высота  $h_g$  выработки в проходке.

Указанные исходные параметры определяются по нормативно-технической документации при составлении паспортов выемочного участка, проведения и крепления выемочных выработок.

Из механических характеристик крепежных материалов используется

предел текучести несущего стержня анкера, который определяется по справочным данным [17] в зависимости от применяемой марки стали завода-изготовителя анкеров.

2. Определение размеров области неустойчивых пород вокруг выемочной выработки характеризуется параметрами  $h$  и  $b_n^K$ . Высота свода  $h$  предельного равновесия рассчитывается по документу [67]. Ширина  $b_n^K$  области неустойчивых пород в кровле выработки вычисляется по формуле (4.9).

3. Выбор типа рамной крепи и расчет шага ее установки производится по документу [67] для участка выемочной выработки вне зоны влияния очистных работ.

4. Расчет параметров комбинированной анкерной системы в своде выемочной выработки производится по следующим позициям:

- сталеполимерные анкера в центральной части свода выработки;
- канатные анкера в непосредственной и основной кровле.

5. Расчет параметров размещения сталеполимерных анкеров в центральной части свода выработки.

Оценка целесообразности установки сталеполимерных анкеров для наиболее широко применяемых типоразмеров рамной крепи выемочных выработок осуществляется по величинам отношений  $b^r$  и  $b_m^r$  в соответствии с графиками на рис. 4.2, либо по формулам (4.4) – (4.6): при фактическом значении  $b^r$  меньше расчетного установка сталеполимерных анкеров в центральной части свода выработки не рекомендуется.

Координаты  $X_{1,2,3}$  установки сталеполимерных анкеров по контуру свода (расстояние по горизонтали от вертикальной оси выработки до хвостовика анкера;  $i$  – номер анкера по мере удаления от замка свода) определяются по формулам (4.1) – (4.3). Если вычисленная координата  $X_i$  превышает горизонтальную координату расположения замка податливости данного типоразмера рамной крепи, то эта пара сталеполимерных анкеров исключается их схемы их установки в своде выработки.

Угол наклона  $\beta_{1,2,3}$  сталепolyмерных анкеров к горизонтальной оси выработки рассчитывается по выражению (4.7) отдельно для каждой пары ( $i = 1, 2, 3$ ) симметрично размещенных анкеров. Диаметр «арматуры» сталепolyмерных анкеров в центральной части свода выработки рекомендуется принимать пониженных значений  $d_i = 15 - 18$  мм.

6. Выбор параметров канатных анкеров включает следующие позиции.

Установку канатных анкеров в поперечном сечении выработки рекомендуется осуществлять на расстоянии  $X^{кан} = 0,8 - 1,1$  м от ее вертикальной оси. Меньшие из значений интервала соответствует пониженному типоразмеру сечения, а верхняя граница интервала – повышенному типоразмеру сечения выработки.

Угол наклона канатных анкеров к горизонтали рекомендуется принимать  $\beta^{кан} = 65 - 80^\circ$ . Меньшее значение соответствует  $X^{кан} = 1,1$  м, большее  $X^{кан} = 0,8$  м.

В продольном сечении выработки канатные анкера устанавливаются с базовым шагом  $L^{кан} = 3,2$  м, то есть, в каждом четвертом межрамном пространстве. При усложнении горно-геологических условий производится расчет количества канатных анкеров на 1 п.м длины выработки по формуле (4.15) и принимается ближайшее большее целое число. Для проведения вычислений по формуле (4.15) рассчитывается требуемый диаметр канатных анкеров по формуле (4.14).

Длина канатного анкера определяется по формуле (4.11) с расчетом промежуточных параметров по формулам (4.12) и (4.13), в которые входят размеры свода предельного равновесия, вычисленные в пункте 2 настоящего алгоритма выбора рациональных параметров крепежной системы выемочной выработки.

7. Изложенный алгоритм расчета обеспечивает выбор рациональных параметров грузонесущих элементов комбинированной анкерной системы в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий поддержания свода выемочных выработок на шахтах Западного Донбасса.

#### 4.4 Результаты шахтных исследований состояния

##### 594 сборного штрека на экспериментальном участке установки комбинированной анкерной системы

В разделе 1 кратко отражены результаты обширных экспериментальных исследований проявлений горного давления в выемочных штреках, где использованы так называемые базовые схемы установки только сталеполимерных анкеров. Эти данные инструментальных наблюдений послужили основой для сравнительного анализа фиксируемых величин сдвижения породного контура 594 сборного штрека, закрепленного рекомендуемой комбинированной анкерной системой (рис. 4.6).

Эксплуатируемый в настоящее время 594 бортовой штрек используется первый раз при отработке 594 выемочного участка. В перспективе его планируется использовать повторно в качестве бортового штрека при ведении очистных работ на смежном выемочном участке. Схема крепления штрека приведена на рис. 4.6, в. В нижней части его длины расположен экспериментальный участок с рекомендуемой схемой крепления, показанной на рис. 4.6, г.

Поэтому, изучение состояния выработки проведено для двух схем крепления с построением графиков, отражающих зависимости изменения перемещений породного контура штрека и его рамной крепи по мере приближения и отхода 594 лавы от замерной станции в штреке. Во избежание неоднозначности описания и сравнительного анализа схема крепления основной протяженности штрека названа «базовой», а на экспериментальном участке – «рекомендуемой».

При базовой схеме крепления 594 сборного штрека установлены следующие особенности развития проявлений горного давления в процессе отработки 594 выемочного участка (рис. 4.7).

Величина сближения  $U_{h_1}$  пород кровли и почвы на всех исследуемых участках поддержания 594 сборного штрека оказалась стабильно ниже, чем в 590 и 592 сборных штреках при их первичном использовании. Так, на участке вне зоны влияния очистных работ вплоть до отметки  $z=44$  м значение  $U_{h_1} = 340 - 390$  мм, что в среднем на 20% меньше, чем в 590 сборном штреке и на 30% ниже, чем в 592 сборном штреке.

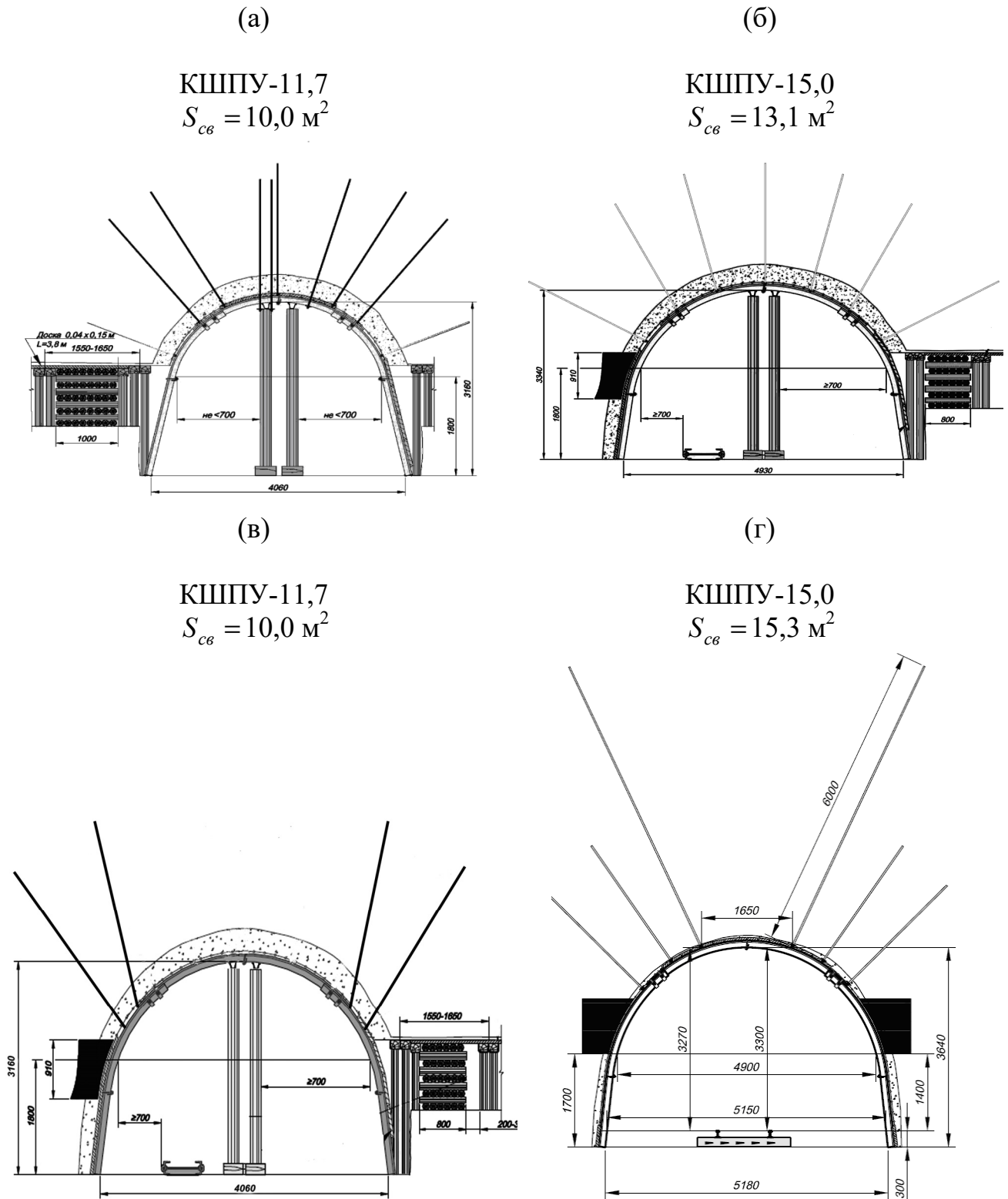
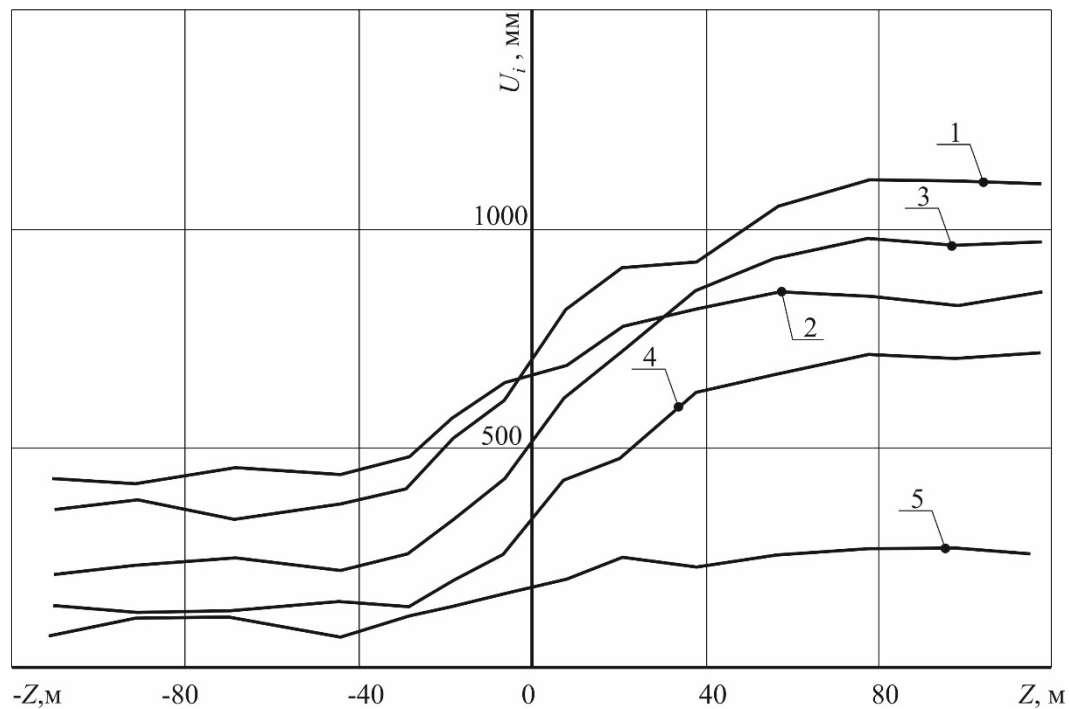


Рисунок 4.6 – Схемы поддержания выемочных штрехов: (а) 588 бортовой штрех; (б) 590 и 592 сборные штрехи; (в) 594 сборный штрех; (г) экспериментальный участок 594 сборного штреха

При вхождении фиксируемого сечения штрека в зону влияния очистных работ на участке от  $z = -44$  м до  $z = 78$  м происходит увеличение  $U_{h_1}$  с дальнейшей стабилизацией на уровне 1110 – 1120 мм; эти значения сближения кровли и почвы оказались на 21% ниже по сравнению с участком стабилизации горного давления позади 590 лавы и на 24% меньше, чем для 592 лавы.



$$1 - U_{h_1}; 2 - U_{e_1}; 3 - U_{c_1}; 4 - U_{c_2}; 5 - c_2 - c_1$$

Рисунок 4.7 – Зависимости перемещений  $U_i$  контура 594 сборного штрека от расстояния  $z$  до очистного забоя 594 лавы

Установленные факты могут быть интерпретированы как влияние изменения схемы расположения сталеполимерных анкеров, поскольку выработки поддерживаются примерно в одинаковых горно-геологических условиях. Схемы крепления отличаются тем, что в 594 сборном штреке сталеполимерные анкера концентрируются в районе пяты свода выработки (см. рис. 4.6, в) и более активно упрочняют боковые породы, служащие своеобразными опорами для опускающихся породных слоев кровли. Более устойчивые опоры ограничивают смещение пород кровли над выработкой с перераспределением части нагрузки на



отдаленные участки массива в боках штрека. Целостные породы в боках выработки, сопротивляясь вертикальному горному давлению, передают пониженную нагрузку на породы почвы штрека, что сдерживает в определенной степени развитие их пучения. В результате, ограничение опускания кровли и поднятия почвы позитивно сказывается на потере высоты 594 сборного штрека.

Вне зоны влияния очистных работ до отметки  $z = -44$  м сближение стоек рамы изменяется в диапазоне  $U_{e_1} = 420 - 460$  мм, что в среднем на 28% ниже, чем в 590 сборном штреке и на 40% – по сравнению с 592 сборным штреком. На участке стабилизации сдвижения надугольной толщи ( $z \geq 57$  м) сближение стоек увеличивается до 830 – 860 мм, но все равно остается меньше на 16% по отношению к  $U_{e_1}$  в 590 сборном штреке и на 32% – в 592 сборном штреке. Данный эффект ограничения сближения стоек рамы и боковых пород объясняется повышением устойчивости породных объемов в боковых частях непосредственной кровли. Создание упрочненной опоры в пяте свода штрека снижает концентрации напряжений в нижележащих породах непосредственной почвы и их боковые подвижки менее интенсивны.

Асимметрия деформирования рамы и изменения ее формы также становится менее интенсивной при создании сталеполимерными анкерами в боках выработки некоторого подобия упрочненных пород для поддержания породных слоев кровли. В качестве доказательства приведем данные смещений  $U_{c_1}$  и  $U_{c_2}$  по диагональным размерам  $c_1$  и  $c_2$  (см. рис. 2.12). Вне зоны влияния очистных работ смещение по диагонали  $c_1$  составляет 210 – 250 мм, что в среднем на 21% меньше, чем в 590 сборном штреке и в 2,61 раза меньше, чем в 592 сборном штреке. На участке от  $z = -44$  м до  $z = 78$  м наблюдается увеличение смещения  $U_{c_1}$  с переменным градиентом роста до величины 960 – 980 мм. Это значение  $U_{c_1}$  на 38% ниже по отношению к 950 сборному штреку и на 27% меньше, чем в 592 сборном штреке.

Изменение размера диагонали  $c_2$  имеет следующую закономерность. Вне

зоны влияния очистных работ до отметки  $z = -29$  м величина смещений по диагонали  $c_2$  изменяется в интервале  $U_{c_2} = 120 - 150$  мм, что в среднем ниже 17% по сравнению с 590 сборным штреком и на 60% по отношению к 592 сборному штреку. На участке активного влияния очистных работ (от  $z = -29$  м до  $z = 78$  м) наблюдается рост  $U_{c_2}$  разной интенсивности с дальнейшей стабилизацией значения на уровне  $U_{c_2} = 700 - 720$  мм. Эта величина в среднем ниже на 34%, чем в 590 сборном штреке и на 18% – по сравнению с 592 сборным штреком.

Степень асимметрии деформирования рамы, определяется по разнице диагональных размеров  $c_1 - c_2$ , изменяется от 70 – 120 мм вне зоны влияния очистных работ до 230 – 270 мм в зоне стабилизации проявлений горного давления. Средние отличия от 590 и 592 сборных штреков составляют соответственно: 25 и 63% вне зоны влияния очистных работ; 47 и 44% в зоне стабилизации проявлений горного давления.

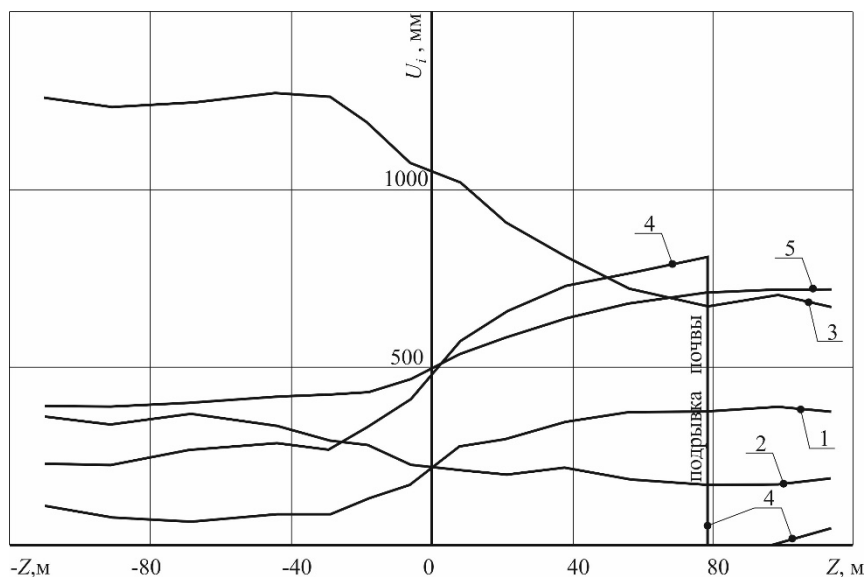
Таким образом, шахтные исследования показали преимущество схемы установки сталеполимерных анкеров в 594 сборном штреке по отношению к их размещению в 590 и 592 сборных штреках: все фиксируемые размеры указывают на ограничение сближений кровли и почвы, стоек рамы и ее диагональных размеров. В результате уменьшены потери сечения штрека и несущей способности рамы, что способствует более эффективному повторному использованию выработки.

Снижение интенсивности проявлений горного давления при измененной схеме установки анкеров в 594 сборном штреке подтверждают закономерности развития (по координате  $Z$ ) вспомогательных параметров оценки состояния выработки, которые приведены на рис. 4.8.

Замеры вертикальной асимметрии деформирования рамы (по разности высот  $h_2 - h_3$ ) дали следующие результаты:

– на участке вне зоны влияния очистных работ (до отметки  $z = -29$  м) разница  $h_2 - h_3$  изменяется в диапазоне 70 – 110 мм, что в среднем на 14% меньше, чем в 590 сборном штреке и на 42% ниже, чем в 592 сборном штреке;

– на участке стабилизации проявлений горного давления ( $z \geq 57$  м) вертикальная асимметрия составила 370 – 390 мм; ее среднее значение оказалось на 15% меньше, чем в 590 сборном штреке и на 22% ниже в сравнении с 592 сборным штреком.



$$1 - h_2 - h_3; 2 - v_1 - v_2; 3 - v_1 - v_3; 4 - U_{h_{4,5}}; 5 - a_{1,2}$$

Рисунок 4.8 – Закономерности изменения вспомогательных параметров оценки состояния 594 сборного штрека в зависимости от расстояния  $z$  до очистного забоя 594 лавы

Таким образом, установлен эффект снижения не только диагоналей, но и вертикальной асимметрии формы рамы при создании сталеполимерными анкерами упрочненной области в районе пяты свода, которая является более устойчивой опорой для опускающихся пород кровли штрека.

Параметр  $v_1 - v_2$ , определяющий степень изгиба нижней части стоек рамы, имеет более низкий градиент изменения в 594 сборном штреке по сравнению с предыдущими выработками:

– вне зоны влияния очистных работ (до отметки  $z = -44$  м) величина  $v_1 - v_2 = 330 - 370$  мм и всего на 50 – 90 мм меньше первоначальной (конструктивной) разницы, что указывает на небольшие горизонтальные подвижки боко-

вых пород, произошедшие за длительный период поддержания штрека от момента установки рам до съема показаний в данном сечении выработки. Для сравнения эти подвижки составили: в 590 сборном штреке – 80 – 110 мм, в 592 сборном штреке – 100 – 140 мм;

– в зоне стабилизации проявлений горного давления ( $z \geq 57$  м) разница  $v_1 - v_2$  снизилась до 170 – 190 мм, то есть, в среднем произошло ее уменьшение на 170 мм, или на упруго-пластические деформации изгиба нижней части каждой стойки приходится 85 мм.

Отмеченные перемещения можно оценить как умеренные, малосущественно изменяющие форму стоек. В сравнении с 590 и 592 сборными штреками снижение разницы размеров  $v_1 - v_2$  составило соответственно 32 и 29%, что указывает в пользу схемы размещения сталеполимерных анкеров, принятой для поддержания 594 сборного штрека.

Параметр  $v_1 - v_3$  характеризует изменение формы как верхней части, так и общей протяженности стоек рамы. Вне зоны влияния очистных работ  $v_1 - v_3 = 1240 - 1280$  мм и всего на 60 – 100 мм меньше первоначального значения, что указывает на ограниченные горизонтальные подвижки боковых пород в пределах конструктивной боковой податливости рамы. Начиная с отметки  $z = -29$  м до координаты  $z = 78$  м происходит постепенное снижение разницы  $v_1 - v_3$ , которое фиксирует развитие пластических деформаций стоек рамы. В зоне стабилизации проявлений горного давления параметр  $v_1 - v_3 = 660 - 700$  мм; то есть, в среднем произошло изменение параметра на 580 мм, что характеризует изгиб стоек (в среднем по 290 мм с каждой стороны) как достаточно существенный и меняющий в определенной степени их форму. С другой стороны, указанное изменение размера на 17% меньше, чем в 590 и 592 сборных штреках.

Оценивая в целом изменения параметров  $v_1 - v_2$  и  $v_1 - v_3$ , следует отметить ограничение горизонтальных подвижек боковых пород и изгиба стоек рамы по сравнению с крепежной системой 590 и 592 сборных штреков, поддерживаемых в примерно равноценных горно-геологических условиях.

Замеры поднятия почвы штрека  $U_{h_{4,5}}$ , хотя и обладают определенной погрешностью, но все же отмечают снижение интенсивности пучения по сравнению с 590 и 592 сборными штреками. Так, на участке вне зоны влияния очистных работ зафиксировано поднятие почвы в диапазоне 230 – 290 мм; эта величина в среднем ниже на 32% чем в 592 сборном штреке; сравнение с 590 сборным штреком произвести не удалось по причине выполнения подрывки на этом участке выработки. После прохода 594 лавы на расстояние  $z \geq 78$  м была осуществлена подрывка почвы, так как величина пучения к этой отметке достигла 810 мм. Тем не менее, это значение оказалось ниже на 16 и 21% по сравнению с величинами поднятия пород почвы до начала их подрывки в 590 и 592 сборных штреках соответственно.

Упрочнение сталеполимерными анкерами боковых объемов пород непосредственной кровли в районе замков податливости рамной крепи благоприятно сказывается на их состоянии и режиме работы. Так, длина нахлеста верхняка и стоек плавно увеличивается (по мере подхода и отхода 594 лавы) от исходной величины 390 – 420 мм до значения 700 – 720 мм, близкого к конструктивной вертикальной податливости рамы (см. график 5 на рис. 4.9). Существенных и регулярно встречающихся нарушений геометрии узлов податливости не наблюдается.

Причина достаточно удовлетворительного состояния и стабильной работы замков податливости рамы заключается в умеренном опускании пород кровли и верхняка рамы. При сравнении величин сближения кровли и почвы (график 1 на рис. 4.7) и поднятия почвы (график 4 на рис. 4.8) установлено, что на долю опускания кровли приходится всего 300 – 330 мм. Эта величина практически соответствует конструктивной вертикальной податливости рамы.

В результате шахтных наблюдений за состоянием 594 сборного штрека установлены позитивные факты снижения перемещений по всем фиксируемым размерам выработки, что снижает потери ее сечения и сохраняет несущую способность рамы на достаточно высоком уровне. Поэтому считаем предпочтительной схему установки сталеполимерных анкеров в 594 сборном штреке по

сравнению с параметрами сетки армирования пород непосредственной кровли в 590 и 592 сборных штреках.

На экспериментальном участке 594 сборного штрека применена комбинированная анкерная система в составе схемы крепления, показанной на рис. 4.6, з.

Таким образом, сочетание сталеполимерных и канатных анкеров создает упрочнение не только непосредственной, но и основной кровли, связывает породные слои в единую армопородную конструкцию большой мощности (не менее 4 – 5 м), способную воспринимать и сопротивляться повышенному горному давлению и, тем самым, защищать рамную крепь от чрезмерных нагрузок.

Сформированная армопородная плита расширяет площадь своих опор в боках выработки, а ее высокая несущая способность и жесткость позволяет не только снизить нагрузку на раму, но и уменьшить аномалии опорного давления, что ограничивает горизонтальные подвижки приконтурных пород в боках выработки и интенсивность развития пучения пород почвы.

При обследовании экспериментального участка 594 сборного штрека отмечено его удовлетворительное эксплуатационное состояние, как вне зоны, так и в зоне влияния очистных работ.

Вне зоны влияния очистных работ визуальные наблюдения (рис. 4.9) и замеры по вышеприведенной методике имеют следующие показатели. Форма рамы крепи КШПУ-15,0 и ее элементов (верхняка и стоек) практически не изменилась по сравнению с первоначально установленной, то есть, по всему контуру рамы пластические деформации отсутствуют; замки податливости рам не срабатывали и величина нахлеста верхняка и рамы также находится в исходном положении порядка 350 – 420 мм.

Это указывает на ограниченную нагрузку крепи рамы до начала ее податливого режима работы. Данные наблюдения косвенно указывают на высокую эффективность работы армопородной плиты в кровле штрека: ее несущая способность позволяет разгрузить рамную крепь от чрезмерного горного давления за счет восприятия на себя большей его части.



Рисунок 4.9 – Фрагмент состояния 594 сборного штрека на экспериментальном участке

Тем не менее, зафиксированы определенные изменения размеров штрека:

- высота  $h_1$  уменьшилась (по сравнению с проектной) на 140 мм, что связано с пучением пород почвы, поскольку видимых деформаций верхняка и срабатывания замков податливости рамы не наблюдалось;

- ширина выработки  $b_1$  по почве снизилась всего на 18 мм, что объясняется упругими деформациями рамы, а также ее обжатием и компенсацией зазоров и люфтов в замках податливости. Существенного бокового давления на стойки рамы не наблюдается, что обусловлено снижением интенсивности действия бокового опорного давления за счет расширения площади опоры породной плиты в кровле на породы в боках выработки;

- следует отметить превышение длины диагонали  $c_2$  над длиной диагонали  $c_1$  на 15 мм. Эта незначительная разница может быть истолкована двояко: погрешности монтажа рам или слабое влияние очистных работ в 594 лаве или практическое отсутствие асимметрии деформирования рамы, что обусловлено ее защитой от неравномерной нагрузки с помощью мощной армопородной пли-

ты в кровле;

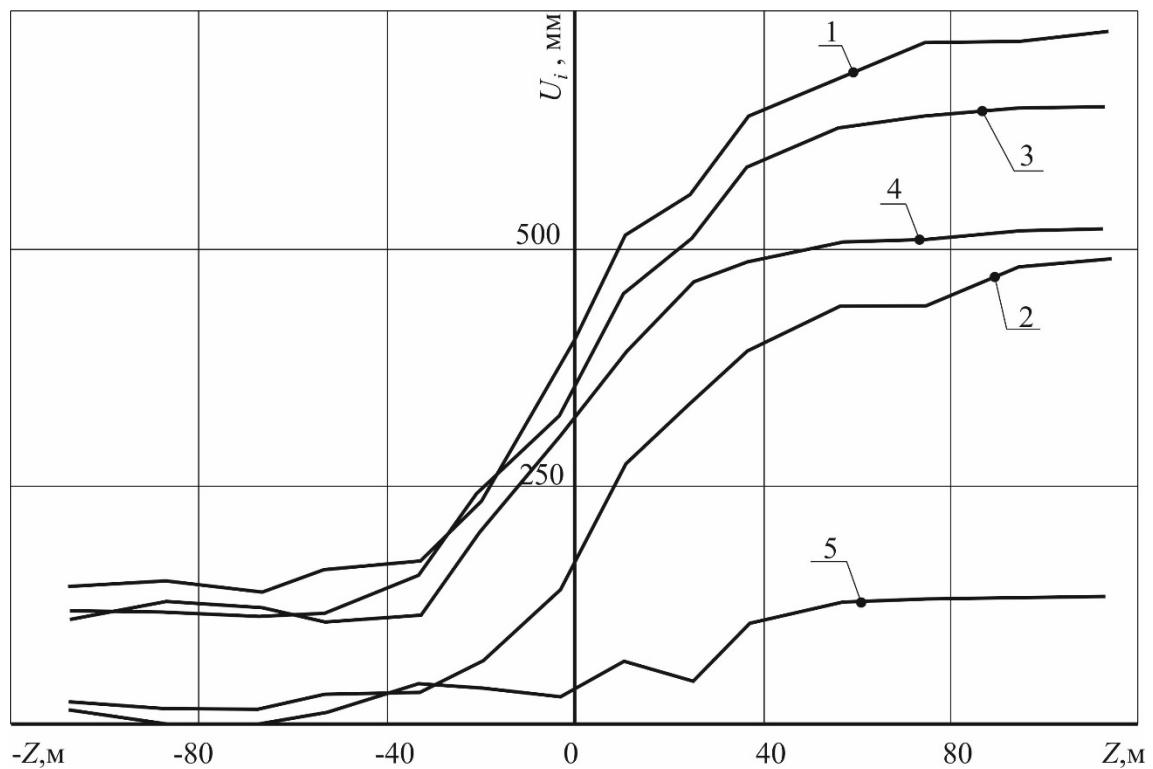
- нахлест в замках податливости рамы остался на проектном уровне;
- наблюдается умеренное пучение пород почвы, величину которого (до 100 – 150 мм) можно оценить лишь приблизительно ввиду некоторых трудностей выполнения замеров и достаточной их погрешности; пучение при небольшом опорном давлении в боках выработки обусловлено низким сопротивлением сжатию ( $\sigma_{сж} = 8,0$  МПа) алевролита непосредственной почвы во влагонасыщенном состоянии.

Отмеченные особенности проявлений горного давления отражены соответствующими графиками в крайней левой части рис. 4.10, характеризующими закономерности изменения геометрических параметров 594 сборного штрека в зависимости от расстояния  $z$  до очистного забоя 594 лавы.

Зависимость изменения высоты  $h_1$  штрека по мере подхода к замерной станции и отхода от нее очистного забоя характеризуется следующими особенностями. Вне зоны влияния очистных работ потеря высоты выработки относительно небольшая и колеблется в диапазоне  $U_{h_1} = 135 - 165$  мм вплоть до отметки  $z = -33$  м. Отмеченная величина сближения кровли и почвы находится в пределах конструктивной вертикальной податливости крепи КШПУ-15,0.

Влияние приближающейся лавы проявляться за 33 м до очистного забоя в части резкого повышения интенсивности смещений  $U_{h_1}$ : при  $z = 11$  м позади очистного забоя  $U_{h_1} = 515$  мм, а при  $z = 75$  м в начале зоны стабилизации процессов сдвижения надугольной толщи сближение кровли и почвы достигает значения 720 мм. При дальнейшем отходе лавы прирост  $U_{h_1}$  малозначительный и конечная величина сближения находится в пределах 720 – 730 мм.





$$1 - U_{h_1}; 2 - U_{e_1}; 3 - U_{c_1}; 4 - U_{c_2}; 5 - c_2 - c_1$$

Рисунок 4.10 – Зависимости перемещений  $U_i$  крепи и контура 594 сборного штрека от расстояния  $z$  до очистного забоя на экспериментальном участке 594 лавы

В последующем будет отделена доля поднятия пород почвы от общей величины сближения  $U_{h_1}$ , но при ее вероятном преимущественном развитии величина опускания кровли находится в пределах допустимых значений в 300 мм по фактору вертикальной конструктивной податливости рамы.

Таким образом, анализ закономерности сближения кровли и почвы позволяет оценить состояние рамной крепи и выработки в целом как вполне удовлетворительное.

Потеря высоты штрека составляет 20% и она снизится более, чем на половину при последующей подрывке пород почвы перед его повторном использованием. Визуальный осмотр состояния верхняков и стоек рам отмечает лишь отдельные случаи изменения их формы из-за пластических деформаций. Следовательно, по фактору снижения высоты 594 сборного штрека можно сде-

лать вывод об эффективной защите рамной крепи от чрезмерного горного давления с помощью армопородной плиты, сформированной в кровле комбинированной анкерной системой.

Горизонтальные сближения стоек рам  $U_{e_1}$  на уровне почвы штрека весьма незначительны (14 – 30 мм) на участке вне зоны влияния очистных работ. В начале зоны фронтального опорного давления на отметке  $z = -33$  м, наблюдается увеличение градиента роста  $U_{e_1}$  с максимальным развитием на участке от  $z = -3$  м до  $z = 11$  м. Далее происходит постепенное снижение темпов прироста  $U_{e_1}$  до отметки  $z = 95$  м, где сближение стоек рам достигло 480 – 490 мм; данную отметку следует считать началом зоны стабилизации проявлений горного давления. Здесь конечная величина потери ширины выработки составляет 9,5% и не создает каких-либо затруднений при выполнении технологических операций в процессе ведения очистных работ. Однако, параметр  $U_{e_1}$  более, чем в 2 раза превышает боковую конструктивную податливость стоек рамы. Наблюдается их изгиб в районе опор, который несущественно влияет на изменение формы рамы и снижение ее несущей способности.

В связи с изложенными результатами инструментальных и визуальных наблюдений можно сделать вывод о достаточно эффективном ограничении сближения боков выработки, которое достигается за счет понижения интенсивности действия опорного давления по причине расширения площади опоры армопородной плиты в кровле, сформированной комбинированной анкерной системой.

Вне зоны влияния очистных работ диагонали  $c_1$  и  $c_2$  малосущественно отличаются друг от друга:

- смещение  $U_{c_1}$  изменяется в интервале 112 – 120 мм вплоть до отметки  $z = -53$  м, а далее начинается постепенное снижение размера  $c_1$ ;
- смещение  $U_{c_2}$  достаточно постоянно до отметки  $z = -33$  м с колебаниями в интервале 105 – 125 мм;

– разность  $c_2 - c_1$  (график 5 на рис. 4.10) носит знакопеременный характер с минимальными отклонениями  $c_1$  и  $c_2$  друг от друга (на уровне от  $-13$  мм до  $+15$  мм) до отметки  $z = -50$  м.

Таким образом, вне зоны влияния очистных работ асимметрия деформирования рамы практически не наблюдается. По мере вхождения в зону фронтального опорного давления смещение  $U_{c_1}$  начинает интенсивно расти (с примерно постоянным градиентом на участке от  $z = -33$  м до  $z = 37$  м) вплоть до значения  $U_{c_1} = 580$  мм. Далее происходит выполаживание графика роста и примерно на расстоянии  $z = 75 - 80$  м наблюдается стабилизация перемещений на уровне  $640 - 650$  мм.

Аналогичные, но меньшей величины имеют место закономерности развития перемещений  $U_{c_2}$ . Здесь также практически постоянный градиент роста наблюдается на участке от  $z = -33$  м до  $z = 25$  м, на котором смещение возрастает до  $U_{c_2} = 465$  мм. При дальнейшем отходе лавы рост  $U_{c_2}$  замедляется и при  $z \geq 60 - 70$  м практически стабилизируется на уровне  $510 - 520$  мм.

Разница размеров диагоналей  $c_1$  и  $c_2$  постепенно увеличивается, начиная с отметки  $z = -50$  м, но, это увеличение до  $z = 25$  м характеризуется тем, что диагонали отличаются друг от друга всего на  $25 - 65$  мм. При  $z > 25$  м сначала происходит рост  $c_2 - c_1$  до  $125$  мм, а затем стабилизация величины асимметрии смещений на уровне  $130$  мм, начиная с  $z = 75$  м.

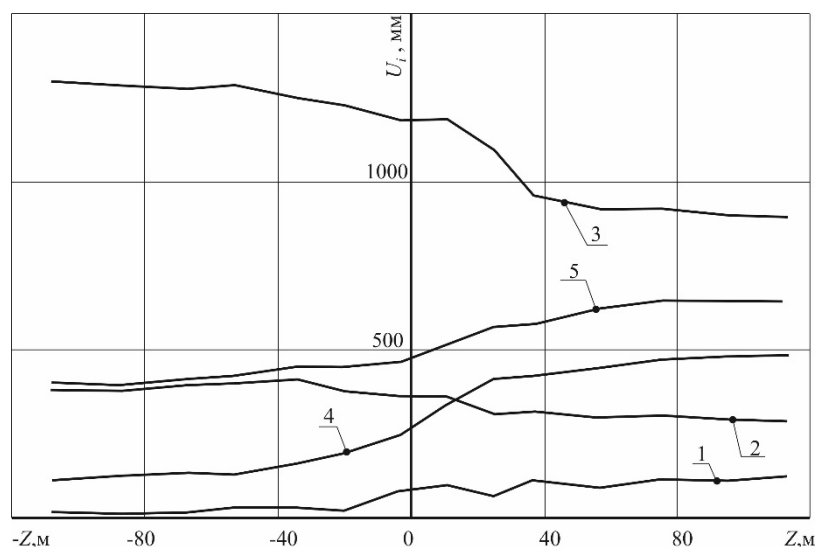
Приведенные результаты можно оценить двояко. Асимметрия деформирования рамы присутствует, но изменения ее формы происходят за счет срабатывания замков податливости у рабочего борта выработки без проявления каких-либо существенных пластических изгибов верхняка и стоек рам. При величине перемещений  $U_{c_1}$ ,  $U_{c_2}$  и их разнице имеет место неравномерное поднятие почвы по ширине выработки. Составляющая деформирования самой рамы характеризуется меньшей степенью асимметрии, чем зафиксировано нами в данных исследованиях. В любом случае уровень асимметрии деформирования рамы

(при использовании комбинированной анкерной системы) зафиксирован меньшей величиной, чем в других выемочных штреках, поддерживаемых в аналогичных горно-геологических условиях.

В целом, обобщая полученные результаты шахтных наблюдений, следует отметить удовлетворительное состояние 594 сборного штрека после прохождения 594 лавы, позволяющее без каких-либо ремонтно-восстановительных работ в отношении рамной крепи, боков и кровли повторно его использовать при отработке смежного выемочного участка. Позитивный результат достигнут благодаря применению комбинированной анкерной системы в кровле выработки.

Сформулированный вывод подтвержден результатами шахтных исследований закономерностей изменения названных нами «вспомогательных» параметров, к числу которых мы отнесли разницу  $h_2 - h_3$  вертикальных расстояний замков податливости до почвы выработки; разницу  $v_1 - v_2$  и  $v_1 - v_3$  горизонтальных размеров выработки по почве, на уровне нижней кромки пласта и на уровне его верхней кромки; величину  $U_{4,5}$  пучения пород почвы; длину нахлеста  $a_{1,2}$  верхняка и стойки рамы в замках податливости. Закономерности изменения этих параметров в зависимости от расстояния до лавы приведены на графиках рис. 4.11.

Разница размеров  $h_2 - h_3$  отражает степень асимметрии деформирования рамы в вертикальном направлении. Вне зоны влияния очистных работ этот параметр минимален и составляет всего 10 – 35 мм. Его низкая величина характеризует не асимметрию формы рамы, а некоторые погрешности при ее установке и неравномерность пучения почвы по ширине выработки. Начиная с отметки  $z = -20$  м происходит рост величины  $h_2 - h_3$ , но с низким градиентом. В результате при  $z \geq 37$  м параметр стабилизируется на уровне 90 – 120 мм.



$$1 - h_2 - h_3; 2 - v_1 - v_2; 3 - v_1 - v_3; 4 - U_{h_{4,5}}; 5 - a_{1,2}$$

Рисунок 4.11 – Зависимости изменения вспомогательных параметров оценки состояния выемочной выработки 594 лавы от расстояния  $z$  до очистного забоя

Столь низкая асимметрия рамы указывает на ее эффективную защиту мощной армопородной плитой, сформированной в кровле с помощью комбинированной анкерной системы.

Разница размеров  $v_1 - v_2$  и  $v_1 - v_3$  характеризует степень изменения формы стоек рамы и соответствующий уровень их пластических деформаций под воздействием боковых нагрузок от зоны бокового опорного давления.

На участке вне зоны влияния очистных работ параметр  $v_1 - v_2$  достаточно стабилен в пределах изменения 380 – 410 мм; это значение несколько ниже конструктивного (на 10 – 40 мм), что обусловлено предисторией нагружения рамы с ее обжатием и упругими деформациями. Начиная с отметки  $z = -34$  м проявляется действие фронтального опорного давления впереди 594 лавы, выражающееся в постепенном снижении разницы  $v_1 - v_2$  с последующей ее стабилизацией ( $z \geq 25$  м) в диапазоне 290 – 320 мм. В среднем параметр  $v_1 - v_2$  уменьшался на 90 мм, что указывает на опережающее смещение стойки в районе опоры по отношению к перемещениям стойки на высоте нижней кромки

пласта. Разница в 90 мм не столь существенна, но все же указывает на появление ограниченного изгиба стоек на участке по глубине нижней подрывки штрека.

Разница размеров  $v_1-v_3$  на участке вне зоны влияния очистных работ также стабильна (1280 – 1300 мм) и несколько ниже конструктивной (на 40 – 60 мм). Начиная с отметки  $z=-53$  м наблюдается снижение разницы  $v_1-v_3$  с практически постоянным градиентом вплоть до очистного забоя ( $z=-3$  м). Этот параметр имеет постоянное значение на участке до  $z=11$  м, что в немалой степени связано с демонтажом и последующим монтажом стоек в створе рабочего пространства лавы. Затем интенсивность снижения параметра  $v_1-v_3$  возрастает до отметки  $z=37$  м. Начиная с отметки  $z=57$  м, значение  $v_1-v_3$  стабилизируется на уровне 890 – 920 мм. Общее уменьшение параметра  $v_1-v_3$  составило 380 – 390 мм. Из этой величины доля боковой конструктивной податливости рамы составляет около 200 мм, а оставшиеся 180 – 190 мм приходятся на ограниченный пластический изгиб стоек. Изменение формы стоек характеризуется как ограниченное, поскольку по высоте порядка 3200 мм перемещение 90 – 95 мм не способно существенно исказить геометрию стойки. Отсюда можно сделать заключение об ограничении боковой нагрузки на стойки рамы, что является следствием снижения интенсивности бокового отжима пород. На это факт обращалось внимание при моделировании геомеханических процессов сдвига толщ пород в окрестности 594 сборного штрека. Считаем, что армопородная плита в кровле выработки расширяет площадь опоры на породы в ее боках, что неминуемо приводит к снижению концентраций напряжений в зонах опорного давления.

Этот же механизм проявляется и в ограничении пучения пород почвы штрека. Менее интенсивное действие опорного давления способствует сокращению объемов пород, выдавливаемых в полость выработки, что и зафиксировано при съеме показаний величины пучения  $U_{h_{4,5}}$ .

Вне зоны влияния очистных работ до отметки  $z=-43$  м поднятие почвы

изменяется в диапазоне 110 – 140 мм. При вхождении в зону фронтального опорного давления происходит величина поднятия почвы возрастает с переменным градиентом до отметки  $z=25$  м, где  $U_{h_{4,5}}=410$  мм. Далее интенсивность  $U_{4,5}$  снижается и при  $z \geq 80$  м величина пучения составляет 470 – 490 мм. Такое поднятие почвы затрудняет выполнение технологических операций, В зоне стабилизации процессов сдвижения породной толщи необходимо выполнить подрывку почвы на глубину не менее 0,5 м.

Несмотря на превышение технологически допустимой нормы пучения, следует отметить, что величина поднятия почвы в 594 сборном штреке ниже более чем в 2 раза пучения почвы в соседних выработках. Данные измерения подтверждают эффективность формирования в кровле штрека мощной армопородной плиты с помощью комбинированной анкерной системы.

Величина нахлеста  $a_{1,2}$  верхняка и стоек в замках податливости вне зоны влияния очистных работ соответствует конструктивным нормам и составляет 400 – 420 мм. Начиная с отметки  $z=-53$  м происходит слабовыраженный рост до 470 мм непосредственно перед очистным забоем. После прохода лавы величина срабатывания замков податливости увеличивается более интенсивно  $a_{1,2}=630 - 640$  мм ( $z=70 - 75$  м), а затем наблюдается стабилизация длины нахлеста на отмеченном уровне. Величина срабатывания (230 – 240 мм) находится в пределах конструктивных норм податливости крепи КШПУ-15,0 и не вызывает пластических деформаций ее элементов.

Таким образом, анализ результатов измерений вспомогательных параметров подтвердил достаточную эффективность работы армопородной плиты в кровле штрека по защите его рамной крепи от проявлений горного давления.

В сравнении с состоянием 594 сборного штрека на остальной своей длине (вне экспериментального участка) необходимо указать на следующие позитивные тенденции:

– сближение пород кровли и почвы снижено в 2,47 раза на участке вне зоны влияния очистных работ и на 35% в зоне стабилизации сдвижения пород-

ной толщи после прохода 594 лавы;

– сближение стоек рам (по почве штрека) вне зоны влияния очистных работ практически отсутствует на экспериментальном участке, а в зоне стабилизации проявлений горного давления снижение горизонтальных подвижек составило 43%;

– диагональный размер со стороны рабочего борта штрека сокращается на 49% вне зоны влияния очистных работ и на 34% на участке стабилизации проявлений горного давления; для диагонального размера со стороны нерабочего борта штрека снижение перемещений составило соответственно 15 и 27%;

– по указанным выше причинам асимметрия диагональных размеров снижена в 2 раза, что обусловило появление только малозначительных пластических деформаций верхняка и стоек с сохранением несущей способности рамной крепи в целом;

– уменьшение горизонтальных деформаций нижней части стоек рамы составило 11% вне зоны влияния очистных работ и 40% в зоне стабилизации сдвижений надугольной толщи; соответствующее сокращение деформаций изгиба стоек по всей их высоте достигает 3% вне зоны влияния очистных работ и 34% в зоне стабилизации проявлений горного давления;

– величина поднятия почвы сокращена в 2 раза на участке вне зоны влияния очистных работ и на 41% в зоне стабилизации сдвижений надугольной толщи;

– состояние замков податливости и режим их работы вполне удовлетворительный за исключением ограниченного количества отдельных нарушений.

Результаты шахтных исследований 594 сборного штрека при установке комбинированной анкерной системы позволили получить многопараметрические доказательства. Определена база показателей по кардинальному ограничению проявлений горного давления за счет комбинированного упрочнения пород кровли сталеполлимерными и канатными анкерами. Состояние экспериментального участка 594 сборного штрека (при выполнении соответствующей подрывки пород почвы) полностью соответствует эксплуатационным нормам и



правилам для успешного его повторного использования в качестве бортового при отработке смежного выемочного участка.

#### Выводы к разделу 4

1. Многовариантными расчетами доказана эффективность использования канатных анкеров в крепежной системе выемочных выработок, которые обладают многофункциональностью работы по «глубинному» упрочнению пород кровли, повышению устойчивости рамной крепи и интенсификации концевых операций в районе сопряжения лавы с выемочной выработкой.

2. Установлено, что на координаты установки сталеполимерных анкеров влияет отношение  $b_m^r$ . С увеличением крепости породы кровли нагрузка на анкера снижается, и их количество целесообразно уменьшать, что соответствует увеличению расстояния между анкерами (смещению координат их установки от замка к пяте свода).

3. Разработаны рекомендации и получены расчетные выражения по выбору всех необходимых параметров установки комбинированной анкерной системы.

4. Определена область целесообразного размещения сталеполимерных анкеров в центральной части свода выемочной выработки, а также связь угла  $\beta_i$  наклона сталеполимерного анкера с координатой  $x_i$  его установки в своде выемочной выработки при разных значениях параметра  $b^r$ .

5. Разработанная методика расчета параметров каждого грузонесущего элемента рекомендуемых крепежных систем по упрочнению свода выемочных выработок, что повышает интенсивность отработки угольных пластов на шахтах Западного Донбасса.

6. Обоснована доказательная база кардинального ограничения проявлений горного давления за счет формирования в кровле мощной армопородной плиты с помощью комбинированной анкерной системы, которая обеспечивает защиту рамной крепи от чрезмерных нагрузок и создает условия для повторного использования выемочных штреков без существенных ремонтно-

восстановительных работ.

7. Шахтные инструментальные наблюдения за состоянием 594 сборного штрека показали преимущество комбинированной анкерной системы (по сравнению с базовой схемой крепления) по поддержанию выработки в надлежащем эксплуатационном состоянии с целью ее повторного использования:

– вне зоны влияния очистных работ размеры штрека практически соответствуют исходным, а небольшая потеря сечения (до 3 – 4%) обусловлена поднятием пород почвы;

– по совокупности закономерностей изменения фиксируемых размеров выработки установлено, что влияние очистных работ впереди лавы начинается на расстоянии 30 – 50 м, а позади очистного забоя стабилизация процессов сдвижения надугольной толщи наступает на расстоянии 60 – 80 м;

– наиболее активные смещения породного контура и рамной крепи штрека происходят в зоне влияния очистных работ на участке протяженностью 90 – 130 м; здесь сближение кровли и почвы достигает 720 – 730 мм, однако, большую его часть составляет поднятие почвы, в результате чего опускание пород кровли находится в пределах конструктивной податливости и не провоцирует возникновение пластических деформаций в верхняке; состояние и работа замков податливости вполне удовлетворительное;

– зафиксирована небольшая асимметрия деформирования рамы в интервале 90 – 130 мм, которая, тем не менее, не способна существенно изменить ее форму и снизить несущую способность;

– сближения стоек рам достигает 480 – 490 мм, что более, чем в 2 раза превышает их боковую конструктивную податливость, а потеря ширины выработки составляет 9,5%; тем не менее, указанные сдвиги боков штрека не создают каких-либо затруднений при выполнении технологических операций очистной выемки;

– состояние стоек рам оценивается как удовлетворительное с минимальным изменением их формы (разница горизонтальных перемещений по длине стойки порядка 3200 мм составила до 180 – 190 мм) и относительно незначи-

ми участками пластических деформаций, что сохраняет несущую способность крепи КШПУ-15,0 практически на ее паспортном уровне;

– замки податливости работают в штатном режиме в пределах допускаемых смещений.

8. Разработанная методика выбора параметров комбинированной анкерной системы и рамной крепи использована на шахтах Западного Донбасса при разработке технической документации на проведение и поддержание повторно используемых выемочных штреков. Фактический экономический эффект от реализации результатов исследований по ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» составил 3,1 млн грн и ПСП «Шахтоуправление Терновское» – 38,719 млн грн (за 1-е полугодие 2015 г.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой на основе новых установленных закономерностей изменения напряженного состояния пород вокруг выемочной выработки от геомеханических факторов и расположения сталеполимерных и канатных анкеров в системе комбинированного крепления обоснованы технологические параметры использования выемочных выработок повторно, что является важной научно-технической задачей для горнодобывающей промышленности Украины.

1. Установлено, что в близлежащих породах кровли посредством комбинации канатных и сталеполимерных анкеров формируется армопородная плита, высокая грузонесущая способность которой достигается за счет сохранения горизонтальных усилий распора даже в условиях разбиения слоев кровли на породные блоки. За счет образования распорной системы в кровле снижаются концентрации всех компонент напряжений до уровня, многократно ниже прочностных характеристик литотипов, а появление растягивающих вертикальных и горизонтальных напряжений носит исключительно локальный характер. Поэтому мощная армопородная плита в кровле предохраняет крепежную систему выемочной выработки от чрезмерного вертикального горного давления.

2. Обоснована геомеханическая модель вычислительного эксперимента систем крепления выемочных выработок сталеполимерными и канатными анкерами, которая позволила установить формирование армопородной плиты, противодействующей горному давлению с коэффициентом концентрации интенсивности напряжений не более 2,0. Это обеспечивает целостное состояние большей части боковых пород кровли и угольного пласта, снижая концентрацию напряжений и расширяя площадь опоры армопородной плиты в кровле выработки, что позволит установить закономерности разделения напряженно-деформированного состояния комбинированной анкерной системы в своде выемочной выработки.

3. Установлены закономерности влияния глубины размещения выработки, среднего расчетного сопротивления сжатию близлежащего массива пород, отношения расчетного сопротивления сжатию пород непосредственной кровли к ее мощности на степень нагрузки системы сталеполимерных и канатных анкеров. Обоснован критерий оценки уровня сопротивления анкеров в составе комбинированной системы, который использован для установления наиболее влияющих геомеханических факторов.

4. Впервые установлена зависимость координат установки и угла наклона сталеполимерных анкеров в своде выемочной выработки от интенсивности проявления горного давления при его учете в породах непосредственной кровли в зависимости от мощности вынимаемого пласта. Снижение концентраций напряжений и размеров областей разупрочнения пород в боках выработки благоприятно сказывается на уровне напряженности пород почвы – области ее вероятного разупрочнения сокращаются. Уточнен диапазон изменения параметров установки канатных анкеров в составе комбинированной системы в зависимости от типоразмера сечения выемочной выработки.

5. Обоснован критерий оценки уровня сопротивления анкеров в составе комбинированной анкерной системы, который использован для установления наиболее влияющих геомеханических факторов в части степени нагруженности системы: глубина размещения выработки, среднее расчетное сопротивление сжатию близлежащего массива пород, отношение расчетного сопротивления сжатию пород непосредственной кровли к ее мощности. Таким образом, повышенная загруженность элементов комбинированной анкерной системы защищает рамную крепь от горного давления, что способствует снижению потерь сечения выемочной выработки.

6. Установлены закономерности нагруженности (дифференцированно) анкеров в составе комбинированной крепежной системы от основных влияющих геомеханических факторов. Установлена величина градации уровня сопротивления анкеров горному давлению: максимум противодействия создают канатные анкера, установленные со стороны выработанного пространства; мини-

мум – сталеполимерные анкера. Выявлена закономерность увеличения реакции сопротивления сталеполимерных анкеров по мере изменения координат их установки в направлении периферийных участков верхняка рамной крепи. Полученные результаты стали основой для обоснования рациональных параметров комбинированной анкерной системы.

7. Впервые установлены зависимости изменения относительной длины  $\Delta$  и  $\Delta_{л,м}^{кан}$  участков пластического состояния несущего элемента анкера от среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  близлежащего массива. Уточнен критерий оценки уровня сопротивления сталеполимерных и канатных анкеров в комбинированной системе от глубины размещения выработки и параметров  $b^r$  и  $b_m^r$ . Получены расчетные выражения, определяющие все необходимые параметры упрочнения кровли выемочных выработок комбинированной анкерной системой: координаты установки анкеров, углы их наклона, диаметр несущего стержня и длина анкера. Также обоснована граница областей целесообразного применения сталеполимерных анкеров.

8. Шахтные исследования проявлений горного давления в выемочных выработках, закрепленных рекомендуемой комбинированной анкерной системой, доказали ее преимущества в сравнении с традиционным опорно-анкерным креплением, которые заключаются в следующем:

- сближение пород кровли и почвы снижено на 35%, сближение стоек рам уменьшилось на 43%, смещения по диагональному размеру со стороны рабочего борта выработки сократились на 34%, со стороны нерабочего борта – на 27%;

- асимметрия диагональных размеров снижена в 2 раза, а вертикальных – в 3,62 раза;

- величина поднятия пород почвы сокращена в 1,5 – 2 раза.

9. Разработана и утверждена ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» и ГВУЗ «НГУ» «Методика расчета крепежной системы участков выработок шахт Западного», позволяющая реализовать ресурсосберегающие условия поддержания повторно используемых выемочных выработок. Фактический экономиче-

ский эффект от реализации результатов исследований по ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» составил 3,1 млн грн и ПСП «Шахтоуправление Терновское» – 38,719 млн грн (за 1-е полугодие 2015 г.).

## ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баришніков А.С. Закономірності деформування системи «кріплення – масив» у слабких породах у зоні впливу очисних робіт: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.01 «Маркшейдерія» / А.С. Баришніков. – Дніпропетровськ, 2016. – 20 с.
2. Estimate of efficiency of two-level rock bolting at junctions in coal mines / P. Grechishkin, A. Pozolotin, D. Zayatdinov [et al.] // Gornyi Zhurnal. – 2015. – #8. P. 48 – 52.
3. Analysis of yielding steel arch support with rock bolts / T. Majcherczyk, Z. Niedbalski, P. Malkowski [et al.] // Journal of Mining Science. – 2014. – #59(3). – P. 641 – 654.
4. Stress evolution in roadway rock bolts during mining in a fully mechanized longwall face, and an evaluation of rock bolt support design / K. Zhang, G. Zhang, R. Hou [et al.] // Rock mechanics and rock engineering. – 2015. – #48(6). – P. 2421 – 2433.
5. Maghous S. Three-dimensional numerical simulation of rock deformation in bolt-supported tunnels: a homogenization approach / S. Maghous, D. Bernaud // Tunn. Undergr. Space Technol. – 2015. – #31. – P. 68 – 79.
6. Gao F.Q. Effect of pre-tensioned rock bolts on stress redistribution around a roadway – insight from numerical modeling / F.Q. Gao, H.P. Kang // J China Univ. Min. Technol. – 2008. – #18(4). – P. 509 – 515.
7. Fengshan Han. Study on Rock Bolt Support of Roadway of Coal Mine using Neural network / Han Fengshan, Wu Xinli // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 448 – 453. – P. 3799 – 3802.
8. Gale W.J. Computer Simulation of ground behavior and rock bolt interaction at Emerald Mine / W. Gale, C. Mark, D. Oyler // In Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Ground Control in Mining, 3 – 5 August 2004. – West Virginia University, 2004. – P. 27 – 34.
9. Systematic monitoring of the performance of anchor systems in fractured rock masses / HY. Sun, LNY Wong [et al.] // Int. J Rock Mech. Min. Sci. – 2010. –



#47(6). – P. 1038 – 1045.

10. Jayanthu S. Behavior in Development and Depillaring workings supported with Roof Bolt and Cable Bolts / S. Jayanthu, V. Venkateswarlu // Strata, Short Term Course on – Trends in Strata Control Techniques & Instrumentation for Enhancing Safety in Coal Mines, 28 – 31 July 2008. – Mining Dept. NIT Rourkela. – 2008. – P. 145 – 153.

11. Chen Y. Discussion on bolt and cable supporting technique of the complex roof / Y. Chen, X. Yu, J. Bai // Energy Technology and Management. – 2005. – #6. – 6 – 7.

12. Kang H. Rock bolting theory and complete technology for coal roadways / H. Kang, J. Wang // China Coal Industry Publishing House. – 2007. – P. 13 – 28.

13. Composite element model of the fully grouted rock bolt / S. Chen, S. Qiang [et al.] // Rock Mech. Rock Eng. – 2004. #37(3). – P. 193 – 212.

14. Xiu Z. Rockbolting in Gateroads of Top Coal Caving Longwall Faces / Z. Xiu, J. Jiang // Aachen International Mining Symposium. – 2004. – P. 195 – 210.

15. Дарков А.В. Строительная механика: монография / А.В. Дарков, В.И. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1962. – 744 с.

16. Соппротивление материалов: учебник / под общ. ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1979. – 696 с.

17. Борисов А.А. Новые методы расчета штанговой крепи: монография / А.А. Борисов. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 64 с.

18. Семевский В.Н. Штанговая крепь: монография / В.Н. Семевский. – М.: Недра, 1965. – 328 с.

19. Гелескул М.Н. Справочник по креплению капитальных и подготовительных горных выработок: справочник / М.Н. Гелескул, В.Н. Каретников. – М.: Недра, 1982. – 479 с.

20. Геомеханика нагружения и расчет параметров крепежной и охранной систем подготовительных выработок шахт Западного Донбасса: монография / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А. и др.]. – Д.: Лізунов-Прес, 2014. – 228 с.

21. Ковалевская И.А. Экспериментальные исследования перемещений опор стоек крепи пластовой выработки / И.А. Ковалевская, В.Н. Почепов, А.Р. Мамайкин // Школа подземной разработки: материалы III междунар. науч.-практ. конф. – Д.: ЛізуновПрес, 2009. – С. 392 – 397.

22. Краев Ю.К. Оперативный способ увеличения несущей способности крепи, взаимодействующей со слабыми породами / Ю.К. Краев, М.В. Корнилов // Строительство шахт, рудников и подземных сооружений. – Свердловск: СГИ. – 1988. – С. 39 – 43.

23. Байкенжин М.А. Разработка способа поддержания пластовых подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт податливой рамно-анкерной крепью: автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.15.02 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» / М.А. Байкенжин. – Алма-Ата, 1987. – 19 с.

24. Егоров С.И. Обобщение опыта крепления и охраны подготовительных выработок / С.И. Егоров, Ю.М. Халимендик, Э.П. Курченко и др. // Уголь Украины. – 2002. – № 5. – С. 19 – 21.

25. Касьян Н.Н. О перспективах применения анкерной крепи на угольных шахтах Донбасса / Н.Н. Касьян, Ю.А. Петренко, А.О. Новиков // Научные труды ДонНТУ. – 2009. – № 10. – С. 109 – 115.

26. Кулешов Е.С. Оценка состояния выработок с анкерной крепью на шахтах Российского Донбасса (проблемы и решения) / Е.С. Кулешов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 2. – С. 174 – 177.

27. Якоби О. Практика управления горным давлением: монография / О. Якоби. – М.: Недра, 1987. – 566 с.

28. Черняк И.Л. Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт: учебник / И.Л. Черняк. – М.: Недра, 1984. – 304 с.

29. Kravets V. Increasing stability of underground mine workings by forming new geotechnical properties of adjoining layers via roller compaction / V. Kravets, S. Zaychenko, G. Gayko // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – 10(1), 44 – 49.

30. Исследование скорости подвигания на работу лав / Н.И. Лобков, А.К. Носач, Л.Л. Бачурин [и др.] // Проблемы механики горно-металлургического комплекса. – Д.: НГУ, 2002. – С. 178 – 180.

31. Оценка влияния скорости подвигания очистного забоя на вмещающие боковые породы / М.А. Ильяшов, Н.И. Лобков, Е.Н. Халимендигов [и др.] // Уголь Украины. – 2008. – № 8. – С. 11 – 13.

32. Лобков Н.И. Геодинамическое обоснование характера обрушения кровли в очистных забоях / Н.И. Лобков, В.В. Порубай // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: ИФГП НАНУ, 2004. – Вып. № 7 – С. 181 – 187.

33. Progressive method of anchor-concrete support of capital mine workings and tunnels / V.G. Kravets, G.I. Gaiko, S.V. Zaichenko [et al.] // Mining of Mineral Deposits. – 2015. – 9(3). – 307 – 312.

34. Комиссаров С.Н. Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок / С.Н. Комиссаров. – М.: Недра, 1983. – 237 с.

35. Свистун Р.Н. Обоснование и расчет параметров крепежной системы выемочных выработок с учетом асимметрии ее нагружения: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.15.02 / Свистун Руслан Николаевич. – Д., 2014. – 171 с.

36. Ryabtsev O. Studies of stationary supporting zone sizes varied in the course of mining operations in deep horizons / O. Ryabtsev, O. Voloshyn, // Mining of Mineral Deposits. – 2013. – 71 – 77.

37. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.

38. Зборщик М.П. Охрана выработок глубоких шахт в зоне разгрузки / М.П. Зборщик, В.В. Назимко. – К.: Техніка, 1991. – 248 с.

39. Свистун Р.Н. Прогноз и оценка достоверности расчета перемещений контура пластовой выработки / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Свистун Р.Н.] // Геотехническая механика: сб. науч. трудов ИГТМ НАН Украины. – Д., 2009. – Вып. 83. – С. 35 – 48.

40. Булат А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Д.: ИГТМ НАН Украины, 2002. – 372 с.

41. Бесцеликовая отработка пластов / [Худин Ю.Л., Устинов М.И., Брайцев и А.В. др.]. – М.: Недра, 1983. – 280 с.

42. Повышение устойчивости подготовительных выработок угольных шахт / [Заславский И.Ю., Компанец В.Ф., Файвищенко А.Г., Клещенков В.Н.]. – М.: Недра, 1991. – 235 с.

43. Борзых А.Ф. Поэтапное проведение и поддержание прилегающей к лаве выработки / А.Ф. Борзых, В.И. Липкович, А.И. Рачев // Уголь Украины. – 2002. – №7. – С. 20 – 21.

44. Заславский И.Ю. Проявления горного давления в выемочных выработках, охраняемых жесткими литыми полосами / И.Ю. Заславский, А.Г. Файвищенко // Напряжения и деформации в массивах горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: ИПКОН АН СССР, 1988. – С. 122 – 128.

45. Зборщик М.П. Сохранение устойчивости подготовительных выработок высоконагруженных лав при отработке пологих пластов / М.П. Зборщик, А.В. Костенко // Уголь Украины. – 2003. – №4. – С. 7 – 11.

46. Медяник В.Ю. Обоснование параметров способа охраны подготовительных выработок при комбинированной системе разработки пологих пластов на больших глубинах: автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.15.02 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» / В.Ю. Медяник. – Д.: НГУ, 2005. – 17 с.

47. Лозовский С.П. Обоснование параметров способа повышения устойчивости подготовительных выработок с пучащей почвой в зоне влияния очистных работ. автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.15.02 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» / С.П. Лозовский. – Д.: НГУ, 2004. – 16 с.

48. Слесарев В.Д. Управление горным давлением при разработке угольных пластов Донецкого бассейна / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1952. – 379 с.

49. Расчет напряжений в зонах влияния целиков и краевых частей смежных пластов свиты / В.В. Зубков, И.А. Зубкова, А.М. Линьков [и др.] // Разработка месторождений полезных ископаемых. – К., 1982. – №63. – С. 48 – 54.

50. Рябцев О.В. Численное моделирование процесса разрушения горных пород / О.В. Рябцев, А.И. Волошин, Ю.А. Морозов // Уголь Украины. – 2016. – №8. – С. 39 – 43.

51. Экспериментальные исследования устойчивости повторно используемых выемочных выработок на пологих пластах Донбасса / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А. и др.]. – Д.: ЛізуновПрес, 2012. – 426 с.

52. Геомеханика нагружения крепи очистных и подготовительных выработок в слоистом массиве слабых пород / [В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.Г. Черватюк]. – Д.: ЛізуновПрес, 2012. – 236 с.

53. Экспериментальные исследования пучения пород почвы подготовительных выработок на пологих пластах Донбасса / [В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.Г. Снигур]. – Д.: ЛізуновПрес, 2012. – 224 с.

54. Взаимодействие грузонесущих элементов крепежной системы выемочных выработок «массив – рама – анкер» / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А. и др.]. – Д.: Літограф, 2015. – 214 с.

55. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов / И.В. Баклашов. – М.: Недра. 1988. – 270 с.

56. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1982. – 272 с.

57. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.

58. Усаченко Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок / Б.М. Усаченко. – К.: Наукова думка, 1979. – 136 с.

59. Усаченко Б.М. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизированных породах / Б.М. Усаченко, В.Н. Чередниченко, И.Е. Головчанский. – К.: Наукова думка, 1990. – 144 с.

60. Ержанов Ж.С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород / Ж.С. Ержанов, Т.Д. Каримбаев. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 238 с.
61. Амусин Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Б.З. Амусин, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 144 с.
62. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
63. Развитие научных основ повышения устойчивости горных выработок шахт Западного Донбасса / [Бондаренко В.И., Мартовицкий А.В., Ковалевская И.А., Черватюк В.Г.]. – Д.: ЛізуновПрес, 2010. – 340 с.
64. Методы расчета перемещений и упрочнения приконтурных пород горных выработок шахт Западного Донбасса / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А. и др.]. – Д.: Підприємство «Дріант», 2010. – 328 с.
65. Барон Л.И. Определение свойств горных пород / Барон Л.И., Логунцов Б.М., Позин Е.З. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 232 с.
66. Свойства горных пород и методы их определения / [Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф.]. – М.: Недра, 1969. – 232 с.
67. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. – К: Мінвуглепром України, 2007. – 113 с.
68. Инструкция по поддержанию горных выработок на шахтах Западного Донбасса. – СПб. – Павлоград: ВНИМИ – ЗДНПЦ «Геомеханика», 1994. – 95 с.
69. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга 2. Предельное и запредельное состояние системы «порода – крепь» / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Фомичев В.В.]. – Д.: Системные технологии, 2007. – 198 с.
70. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
71. Геомеханика взаимодействия анкерной и рамной крепей горных выработок в единой грузонесущей системе / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А.,

Симанович Г.А. и др.]. – Д.: ЛізуновПрес, 2010. – 174 с.

72. Мельников Н.И. Анкерная крепь / Н.И. Мельников. – М.: Недра, 1980. – 252 с.

73. Симанович Г.А. Управление режимами взаимодействия породного массива с крепью горных выработок на основе регулирования ее деформационно-силовой характеристикой: дисс. ... доктора техн. наук: 05.15.04; 05.15.11 / Симанович Геннадий Анатольевич. – Д., 1993. – 408 с.

74. Ковалевская И.А. Геомеханика управления устойчивостью пространственной системы «массив – упрочненные породы – крепь подземных выработок»: дисс. ... доктора техн. наук: 05.15.02 / Ковалевская Ирина Анатольевна. – Д., 2004. – 349 с.

75. Совершенствование способов охраны подготовительных выработок: монография / [Симанович А.М., Сребный М.А., Малов В.И., Белинский И.Л.]. – Донецк: Донбасс, 1973. – 121 с.

76. Симанович А.М. Охрана выработок на глубоких горизонтах: монография / А.М. Симанович, М.А. Сребный. – М.: Недра, 1976. – 144 с.

77. Скипочка С.И. Геомеханика охраны выемочных штреков в неустойчивых породах: монография / Скипочка С.И., Мухин А.В., Черватюк В.Г. – Д.: НГА Украины, 2002. – 125 с.

78. Ковалевская И.А. Взаимодействие анкерной и комбинированной крепей с породным массивом и разработка метода расчета их рациональных параметров: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.15.02; 05.15.11 / Ковалевская Ирина Анатольевна. – Д.: ГГАУ, 1995. – 200 с.

79. Круковський О.П. Наукові основи технології опорно-анкерного кріплення гірничих виробок вугільних шахт: автореф. дисс. ... доктора техн. наук: спец. 05.15.02 «Підземна розробка родовищ корисних копалин» / О.П. Круковський. – Д., 2012. – 36 с.

80. Симанович Г.А. Определение нагрузок на крепь выемочного штрека в зоне влияния очистных работ / Г.А. Симанович, П.П. Небатов // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 5. – С. 43 – 46.

81. Байсаров Л.В. Геомеханика и технология поддержания повторно используемых горных выработок: монография / Байсаров Л.В., Ильяшов М.А., Демченко А.И. – Д.: ЧП «Ли́ра ЛТД», 2005. – 240 с.

82. Охрана штреков литыми полосами при разработке пологих пластов средней мощности / М.А. Ильяшов, М.П. Зборщик, А.А. Яйцов [и др.] // Уголь Украины. – 2001. – № 9. – С. 3 – 6.

83. Фомичев В.В. Определение изменения несущих характеристик элементов крепи штрека при его надработке в условиях мелкослоистого породного массива / В.В. Фомичёв, В.А. Соцков, А.С. Гусев // Розробка родовищ: щорічн. наук.-техн. зб. – Д.: ЛізуновПрес, 2014. – С. 399 – 407.

84. Симанович Г.А. К вопросу нагружения крепи очистных комплексов в сложных горно-геологических условиях / Г.А. Симанович, Д.О. Астафьев, А.С. Гусев // Розробка родовищ: щорічн. наук.-техн. зб. – Д.: ЛізуновПрес, 2013. – С. 81 – 85.

85. Обоснование и расчет канатных анкеров в крепежной системе выемочных выработок / И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, А.С. Гусев [и др.] // Уголь Украины. – 2014. – № 12. – С. 30 – 33.

86. Исследование и расчет боковых анкеров, устанавливаемых на высоте подрывки кровли выемочных выработок / И.А. Ковалевская, А.В. Малыхин, А.С. Гусев [и др.] // Розробка родовищ: щорічн. наук.-техн. зб. – Д.: ЛізуновПрес, 2015. – С. 313 – 317.

87. Anchor's strengthening of rock walls of extraction mine workings / I. Kovalevska, O. Malykhin, O. Gusiev [etc.] // New Developments in Mining Engineering: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining. – The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2015. – P. 5 – 8.

88. Взаимодействие грузонесущих элементов крепежной системы выемочных выработок: монография / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Гусев А.С. и др.]. – Д.: Літограф, 2015. – 214 с.

89. Formation of limit equilibrium zone in marginal rocks of excavation mine working / I. Kovalevska I., G. Symanovych, O. Gusiev [etc.] // Materialy Szkoły



Eksploatacij Podzemnej-2015. – [Electronic resource] 1 electronic optical drive (2,25 MB; CD-ROM). – Krakow: Katedra Gornictwa Podziemnego.

90. Gusiev O. Features of using numerical experiment to analyze the stability of development workings / V. Sotskov, O. Gusiev // Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. – The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2014. – P. 401 – 404.

91. КД 12.01.01.501 – 98. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги. – Д.: ІГТМ НАНУ, 1999. – 42 с.

92. КД 12.01.01. 502 – 98. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Порядок та організація. – Д.: ІГТМ НАНУ, 1999. – 14 с.

93. Протодьяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч. 1. Давление горных пород / М.М. Протодьяконов. – М.-Л.: ОГИЗ, 1931. – 104 с.

94. Цимбаревич П.М. Механика горных пород: учеб. / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1948. – 247 с.

95. Kovalevska I. Research into stress-strain state of reinforced marginal massif of extraction mine working by combined anchoring system / I. Kovalevska, M. Varabash, O. Gusiev // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – 10(1). – P. 31 – 36.

96. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1982. – 272 с.

97. Руководство по размещению, выбору и расчету крепи и защите подземных горных выработок. – М.: Стройиздат, 1980. – 374 с.


## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Документы, подтверждающие реализацию  
теоретических и прикладных исследований


### Приложение А.1

Министерство энергетики и угольной промышленности Украины  
 Министерство образования и науки Украины  
 Государственное ВУЗ «Национальный горный университет»  
 (Государственное ВУЗ «НГУ»)

УТВЕРЖДАЮ:  
 Генеральный директор  
 ПАО «ДТЭК-Павлоградуголь»  
 С.А. Воронин  
 «08» «06» 2015 г.



УТВЕРЖДАЮ:  
 Первый проректор НГУ  
 профессор  
 П.И. Пилов  
 «08» «06» 2015 г.



## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРЕПЕЖНОЙ СИСТЕМЫ УЧАСТКОВЫХ ВЫРАБОТОК ШАХТ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

*Згідно  
 з оригіналом  
 Вч. секр*



Днепропетровск  
 2015

УДК 622.28.043:622.23.055

Рецензенти: В.І. Бузило, д-р техн. наук, проф.  
П.І. Пономаренко, д-р техн. наук, проф.

**Методика розрахунку кріпильної системи дільничних виробок шахт Західного Донбасу** / Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Вівчаренко О.В., Черватюк В.Г., Снігур В.Г., Малихін О.В., Гусев О.С., Мовчан В.С. – Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ», 2014. – 32 с. (російською мовою).

За результатами експериментальних досліджень напружено-деформованого стану приконтурних порід виїмкових виробок, їх кріпильної системи на різних ділянках впливу підвищеного гірського тиску, що змінюється в часі й просторі; отримані закономірності взаємозв'язку структури й властивостей порід вуглевміщуючої товщі з конструктивними параметрами кріплення виїмкових виробок, що дозволило вдосконалити методику їхнього розрахунку з урахуванням асиметрії додатка навантаження в зоні впливу очисних робіт.

Друкується за авторською редакцією.

- © Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., 2015
- © Симанович Г.А., Вівчаренко О.В., 2015
- © Черватюк В.Г., Снігур В.Г., 2015
- © Малихін О.В., Гусев О.С., Мовчан В.С., 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....		5
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КРЕПЕЖНОЙ СИСТЕМЫ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТАХ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА .....		
		7
1. Общие сведения .....		7
2. Исходные данные для выполнения расчетов .....		10
3. Определение размеров области неустойчивых пород вокруг выемочной выработки .....		12
4. Выбор типа рамной крепи и шага ее установки .....		12
5. Выбор параметров крепежной системы выемочной выработки в зоне влияния очистных работ .....		13
6. Расчет параметров установки анкеров в боках выемочной выработки .....		13
7. Выбор параметров размещения сталеполимерных анкеров в центральной части свода выработки .....		15
8. Расчет параметров канатных анкеров в центральной части свода выработки .....		16
9. Выбор параметров стоек крепи усиления .....		17
ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КРЕПЕЖНОЙ СИСТЕМЫ ВЫЕМОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ .....		
		19
1. Исходящие данные для выполнения расчетов .....		19
2. Определение размеров области неустойчивых пород вокруг выемочной выработки .....		22
3. Выбор типа рамной крепи и шага ее установки .....		24
4. Расчет параметров установки анкеров в боках выемочной выработки .....		24
5. Параметры размещения сталеполимерных анкеров в центральной части свода выработки .....		26
6. Параметры установки канатных анкеров в центральной части свода выработки .....		28
7. Выбор параметров стоек крепи усиления .....		30
8. Выводы .....		31
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК .....		32

## Приложение А.2

Министерство образования и науки Украины  
Государственное ВУЗ «Национальный горный университет»  
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель департамента по  
производству дирекции по добыче  
«ДТЕК ПАВЛОГРАД»

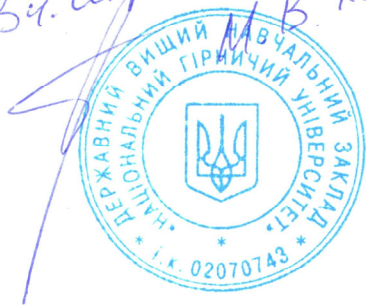
В.Г. Черватюк



2014г.

### МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК В ТОНКОСЛОЙСТОМ МАССИВЕ СЛАБЫХ ПОРОД

*Згідно  
з оригіналом  
Вч. секр. Д.08.080.03*



Днепропетровск – 2014

УДК 622.023.68

Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Вівчаренко О.В., Снігур В.Г., Гусєв О.С., Малихін О.В., Мовчан В.С., Соцков В.О. **Методика прогнозу здимання порід підпошви пластових виробок у тонкошаруватому масиві слабких порід.**

Методика прогнозу здимання порід підпошви пластових виробок у тонкошаруватому масиві слабких порід є доповненням до діючих нормативних документів і рекомендується до застосування при відпрацьовуванні вугільних шарів у Західному Донбасі.

Методика може бути використана науковими співробітниками проектних і науково-дослідних інститутів гірничодобувної галузі, інженерно-технічними працівниками виробничих об'єднань, а також студентами гірничих ВУЗів і факультетів.

Друкується за авторською редакцією.

© Бондаренко В.І., Ковалевська І.А.  
© Симанович Г.А., Вівчаренко О.В.  
© Снігур В.Г., Гусєв О.С., Малихін О.В.  
© Мовчан В.С., Соцков В.О.


**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
1. <b>ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ</b> .....	6
1.1.  Назначение документа .....	6
1.2.  Область применения .....	6
1.3.  Связь с другими документами .....	6
2. <b>ГОРНОТЕХНИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ           АСПЕКТЫ МЕТОДИКИ</b> .....	8
2.1.  Структура близлежащей углевмещающей породной толщи отрабатываемых угольных пластов Западного Донбасса .....	8
2.2.  Особенности механизма развития пучения пород почвы пластовой выработки .....	15
3. <b>МЕТОДИКА ПРОГНОЗА И ИЗУЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ           ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК ШАХТ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА</b> .....	30
3.1.  Основные исходные данные и расчетные положения .....	30
3.2.  Последовательность выполнения расчетов .....	33
3.3.  Пример выполнения прогнозного расчета пучения пород почвы пластовой выработки .....	36
<b>ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК</b> .....	42



## Приложение А.3

Згідно з оригіналом  
В. Сакун  
Д. 08.080.03  
М.В. Петлюба



УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер

ПСП «Шахтоуправління  
«Терновське»»

ПАО «ДТЕК Давлоградуголь»

Ю.Г. Жуковский

«09» сентября 2016 г.

## РАСЧЕТ

фактического экономического эффекта от использования  
«Методики расчета крепежной системы участковых выработок  
шахт Западного Донбасса» в выемочных выработках  
добычного участка №2 шахты «Западно-Донбасская»  
за первое полугодие 2015 года

Расчет экономического эффекта от повышения производительности добычного участка за счет прогнозирования и выполнения мероприятий по устранению негативных последствий поддержания пород выработок выполнен по следующей методике

$$\mathcal{E} = V_{don} \cdot C \cdot K,$$

где  $V_{don}$  – дополнительный объем добычи угля, т;

$C$  – экономический эффект от продажи тонны реализуемой продукции, грн/т;

$K$  – коэффициент перевода в реализуемую продукцию, который равен

$$K = \frac{V_p}{V_d},$$

где  $V_p$  – объем реализованного угля, тыс. т;

$V_d$  – объем добытого угля, тыс. т.

$$V_{don} = Q \cdot N,$$

$Q$  – дополнительная нагрузка в результате прогнозирования и применения мероприятий по устранению негативных последствий проявлений горного давления, т/сут;

$N$  – количество забое-дней в расчетном периоде.

$$C = C_{II} - C_{II.P},$$

где  $C_{II}$  – стоимость продажи 1 т реализованной продукции, грн;

$C_{II.P}$  – величина переменных расходов, грн.

### Выполнение расчета

Расчет среднесуточной нагрузки по добычному участку №2 обусловлен своевременной разработкой и применением мероприятий, направленных на снижение или устранение негативных последствий деформаций породного контура участковых выработок и элементов их крепежной системы в зоне влияния очистных работ.

**Основные факторы, влияющие на повышение среднесуточной нагрузки, при применении мероприятий по ликвидации негативных последствий пучения почвы:**

– *снижение времени на операцию по извлечению стоек арочной крепи.* При устранении негативных последствий высокого вертикального горного давления и вдавливания стоек рамы в почву среднее время конечных операций сократится до 5 мин/цикл. Частота отклонения времени извлечения стойки арочной крепи до 80% по данным хронометражей;

– *снижение времени простоев, связанного с деформациями замков податливости и стоек рамной крепи.* При устранении проявлений негативных последствий изгиба стоек рамы с верхняком, кручения и заклинивания СВП в замках податливости, а также пучения почвы время конечных операций может превышать среднее на 30 мин/цикл;

– *снижение времени простоев по газовому фактору.* Проявление негативных последствий изгиба элементов рамы с их перемещением в полость выработки и пучения почвы (уменьшение сечения горной выработки, как следствие повышения

концентрации газа метана) приводит к простоям по газовому фактору.

$$V_{\text{дон}} = Q \cdot N,$$

где  $Q = Q_{\text{нагрузка 1-е полугодие 2015}} - Q_{\text{нагрузка 2014}}$ ,

$$Q = 2013 - 1634 = 379 \text{ т/сут}$$

$N = 117$  забое-дней за 1-е полугодие 2015 года (при отработке 860 лавы) УДУ-2.

$V_{\text{дон}} = 117 \cdot 379 = 44343$  т – фактический прирост объема добычи за 1-е полугодие 2015 г. по УДУ-2.

$$K = \frac{V_p}{V_o} = \frac{1156,0}{1204,52} = 0,9597,$$

$$C = C_{\Pi} - C_{\Pi,р},$$

где  $C_{\Pi} = 1019,59$  грн/т – стоимость 1 т реализованной продукции;

$C_{\Pi,р} = 109,75$  грн/т – переменные расходы на 1 т реализованной продукции.

Таким образом, экономический эффект за 1-е полугодие 2015 г. по УДУ-2 составил:

$$\text{Э} = 44343 \cdot (1019,59 - 109,75) \cdot 0,9597 = 38,719 \text{ млн грн.}$$

Главный технолог  
ПСП «Шахтоуправление «Терновское»  
ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»

Э.В. Френцель

Главный экономист  
ПСП «Шахтоуправление «Терновское»  
ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»

Н.Ю. Гончарова

#### Приложение А.4



УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер  
ПСП «ШУ ПЕРШОТРАВЕНСКОЕ»  
ПАО «ДТЭК ПАВЛОГРАДУГОЛЬ»

А.Н. Колесников

« 11 » 02 2016 г.

#### СПРАВКА

Углевмещающий породный массив шахт «Юбилейная» и «Самарская» отличается низкой прочностью и предоставлен в основном тонкослоистыми алевролитами и аргиллитами и реже песчаниками, средние значения предела прочности которых колеблются от 10,5 до 28 МПа. Поэтому имеются определенные трудности в поддержании в удовлетворительном состоянии горных выработок в течение всего срока их эксплуатации, особенно в зоне влияния очистных работ при повторном их использовании. Кроме того, пластовые выработки характеризуется разнообразием структуры и свойств пород по длине при локальном воздействии ослабляющих породу факторов (в основном, обводненности, спровоцированной как тектоникой месторождения, так и ведением горных работ), что в совокупности создает условия для существенного колебания интенсивности проявлений горного давления в приконтурном породном массиве и крепижной системе выемочных выработок. Поэтому разнообразие структуры и свойств близлежащих породных слоев требует оценки их устойчивости по всей длине выработки; соответственно и рекомендации по повышению устойчивости выработки в целом и надежности работы крепижной системы посредством упрочнения породного массива кровли комбинированными анкерными системами в составе сталеполимерных и канатных анкеров. При этом приобретает особую актуальность прогнозирование состояния крепижной системы выемочных пластовых выработок на разных участках шахтных полей по каждому характерному участку вдоль выработки на основе «Методики расчета крепижной системы участко-

вых выработок шахт Западного Донбасса». Это позволило не только заблаговременно (еще на стадии проектирования) предусмотреть комплекс мероприятий по повышению устойчивости выработки на сложных участках, например, с применением комбинированной анкерной системы в кровле, но и провести систематизацию в зависимости от степени влияния основных геомеханических факторов на процессы нагружения крепи и характера ее работы позади лавы.

Использование «Методики расчета крепежной системы участковых выработок шахт Западного Донбасса» для расчета объемов ремонтных работ и усиления рамной крепи комбинированной анкерной системой в кровле на характерных участках по длине выработок с меняющимися горно-геологическими условиями по сохранению сечения выработки для повторного использования обеспечило экономических эффект в размере 3,1 млн грн, а также стабильную работу по добыче горной массы в зонах изменения горно-геологических условий.

Главный технолог  
ПСП «ШУ ПЕРШОТРАВЕНСКОЕ»  
ПАО «ДТЭК ПАВЛОГРАДУГОЛЬ»

А.И. Прихорчук

Главный экономист  
ПСП «ШУ ПЕРШОТРАВЕНСКОЕ»  
ПАО «ДТЭК ПАВЛОГРАДУГОЛЬ»

С.И. Аксёнова