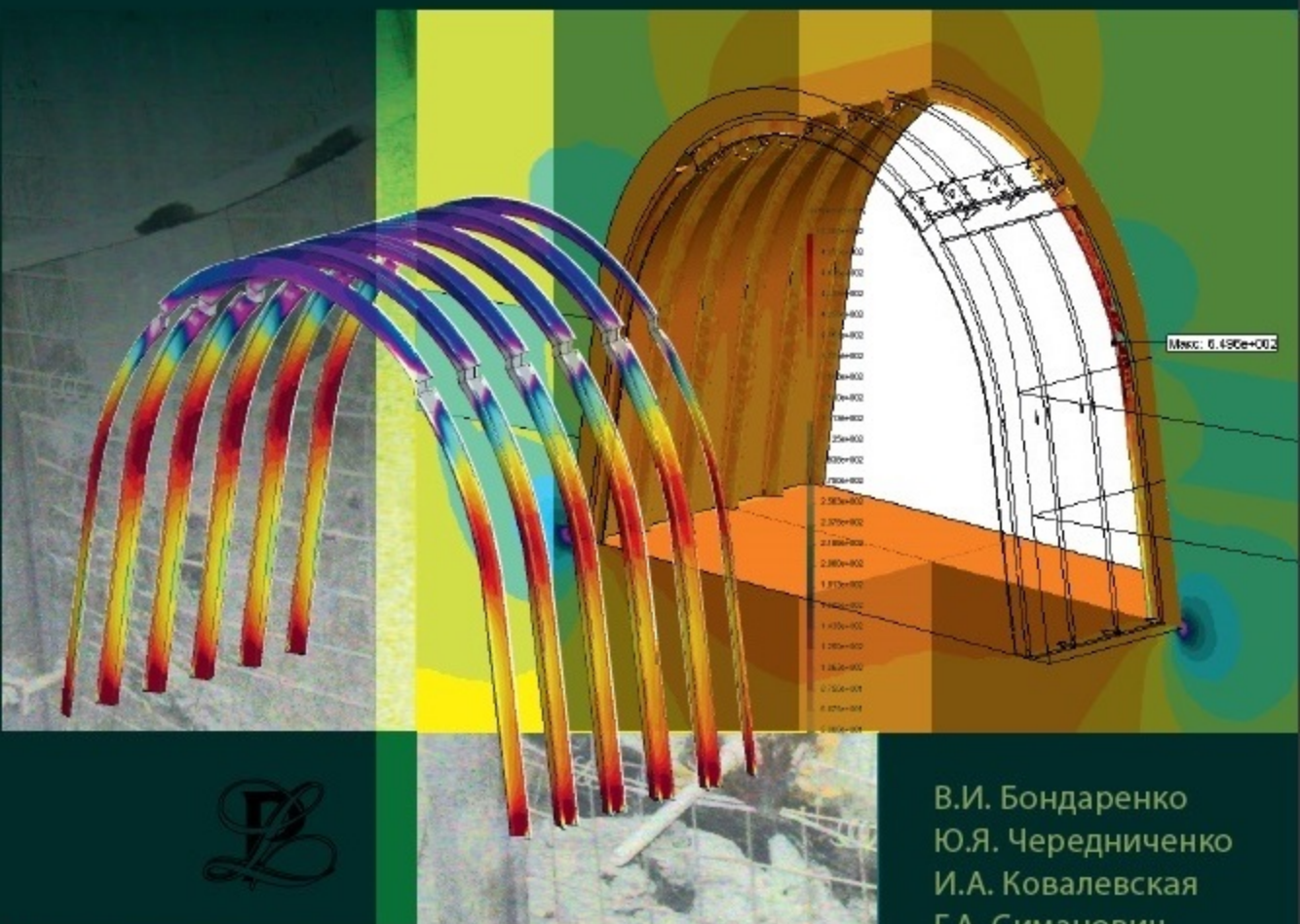


ГЕОМЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

АНКЕРНОЙ И РАМНОЙ КРЕПЕЙ

ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ЕДИНОЙ ГРУЗОНЕСУЩЕЙ СИСТЕМЕ



В.И. Бондаренко
Ю.Я. Чередниченко
И.А. Ковалевская
Г.А. Симанович
А.В. Вивчаренко
В.В. Фомичев

**В.И. Бондаренко, Ю.Я. Чередниченко, И.А. Ковалевская,
Г.А. Симанович, А.В. Вивчаренко, В.В. Фомичев**

**ГЕОМЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
АНКЕРНОЙ И РАМНОЙ КРЕПЕЙ
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ЕДИНОЙ
ГРУЗОНЕСУЩЕЙ СИСТЕМЕ**

Монография

**Днепропетровск
ТОВ «ЛізуновПрес»
2010**

УДК 622.281.74:539.319

Бондаренко В.І., Чередниченко Ю.Я., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Вівчаренко О.В., Фомичов В.В. **Геомеханіка взаємодії анкерного та рамного кріплення гірничих виробок в єдиній вантажонесучій системі.** Монографія. – Дніпропетровськ: «ЛізуновПрес», 2010. – 174 с. – Російською мовою.

Друкується відповідно до рішення Вченої ради Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол №10 від 14.10.2010 р.).

Книга присвячена математичному моделюванню за допомогою сучасних комп'ютерних програм процесів взаємодії рамного, анкерного та рамно-анкерного кріплення з породним масивом, що оточує підготовчу виробку. Для адекватного реального умовам відображення усіх основних елементів геомеханічної системи «шаруватий масив-кріплення виробки» наведена низка заходів щодо моделювання і тестування існуючого шаруватого масиву, геометричних параметрів рамного кріплення з реальною конструкцією замка піддатливості, анкерного кріплення та міжрамного огородження. Усі розрахунки виконано по повній діаграмі деформування кожного елемента системи.

Виконаний комплекс досліджень напружено-деформованого стану системи при різній структурі масиву та ступеня дії послаблюючих породи факторів. Також визначений стан системи при декількох варіантах сполучення анкерного та рамного кріплення, його номера СВП, форми виробки тощо. Обґрунтована багатofакторним обчислювальним експериментом та перевірена у шахтних умовах технологія побудови єдиної ресурсозберігаючої вантажонесучої системи з рамного та анкерного кріплення, яка характеризується саморегуляцією навантаження на окремі елементи.

Монографія може бути корисною для наукових співробітників проектних і науково-дослідних інститутів гірничодобувної галузі, інженерно-технічних працівників шахт і виробничих об'єднань, а також студентів гірничих вищих навчальних закладів і факультетів.

Друкується за авторською редакцією.

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

П.І. Пономаренко, д-р техн. наук, проф.

© Бондаренко В.І., Чередниченко Ю.Я., 2010

© Ковалевська І.А., Симанович Г.А., 2010

© Вівчаренко О.В., Фомичов В.В., 2010

© ТОВ «ЛізуновПрес», 2010

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы прогноза проявлений горного давления постоянно совершенствуются в направлении более полного учета особенностей взаимодействия крепи с вмещающим выработку породным массивом и его физико-механических свойств. Эти исследования крайне важны для развития общих представлений о взаимодействии системы «слоистый массив-крепь выработки» и изыскания оптимальных параметров данного взаимодействия, принимая во внимание конечную цель – обеспечение устойчивости выработки малозатратными технологиями. То есть, процесс крепления должен быть неразрывно связан с геомеханикой приконтурного породного массива.

Существующие задачи геомеханики в последнее время сделали переход от упруго-пластической модели [1-3] к дальнейшему учету свойств горных пород в предельной и запредельной стадиях деформирования [4-9], даже с учетом в кровле водонасыщенного слоя (плывуна) [10].

Накопленный опыт показывает, что перспективным направлением уменьшения затрат на крепление и поддержание горных выработок, а также увеличение темпов их сооружения является широкое внедрение анкерной крепи (как самостоятельного вида, так и в сочетании с другими типами крепей), которая отличается возможностью полной механизации работ по ее возведению, позволяет повысить безопасность работ, применить прогрессивную технологию и создать значительную экономию материалов.

Вместе с тем успешное решение задачи обеспечения устойчивости горных выработок в равной мере связано как с созданием и внедрением надежных и экономичных видов крепей, так и с наиболее полным учетом особенностей напряженно-деформированного состояния упрочненного породного массива и рамной крепи и разработкой на этой основе методов выбора рациональных их параметров. Это достигается за счет вовлечения с помощью анкерной крепи приконтурного породного массива в работу по сопротивлению силам гравитации, то есть используются (в той или иной степени) прочностные свойства самого массива и отпадает необходимость в установке материалоемких конструкций крепей для поддержания горных выработок.

В настоящее время на шахтах и рудниках Украины получают все большее распространение рамно-анкерные крепи горных выработок, включающие в свои конструкции различные типы анкеров, которые выполняют две основные функции: во-первых, упрочняют приконтурные породы, вовлекая их в работу по сопротивлению активным нагрузкам со стороны породного массива путем формирования грузонесущей породной оболочки; и, во-вторых, анкера, имея конструктивную связь с элементами рамной крепи за счет усилия натяжения, создают дополнительные точки опоры рамной крепи. *Первая функция* анкеров позволяет снизить нагрузку на раму за счет восприятия части нагрузок упрочненной породной оболочкой, а *вторая функция* – повысить несущую способность рамной крепи за счет снижения

интенсивности поля напряжений в материале рамы с помощью реакции анкеров. В результате сочетания анкеров с рамной крепью можно создавать рамно-анкерные крепи, которые отличаются пониженной материалоемкостью при высокой несущей способности, то есть такие крепи могут с достаточной эффективностью применяться для поддержания горных выработок, сооружаемых в сложных горно-геологических условиях.

Рамно-анкерная крепь включает два основных элемента – раму с затяжками и анкера, связанные между собой в единую конструкцию соединительными элементами. Последние могут осуществлять податливую или жесткую связь рамы с анкерами, и выполнены в виде стяжек из канатов, различных профилей проката и т.п., или конец анкера непосредственно крепится на стойке рамы с помощью гайки и опорной плиты. Такие конструкции рамно-анкерной крепи нашли применение при креплении как капитальных, так и подготовительных горных выработок шахт Донбасса. Причем в выработках, подверженных влиянию очистных работ, со значительными ожидаемыми смещениями породного контура следует применять анкера с соответствующей величиной податливости, а также осуществлять податливую связь анкера с рамой, что способствует более равномерному перераспределению усилий на элементы рамно-анкерной крепи пропорционально их несущей способности.

На основе анализа современных конструкций рамно-анкерных крепей и опыта их применения для крепления горных выработок сформулированы три основных требования, выполнение которых повышает эффективность работы крепи по поддержанию выработок в устойчивом состоянии.

Первое – соответствие деформационно-силовой характеристики крепи характеру проявлений горного давления, то есть допускаемая податливость крепи должна быть не меньше величины ожидаемых смещений породного контура, а ее несущая способность – не менее прогнозируемой нагрузки на крепь.

Второе – деформационно-силовые характеристики основных элементов, составляющих рамно-анкерную крепь (например, рама и анкер), должны соответствовать друг другу в плане достижения синхронности работы элементов крепи при ее взаимодействии с породным массивом. Это означает, что конструкции элементов и их связи между собой должны обеспечивать одновременный переход элементов крепи из одного режима работы в другой (например, из жесткого режима в податливый режим) во избежание неравномерного распределения нагрузок на элементы крепи.

Третье – рамно-анкерная крепь должна удовлетворять условию равнопрочности конструкции, то есть, в процессе работы крепи нагрузка на составляющие ее элементы должна распределяться пропорционально их несущей способности, что достигается выбором соответствующих механических и геометрических параметров крепи.

Принимая во внимание сформулированные требования, следует отметить, что их реализация в конструкциях рамно-анкерных крепей наиболее

полно может быть осуществлена путем применения анкеров, работающих в режиме постоянного сопротивления, когда анкер, связанный с рамной крепью, допускает требуемую величину податливости при практически постоянной реакции сопротивления, близкой к его несущей способности. В наибольшей степени такой режим работы характерен для анкеров с распорными эластичными замками, трубчатых анкеров ТА1 и ТА2 и других с повышенной податливостью, что и предопределяет целесообразность их использования в конструкциях рамно-анкерных крепей.

«Методология (от «метод» и «логия») – учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности»

Философский словарь

1. МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. МЕТОДОЛОГИЯ – ФИЛОСОФИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На современном этапе развития научных исследований в термин «методология» вкладывают широкий спектр понятий. Методология как таковая, и в частности методология науки, начала оформляться в 60-х-70-х годах XX века. В Советском Союзе значительный вклад в развитие методологии внесли такие ученые как П.В. Копнин, В.И. Садовский, Г.П. Щедровицкий, Э.Г. Юдина и В.С. Швырева. В результате их научных работ была получена следующая четырехуровневая модель методологии науки:

- 1) *философский*;
- 2) *общенаучный*;
- 3) *конкретно-научный*;
- 4) *технологический* (конкретные методики и техники исследования).

Такое разделение методологии признано практически повсеместно и оно не подвергается сомнению. Однако такое деление привело к тому, что ученые должны были заниматься методологией или использовать ее в своих исследованиях лишь на каком-то одном уровне общей модели [11, 12]. Такой подход лишает исследователя возможности универсализации технологической цепочки решения теоретических и прикладных задач, а также повышает затраты времени и других научных ресурсов, необходимых для достижения конкретного результата.

Действительно, верхние первый и второй уровни вышеприведенной модели методологии отведены для философов, но сами они конкретных научных исследований не ведут. Философы – анализируют наиболее общие результаты, полученные в различных отраслях научного знания в прошлых исследованиях. Их труды относятся к гносеологии как науке о познании, логике науки, то есть к тем аспектам, которые связаны с наукой как со сложившейся системой научных знаний. Физикам, математикам, химикам как представителям конкретных наук нужна методология как технология их собственной деятельности для проведения исследований. Кроме того, работы

философов по проблематике гносеологии и методологии зачастую написаны настолько сложным заумным языком, что для прикладных исследователей они просто не представляют практической ценности.

Третий уровень модели предназначен для методологов конкретных наук – биологии, физики, психологии и т.д. Позиция исследователя (этого уровня модели методологии науки) не имеет четких граничных показателей – они уже не философы, но и не собственно ученые, которые добывают новое научное знание. Эти ученые в конкретные методики и техники научных исследований не вникают. Поэтому их результаты редко представляют интерес для исследователей в конкретных предметных областях.

Конкретные методики и технологии исследований разрабатывают и используют в ходе решения поставленных задач ученые-прикладники (четвертый уровень). Как правило, эти работы выполняются в полном отрыве от разработок, представленных на верхних уровнях модели методологии науки.

Подводя итог вышеизложенному, приходится констатировать, что при всем большом объеме накопленных полезных материалов в методологии науки сложилась парадоксальная ситуация: с одной стороны, многозначность ее предмета; с другой стороны – его излишняя структуризация.

В физико-математических и технических науках широко распространилось упрощенное трактование понятия «*методология*» – под методологией понимают либо общий подход к решению задач того или иного класса, либо путают методологию с методикой – последовательностью действий по достижению требуемого результата.

Методологию науки разделяют на два типа: *дескриптивную* (описательную) методологию и *прескриптивную* (нормативную) методологию. Описательная методология исследует общие структуры научного знания, закономерности научного познания и т.п. Нормативная методология прямо направлена на регуляцию деятельности и представляет собой рекомендации и правила осуществления научной деятельности [13, 14].

В общем случае, можно сказать, что методология рассматривает организацию какой-либо деятельности. Здесь под деятельностью понимают целенаправленную активность человека. Организовать деятельность означает упорядочить ее в целостную систему с четко определенными характеристиками, логической структурой и процессом ее осуществления – *временной структурой*.

Логическая структура включает в себя следующие компоненты: субъект, объект, предмет, формы, средства, методы деятельности, ее результат.

Внешними по отношению к этой структуре являются следующие характеристики деятельности: особенности, принципы, условия, нормы.

В прошлом веке проявились такие интеллектуальные организации как проекты и программы. К концу XX века деятельность по их созданию и реализации стала массовой. Они основываются не столько на теоретических знаниях, сколько на аналитической работе. Профессиональная культура за счет своей теоретической мощи породила способы массового изготовления

новых знаковых форм – моделей, алгоритмов, баз данных и т.п. Теперь это стало материалом для новых технологий, которые наряду с проектами и программами, стали ведущей формой организации деятельности. Специфика современных технологий заключается в том, что ни одна теория, ни одна профессия не могут покрыть весь технологический цикл. Сложная организация крупных технологий приводит к тому, что бывшие профессии обеспечивают лишь одну-две ступени больших технологических циклов.

Несколько десятилетий назад в условиях относительно длительной стабильности образа жизни инженеры могли спокойно ждать, пока ученые разработают новые рекомендации, апробируют их в эксперименте, затем конструкторы и технологи разработают и апробируют соответствующие конструкции и технологии, а потом дело дойдет до массового внедрения в практику, то такое ожидание сегодня стало бессмысленным. Пока все это произойдет, ситуация изменится коренным образом. Поэтому практические работники естественно и объективно устремились по другому пути – стали сами создавать инновационные модели технологических систем [15, 16].

Затем, к концу XIX – началу XX века проектный тип организационной культуры «проник» в науку – когда в научных исследованиях по многим отраслям научного знания стало практически обязательным требованием построение научных гипотез как познавательных моделей, и научное исследование стало, тем самым, проектироваться. В полную же силу проектно-технологический тип организационной культуры «заработал» лишь в последние десятилетия – когда он был востребован в массовых масштабах практикой.

В этом новом типе организационной культуры ключевыми становятся понятия: проект, технологии и рефлексия. При этом два из них являются как бы противоположными: *проект* (дословно – брошенный вперед) и *рефлексия* (дословно – обращение назад).

Рассмотрим эти понятия. Традиционное понимание проекта, существовавшее ранее в технике, в строительстве и т.д. – это совокупность документов, расчетов, чертежей и т.п. для создания какого-либо сооружения или изделия [11, 12]. На смену ему пришло современное понимание проекта как завершенного цикла продуктивной деятельности.

Проект – это ограниченное во времени целенаправленное изменение отдельной системы с установленными требованиями к качеству результатов, возможными рамками расхода средств и ресурсов и специфической организацией. Естественно, любой проект реализуется определенной совокупностью технологий [16].

В современном понимании *технология* – это система условий, форм, методов и средств решения поставленной задачи. Такое понимание технологии пришло в широкий обиход из сферы промышленного производства, когда разработчики стали продавать производителям лицензии на право выпуска своих разработок, сопровождая эти лицензии детальным описанием способов и средств производства – то есть технологиями.

Процесс осуществления деятельности мы будем рассматривать в виде проекта, реализуемого в определенной временной последовательности по фазам, стадиям и этапам, причем последовательность эта является общей для всех видов деятельности.

Завершенность проекта определяется тремя этапами:

1) *этап проектирования*, результатом которого является готовая модель создаваемой системы и план ее реализации;

2) *этап технологический*, результатом которого является реализация системы;

3) *этап рефлексивный*, результатом которого является оценка разработанной системы и определение необходимости либо ее дальнейшей коррекции, либо перехода к новому проекту.

Основываясь на вышеизложенном, была сформирована следующая общая схема методологии:

1) *характеристики деятельности*: особенности, принципы, условия, нормы деятельности;

2) *логическая структура деятельности*: субъект, объект, предмет, формы, средства, методы, результат деятельности;

3) *временная структура деятельности*: фазы, стадии, этапы деятельности.

Рассматривая методологию как учение об организации деятельности, следуя за Г.П. Щедровицким, можно выделить следующие три основания современной методологии [14]:

1) *философско-психологическая теория деятельности*;

2) *системный анализ* (системотехника) – учение о системе методов исследования или проектирования сложных систем, поиска, планирования и реализации изменений, предназначенных для ликвидации проблем;

3) *наукведение, теория науки*. В первую очередь, к методологии имеют отношение такие разделы наукведения, как гносеология (теория познания) и семиотика (наука о знаках).

Таким образом, методология науки обеспечивает системный подход при постановке, описании и решении любой научной проблемы в различных отраслях знаний и позволяет использовать ряд общих принципов, объединенных в единую структуру, для получения новых знаний на разных уровнях абстракций.

В дальнейшем подробнее рассмотрим основные принципы научных исследований, применяемых в методологии науки при решении разнообразных теоретических и прикладных задач.

1.2. ЭЛЕМЕНТЫ И МЕТОДЫ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Научные знания структурируются по определенным отраслям науки, которые можно представить в следующем виде (рис. 1.1):

1) *обобщающие науки* – центральная область научного знания: физика, химия, кибернетика, биология, антропологические науки, космология, общественные науки и технические науки;

2) *философия* – она является одновременно и отраслью науки и системой взглядов на мир, поэтому занимает особое место, о чем говорилось выше;

3) *математика* – также занимает особое место, является отдельной областью научного знания, поскольку ее предметом является построение формальных моделей явлений и процессов,

изучаемых всеми остальными науками;

4) *технологические науки*.

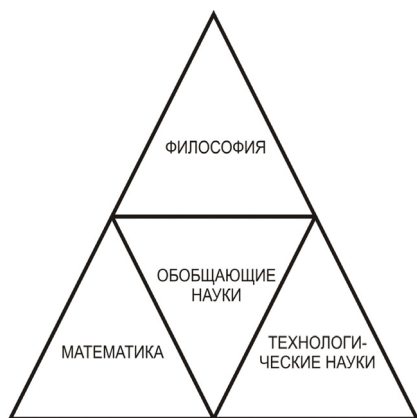


Рис. 1.1. Структура научного знания

Рассмотрим характерные черты любой отрасли научного знания в условиях, когда различные науки сильно разнятся между собой по своему гносеологическому уровню – на одном полюсе имеются «*сильные*» науки, *гносеологический идеал науки* – математика, физика, отчасти другие естественные науки, теории которых строятся на строго дедуктивной основе [17, 18].

На другом полюсе – «*слабые*» (в гносеологическом плане) науки, в частности гуманитарные и общественные науки в силу чрезвычайной сложности их объектов, слабой предсказуемости явлений и

процессов. Здесь уместно будет привести такое сравнение: великий физик А. Эйнштейн, знакомясь с опытами великого психолога Ж. Пиаже, заметил, что изучение физических проблем – это детская игра сравнительно с загадками детской игры.

Для любой науки или научного исследования существенным является вопрос об истинности знания. Под истинностью знания понимается соответствие его познаваемому предмету. В гносеологии различаются понятия «*истина*» и «*знание*». Понятие «*истина*» подразумевает соответствие знания действительности, достоверность его содержания безотносительно к познающему субъекту и существующего независимо от него в силу своей объективности. Понятие «*знание*» выражает форму признания истины, предполагающую наличие тех или иных оснований.

Для научного знания свойственно то, что не просто сообщается об истинности того или иного содержания, но приводятся основания, по которым это содержание истинно: результаты эксперимента; доказательство теоремы; логический вывод и т.д. Поэтому принцип достаточного основания (в логике он называется «законом достаточного основания») является фундаментом всякой науки: всякая истинная мысль должна быть обоснована другими мыслями, истинность которых доказана. Его формулировка принадлежит

Г. Лейбницу: «Все существующее имеет достаточное основание для своего существования».

В ходе развития науки разрабатываются и совершенствуются *средства познания*: материальные, математические, логические, информационные средства [15].

Материальные средства познания – это приборы и оборудование для научных исследований. Исторически с возникновением материальных средств познания связано формирование эмпирических методов исследования – наблюдения, измерения, эксперименты.

Массовое внедрение вычислительной техники, информационных технологий, средств телекоммуникаций коренным образом преобразует научно-исследовательскую деятельность во многих отраслях науки, делает их средствами научного познания. В том числе, в последние десятилетия вычислительная техника широко используется для автоматизации экспериментов в физике и технических науках, что позволяет в сотни, тысячи раз упростить исследовательские процедуры и сократить время обработки данных.

Развитие математических средств познания оказывает все большее влияние на развитие современной науки. Математика, будучи наукой о количественных отношениях и пространственных формах, абстрагированных от их конкретного содержания, разработала и применила конкретные средства отвлечения формы от содержания и сформулировала правила рассмотрения формы как самостоятельного объекта в виде чисел и множеств, что упрощает процесс познания, позволяет вычлнить исходные положения и обеспечивает точность и строгость суждений.

Под влиянием математических средств познания претерпевают существенные изменения теоретический аппарат описательных наук [17]. Математические средства позволяют систематизировать эмпирические данные, выявлять и формулировать количественные зависимости и закономерности. Математические средства используются также как особые формы идеализации и аналогии, в данном случае речь идет о математическом моделировании.

В любом исследовании перед учеными ставятся следующие логические вопросы:

- 1) Каким требованиям должны удовлетворять рассуждения, позволяющие делать объективные заключения?
- 2) Каким требованиям должны удовлетворять описания эмпирически наблюдаемых характеристик?
- 3) Как анализировать исходные системы научных знаний и согласовывать одни системы знаний с другими?
- 4) Как строить научную теорию, позволяющую давать научные объяснения и предсказания?

Использование логики в процессе построения рассуждений дает возможность ученому отделять контролируемые параметры от интуитивно или некритически принимаемых, ложные от истинных, путаницу от противоречий.

Определяющую роль в построении любой научной работы играют применяемые *методы исследования*. Их разделяют на эмпирические (эмпирический – дословно – воспринимаемый посредством органов чувств) и теоретические (табл. 1.1).

Теоретические методы: познавательного действия – выявление и разрешение противоречий, постановка проблемы, построение гипотезы и т.д.; операции – анализ, синтез, сравнение, абстрагирование и конкретизация и т.д.

Эмпирические методы: познавательного действия – обследование, мониторинг, эксперимент и т.д.; *операции* – наблюдение, измерение, опрос, тестирование и т.д.

Теоретические методы-операции имеют широкое поле применения, как в научном исследовании, так и в практической деятельности. Они разделяются по основным мыслительным операциям, которыми являются: анализ и синтез, сравнение, абстрагирование и конкретизация, обобщение, формализация, индукция и дедукция, идеализация, аналогия, моделирование, мысленный эксперимент [18].

Таблица 1.1

МЕТОДЫ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ		ЭМПИРИЧЕСКИЕ	
методы-операции	методы-действия	методы-операции	методы-действия
<ul style="list-style-type: none"> • анализ • синтез • сравнение • абстрагирование • конкретизация • обобщение • формализация • индукция • дедукция • идеализация • аналогия • моделирование • вычислительный эксперимент 	<ul style="list-style-type: none"> • диалектика • научные теории, проверенные практикой • доказательство • метод анализа систем знаний • дедуктивный метод • индуктивно-дедуктивный метод • выявление и разрешение противоречий • постановка проблем • построение гипотез 	<ul style="list-style-type: none"> • изучение документации • наблюдение • измерение • экспертные оценки 	<ul style="list-style-type: none"> • обследование • мониторинг • изучение и обобщение опыта • опытная работа • эксперимент

Анализ – это разложение исследуемого целого на части, выделение отдельных признаков и качеств явления, процесса или отношений явлений, процессов.

Синтез – соединение различных элементов, сторон предмета в единое целое (систему). Синтез – не простое суммирование, а смысловое соединение. Синтез противоположен анализу, с которым он неразрывно связан. В теоретическом научном знании синтез выступает в функции взаимосвязи теорий, относящихся к одной предметной области, а также в функции объединения конкурирующих теорий.

Сравнение – это познавательная операция, лежащая в основе суждений о сходстве или различии объектов. С помощью сравнения выявляются количественные и качественные характеристики объектов, осуществляется их классификация, упорядочение и оценка. Сравнение имеет смысл только в совокупности однородных объектов, образующих класс.

Абстрагирование – одна из основных мыслительных операций, позволяющая мысленно вычленивать и превратить в самостоятельный объект рассмотрения отдельные стороны, свойства или состояния объекта в чистом виде. Абстрагирование лежит в основе процессов обобщения и образования понятий.

Конкретизация – процесс, противоположный абстрагированию, то есть нахождение целостного, взаимосвязанного, многостороннего и сложного. Исследователь первоначально образует различные абстракции, а затем на их основе посредством конкретизации воспроизводит эту целостность. Диалектика теоретического мышления – это единство абстрагирования и конкретизации, движение к конкретному и воспроизведение его.

Обобщение – одна из основных познавательных мыслительных операций, состоящая в выделении и фиксации относительно устойчивых, инвариантных свойств объектов и их отношений. Отделение общих свойств от частных и обозначение их словом позволяет в сокращенном, сжатом виде охватывать все многообразие объектов, сводить их в определенные классы, а затем посредством абстракций оперировать понятиями без непосредственного обращения к отдельным объектам.

Формализация – отображение результатов мышления в точных понятиях или утверждениях. Является как бы мыслительной операцией «второго порядка». Формализация противопоставляется интуитивному мышлению. В математике и формальной логике под формализацией понимают отображение содержательного знания в знаковой форме или в формализованном языке. Формализация, то есть отвлечение понятий от их содержания, обеспечивает систематизацию знания, при которой отдельные элементы его координируют друг с другом.

Индукция – это умозаключение от частных объектов, явлений к общему выводу, от отдельных фактов к обобщениям.

Дедукция – это умозаключение от общего к частному, от общих суждений к частным выводам.

Идеализация – мысленное конструирование представлений об объектах, не существующих или неосуществимых в действительности, но таких, для которых существуют прообразы в реальном мире. Процесс идеализации характеризуется отвлечением от свойств и отношений, присущим объектам реальной действительности и введением в содержание образуемых понятий таких признаков, которые в принципе не могут принадлежать их реальным прообразам. Примерами понятий, являющихся результатом идеализации, могут быть математические понятия «точка», «прямая»; в физике – «материальная точка», «абсолютно черное тело», «идеальный газ» и т.п.

Аналогия – мыслительная операция, в которой знание, полученное при рассмотрении объекта, переносится на другой, менее изученный или менее доступный для изучения объект, именуемый прототипом или оригиналом. В этом суть одного из специальных методов теоретического уровня – моделирования (построения и исследования моделей).

Модель – вспомогательный объект, выбранный или преобразованный в познавательных целях, дающий новую информацию об основном объекте. Формы моделирования разнообразны и зависят от используемых моделей и сферы их применения. По характеру моделей выделяют предметное и знаковое (информационное) моделирование.

Моделирование всегда применяется вместе с другими методами исследования, особенно тесно оно связано с экспериментом [19]. Изучение какого-либо явления на его модели есть особый вид эксперимента – *модельный эксперимент*, отличающийся от обычного эксперимента тем, что в процессе познания включается «промежуточное звено» – модель, являющаяся одновременно и средством, и объектом экспериментального исследования, заменяющего оригинал.

Особым видом моделирования является *вычислительный эксперимент*. Такой эксперимент осуществляют на математических моделях создаваемых и исследуемых при помощи вычислительной техники и сопутствующего оборудования. Исследователь имеет возможность генерировать разнообразные воздействия на идеальные объекты в рамках определенной динамической модели, имитируя численно те ситуации, которые могли бы иметь место в реальном эксперименте. При этом идеальные модели и объекты дают возможность в чистом виде выявить наиболее важные и существенные отношения, просчитать возможные ситуации и на основе полученных данных отсеять ненужные варианты.

Общенаучным методом познания является *диалектика* – реальная логика содержательного творческого мышления. Законы диалектики: переход количественных изменений в качественные, единство и борьба противоположностей и др.; анализ парных диалектических категорий: историческое и логическое, явление и сущность, общее (всеобщее) и единичное и др. являются неотъемлемыми компонентами любого грамотно построенного научно-исследования [17].

Научные теории, проверенные практикой: любая такая теория, по существу, выступает в функции метода при построении новых теорий в данной или даже в других областях научного знания, а также в функции метода, определяющего содержание и последовательность экспериментальной деятельности исследователя.

Доказательство – метод – теоретическое (логическое) действие, в процессе которого истинность какой-либо мысли обосновывается с помощью других мыслей [18]. Всякое доказательство состоит из трех частей: тезиса, аргументов и демонстрации. По способу ведения доказательства бывают прямыми и косвенными, по форме умозаключения – индуктивными и дедуктивными.

В совокупности методов научного познания важное место принадлежит методу анализа систем знаний [20]. Этот метод играет важную роль в эмпирических и теоретических исследовательских задачах: при выборе исходной теории, гипотезы для разрешения избранной проблемы; при разграничении эмпирических и теоретических знаний, полуэмпирических и теоретических решений научной проблемы; при обосновании эквивалентности или приоритетности применения тех или иных математических аппаратов в различных теориях.

Дедуктивный метод – способ построения научной теории, при котором в ее основу кладутся некоторые исходные положения аксиомы (синоним – постулаты), из которых все остальные положения данной теории (теоремы) выводятся чисто логическим путем посредством доказательства. Классическим примером дедуктивной теории является геометрия Евклида. Дедуктивным методом строятся теории в математике, математической логике, теоретической физике.

Индуктивно-дедуктивный метод заключается в том, что сначала накапливается эмпирический базис, на основе которого строятся теоретические обобщения, которые выстраиваются по иерархическим уровням. Этим методом строится большинство теорий в таких науках как физика, химия, геология, геомеханика.

Часто для исследования фактическим материалом служит разнообразная документация предприятий и научных учреждений. Изучение документальной базы шахт и обогатительных предприятий позволяет восстановить течение процессов и состояние объектов другими способами уже не доступных исследователю.

Наблюдение – наиболее информативный метод исследования. Это единственный метод, который позволяет увидеть все стороны изучаемых явлений и процессов, доступные восприятию наблюдателя – как непосредственному, так и с помощью различных приборов.

Наблюдение необходимо для научного познания, поскольку без него наука не смогла бы получить исходную информацию, не обладала бы научными фактами и эмпирическими данными, следовательно, невозможно было бы и теоретическое построение знания.

Измерение используется повсеместно, в любой человеческой деятельности. Так, практически каждый человек в течение суток десятки раз проводит измерения, смотря на часы. Общее определение измерения таково: «Измерение – это познавательный процесс, заключающийся в сравнении ... данной величины с некоторым ее значением, принятым за эталон сравнения» [19].

Экспертные оценки это разновидность опроса, связанная с привлечением к оценке изучаемых явлений, процессов наиболее компетентных людей, мнения которых, дополняющие и перепроверяющие друг друга, позволяют достаточно объективно оценить исследуемое. Использование этого метода требует тщательного подбора экспертов – людей, хорошо знающих оцениваемую область, изучаемый объект и способных к объективной, непредвзятой оценке.

Это все основные эмпирические методы-операции, которыми располагает на сегодняшний день научное сообщество. Далее рассмотрим эмпирические методы-действия, которые строятся на использовании методов-операций и их сочетаний.

Эмпирические методы-действия разделяют на две группы: *методы отслеживания объекта* – это методы изучения объекта без его преобразования, когда исследователь не вносит каких-либо изменений, преобразований в объект исследования (отслеживание, обследование, мониторинг, изучение и обобщение опыта); *преобразующие методы* – это методы связанные с активным преобразованием исследователем изучаемого объекта (опытная работа и эксперимент).

Отслеживание в ряде наук, где исследователь не может что-либо изменить в объекте исследования, является единственным эмпирическим методом-действием. В геомеханике отслеживание позволяет проводить исследования о состоянии подземных сооружений, структуре пород горного массива, состоянии крепи выработок и т.д.

Обследование – это изучение исследуемого объекта с той или иной мерой глубины и детализации в зависимости от поставленных исследователем задач. Синонимом слова «обследование» является «осмотр», что говорит о том, что обследование – это в основном первоначальное изучение объекта, проводимое для ознакомления с его состоянием, функциями, структурой и т.д. Например, при проектировании шахт производится геологическое обследование земных недр с целью определения их состава и механических характеристик.

Мониторинг – это постоянный надзор, регулярное отслеживание состояния объекта, значений отдельных его параметров с целью изучения динамики происходящих процессов, прогнозирования тех или иных событий, а также предотвращения нежелательных явлений. Например, мониторинг состояния анкерной крепи, мониторинг технологических параметров пластовых выработок и т.п.

При проведении исследований изучение и обобщение опыта применяется с различными целями: для определения существующего уровня детальности предприятий, функционирования технологического процесса, выявления недостатков и узких мест в практике той или иной сферы деятельности, изучения эффективности применения научных рекомендаций. Изучение и обобщение опыта является одним из основных источников развития науки, поскольку этот метод позволяет выявлять актуальные научные проблемы, создает основу для изучения закономерностей развития процессов в целом ряде областей научного знания, в первую очередь – так называемых технологических наук.

Опытная работа – это, как уже было сказано, метод внесения преднамеренных изменений в изучаемый объект с известной степенью произвола. Так, геолог сам определяет – где искать, что искать, какими методами – бурить скважины, копать шурфы и т.д.

Эксперимент – общий эмпирический метод исследования (метод-действие), суть которого заключается в том, что явления и процессы изучаются в строго контролируемых и управляемых условиях. Основной принцип любого эксперимента – изменение в каждой исследовательской процедуре только одного какого-либо фактора при неизменности и контролируемости остальных. Если надо проверить влияние другого фактора, проводится следующая исследовательская процедура, где изменяется этот последний фактор, а все другие контролируемые факторы остаются неизменными. В ходе эксперимента исследователь сознательно изменяет ход какого-нибудь явления путем введения в него нового фактора. Новый фактор, вводимый или изменяемый экспериментатором, называется экспериментальным фактором, или независимой переменной. Факторы, изменившиеся под влиянием независимой переменной, называются зависимыми переменными.

В зависимости от характера стратегии экспериментального исследования различают:

- 1) *эксперименты, осуществляемые методом «проб и ошибок»;*
- 2) *эксперименты на основе замкнутого алгоритма;*
- 3) *эксперименты с помощью метода «черного ящика»,* приводящие к заключениям от знания функции к познанию структуры объекта;
- 4) *эксперименты с помощью «открытого ящика»,* позволяющие на основе знания структуры создать образец с заданными функциями [13].

В последние годы широкое распространение получили эксперименты, в которых средством познания выступает компьютер. Они особенно важны тогда, когда реальные системы не допускают ни прямого экспериментирования, ни экспериментирования с помощью материальных моделей. Вычислительные эксперименты значительно упрощают процесс исследования – с их помощью можно сгенерировать большое число разнообразных ситуаций в рамках одной базовой модели изучаемой системы [21].

К теоретическим методам научного познания должны быть отнесены также и некоторые другие виды эксперимента, например, так называемые математические и имитационные эксперименты [16]. *Имитационный эксперимент* представляет собой идеализированное исследование посредством моделирования поведения объекта вместо реального экспериментирования [19]. Иначе говоря, эти виды экспериментирования – варианты модельного эксперимента с идеализированными образами.

Итак, в этом параграфе описаны методы исследования с самых общих позиций. В каждой отрасли научного знания существуют свои традиции в трактовании и использовании методов исследования. Так, метод частотного анализа в лингвистике будет относиться к методу отслеживания (метод-действие), осуществляемому методами-операциями анализа документов и измерения. Эксперименты принято делить на констатирующие, обучающие, контрольные и сравнительные. Но все они являются экспериментами (методами-действиями), осуществляемыми методами-операциями: наблюдения, измерения, тестирования и т.д.

1.3. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе проведения исследования постоянно приходится сопоставлять полученные промежуточные результаты с исходными позициями, с проектом исследования и уточнять сам ход исследования. Фаза проектирования исследования включает в себя стадии: концептуальную, построения гипотезы, конструирования, технологической подготовки исследования [11, 12, 18].

Концептуальная стадия проектирования делится на этапы: выявление противоречия, формулирование проблемы, определение цели исследования, формирование критериев.

На данный момент общепринятой является следующая классификация типов исследований по их направленности в цепи «теория – практика»: *фундаментальные исследования* – направленные на разработку и развитие теоретических концепций науки, ее научного статуса, ее истории. Результаты фундаментальных исследований не всегда находят прямой выход в практику; *прикладные исследования* – решают в большей мере практические задачи или теоретические вопросы практического направления. Прикладные исследования являются логическим продолжением фундаментальных, по отношению к которым они носят вспомогательный характер; разработки – непосредственное обслуживание практики.

При решении задач геомеханики в фундаментальной постановке основным объектом исследований является набор физических характеристик горных пород, влияющий на состояние подземных капитальных и временных сооружений. Прикладные исследования в этом направлении сводятся к изучению состояния конструктивных элементов и системы взаимодействия искусственных сооружений и окружающего их горного массива. Конечными разработками – целью решения задач геомеханики, становятся рекомендации по местоположению, геометрическим характеристикам и конструкциях крепи выработок.

Противоречие – это когда одно высказывание или мысль исключает другое, несовместимое с ним. Выявленное исследователем противоречие может иметь место в практике или в теории науки. Классическими в геомеханике являются примеры противоречий, возникающие между натурными экспериментами и теориями пучения почвы выработок. Каждая новая теория возникает при проявлении новых особенностей пучения почвы выработок. Однако, с ростом глубины разработок или в сложных, редко встречаемых, горно-геологических условиях эти теории не только не подтверждаются, а в результате натуральных наблюдений ставятся под серьезное сомнение. На основе выявленного противоречия исследователь вновь ставит перед собой проблему определения физико-механических причин нарушения целостности пород, образующих почву выработок.

Выдвижение, обоснование проблемы, поиски ее решения играют ведущую роль в творческом процессе научного познания. Под научной проблемой понимается такой вопрос, ответ на который не содержится в накопленном обществом научном знании. С гносеологической точки зрения *проблема* – это специфическая форма организации знания, объектом которого является не непосредственная предметная реальность, а состояние научного знания об этой реальности. Если что-то неизвестно об объекте, например, причины проявления неравномерного деформирования крепи выработки по всему ее контуру, то это уже определенное проблемное знание.

Проблема является формой знания, способствующей определению направления в организации научного исследования – она указывает на неизвестное и побуждает к его познанию. Проблема обеспечивает целенаправленную мобилизацию прежних и организацию получения новых, добываемых в ходе исследования знаний. Проблема возникает в результате фиксации учеными реально существующего или прогнозируемого противоречия, от разрешения которого зависит прогресс научного познания и практики: обобщенно говоря, проблема есть отражение противоречия между знанием и «знанием незнания».

Развитие науки невозможно без выполнения требования целенаправленности. Целенаправленность же в научном творчестве однозначно связана с проблемой [19]. В процессе актуализации проблем исследователь постоянно попадает в ситуации, которые характеризуются высокой степенью неопределенности. Это заставляет ученых в исследовательском процессе обращаться к структуре изучаемой проблемы и находить критерии для более или менее четкого разграничения действительных и мнимых, актуальных, ценных и менее актуальных и значимых проблем.

При этом существенную роль играет внутренняя логика самой теории, так как, если выявлена проблема, лежащая в основаниях теории, то ее разрешение может вызвать целую цепочку следствий. Например, проблемы, сформулированные Давидом Гильбертом на Парижском международном математическом конгрессе 1900-го года, оказали определяющее влияние на развитие математики XX века (более половины из 23-х проблем Гильберта не решены до сих пор). Если бы в геомеханике удалось описать в рамках единой теории все известные виды пучения почвы и деформирования контура выработок, это привело бы к возможности теоретического предсказания оптимальных параметров заложения подземных сооружений в разнообразных горно-геологических условиях.

Постановка проблемы есть, прежде всего, процесс поиска вопросов, которые, сменяя друг друга, приближают исследователя к наиболее адекватной фиксации неизвестного и способов превращения его в известное. Это важный момент постановки проблемы. Неверная формулировка вопроса или неверное понимание места этого научного вопроса в цепочке разрешения проблемы приводит к искажению сути получаемых результатов. В этом случае получаемое решение может быть как частным, так и просто невер-

ным, не отображающим первоначальную формулировку проблемы. Например, в исследованиях поведения анкерного крепления при упрочнении приконтурных горных пород, часто рассматривают анкер как внешнюю приложенную нагрузку, исходя из начальной конструктивной целостности крепи выработки. А вопросы изменения характера взаимодействия породы и элементов анкера не рассматриваются вообще. В результате в ходе решения выбор прочностных характеристик анкера может быть не оправдан, поскольку невозможно в конкретных горно-геологических условиях сохранение целостности системы «анкер – прилегающая порода».

В оценку проблемы входит определение всех необходимых для ее решения условий, в число которых в зависимости от характера проблемы и возможностей науки входит определение методов исследования, источников информации, состава научных работников, организационных форм, необходимых для решения проблемы, источников финансирования, и т.д.

Обоснование проблемы – это, во-первых, определение содержательных, аксиологических (ценностных) и генетических связей данной проблемы с другими – ранее решенными и решаемыми одновременно с данной, а также выяснение связей с проблемами, решение которых станет возможным в зависимости от решения данной проблемы.

Правильная постановка проблемы предполагает состязание аргументов «за» и «против». Именно в фокусе противоположных суждений рождается правильное представление о сути проблемы, необходимости решения и ее ценности, ее теоретической и практической значимости.

Исходным пунктом структурирования проблемы является ее стратификация (расщепление). *Расщепление* – это постановка дополнительных вопросов, целью которых является формирование пути достижения адекватного ответа на основной проблемный вопрос. «Наука ищет пути всегда одним способом, – писал В.И. Вернадский, – она разлагает сложную задачу на более простые, затем, оставляя в стороне сложные задачи, разрешает более простые и только тогда возвращается к оставленной сложной». В ходе аналитико-экспериментальных исследований поведения приконтурных пород выработок необходимо последовательно выполнять большое число экспериментов, целью которых является определение достоверности получаемых данных и их взаимное согласование с базовой теорией, применяемой при расчетах. Таким образом, отрабатывается весь спектр возможных состояний горного массива в рамках одной теории геомеханики, что позволяет выявить ее особенности и привести в соответствие с ними расчетную модель эксперимента.

Далее, в процессе расщепления проблемы необходима ее локализация – ограничение объекта изучения реально обозримыми и посильными для исследователя или исследовательского коллектива пределами с учетом наличных условий проведения исследования [22].

Исследователю крайне важно уметь отказаться от того, что может быть само по себе чрезвычайно интересно, но затруднит получение ответа на тот

проблемный вопрос, ради которого организуется исследование. Например, при проведении исследований напряженно-деформированного состояния крепи горных выработок при вычислительном эксперименте в связи с большим объемом вычислений необходимо определять минимальный и оптимальный показатели детализации реального объекта в вычислительной модели. Приходится выбирать между числом производимых расчетов и длительностью их проведения так, чтобы аналитические результаты исследований могли иметь определенную практическую ценность.

Кроме объекта исследования, его содержание и направленность определяют исследовательские подходы. Категория «исследовательский подход» выступает в двух значениях. В первом значении подход рассматривается как некоторый исходный принцип, исходная позиция. В этом понимании наиболее часто фигурируют системный подход, комплексный подход, синергетический подход и т.п. При проведении аналитико-экспериментальных исследований используют информационный (кибернетический) подход. Во втором значении исследовательский подход рассматривается как направление изучения предмета исследования. Подходы этого рода имеют общенаучное значение, применимы к исследованиям в любой науке и классифицируются по парным категориям диалектики.

Содержательный подход требует обращения к содержанию изучаемых явлений и процессов, выявления совокупности их элементов и взаимодействий между ними, определяющих основной тип, характер этих явлений, процессов. В геомеханике основным содержательным подходом является методика натурных наблюдений состояния выработок, приконтурных пород и элементов крепи. На основе этих наблюдений проводятся систематизация и анализ полученных фактов, что и становится основой синтеза теоретических заключений.

Формальный подход предусматривает извлечение из изучаемых процессов, явлений лишь устойчивых, относительно неизменных характеристик, которые рассматриваются вне связи со всем процессом. Формальный (формализованный) подход позволяет вскрывать устойчивые связи между элементами рассматриваемого процесса или явления [20, 21].

Любое применение математического аппарата, математических моделей явлений, процессов, применение любых символьных или формульных языков – это реализация формального подхода. Аналитико-экспериментальная методика исследований устойчивости горных выработок, описанная в данной работе, представляет собой яркий пример формализованного подхода при решении задач геомеханики.

Естественно, содержательный и формальный подходы взаимосвязаны и взаимообусловлены. Обычно, формальному рассмотрению предмета должен предшествовать его содержательный анализ. В то же время, формализация – перевод на искусственный язык содержательного знания – дополняется и обратным процессом – интерпретацией, содержательным истолкованием формальных результатов. При рассмотрении результатов вычисли-

тельного эксперимента, получаемых в виде эпюр распределения напряжений и деформаций на основе одних и тех же данных, можно сделать различные выводы. Качество анализа данных в этом случае определяет совокупность, тип и вид эпюр, представляющих собой начальный уровень интерпретации результатов эксперимента.

Качественный подход направлен на выявление совокупности признаков, свойств, особенностей изучаемого явления, процесса, определяющих его своеобразие и принадлежность самому себе, а также принадлежность к классу однотипных с ним явлений, процессов. Количественный подход направлен на выявление характеристик различных явлений, процессов по степени развития или интенсивности присущих им свойств, выражаемых в величинах и числах. Например, при рассмотрении задачи об изменении контура выработки под действием горного давления в геомеханике используют качественный подход в исследованиях, а при изучения влияния на контур выработки приближения очистных работ используют, в основном, количественный подход.

При изучении физических параметров горных пород широко используют *феноменологический* (феномен – явление) и *сущностный* подходы. *Феноменологический* подход направлен на описание внешне наблюдаемых характеристик горных пород, проявляющихся под воздействием горного давления. *Сущностный* подход применяется для выявления внутренних механизмов и движущих сил, приводящих к изменению контура выработки, разрушению пород почвы и потери несущей способности элементами крепи выработки.

Феноменологический подход вполне правомерен на определенных этапах развития науки [22]. Так, Ч. Дарвин разработал теорию эволюции, только благодаря обобщению огромного фактического материала, накопленного биологией к тому времени, а И. Кепплер сформулировал законы движения планет на основании обобщения многочисленных наблюдений выполненных астрономом Т. Браге. При этом следует учитывать тот факт, что выводы, получаемые на основе феноменологического подхода, требуют подтверждения получаемого на основе сущностного подхода. Примером может быть теория эволюции, спорность которой становится все более очевидной, так как исследования в области биологии, основывающиеся на других исследовательских подходах, ставят под сомнения выводы, сделанные Дарвином.

На основе объекта и предмета исследования определяется его цель. Цель исследования – это то, что в самом общем виде необходимо достичь по завершении исследования [13].

Конечно, наиболее просто и логически правильно, во всяком случае, формально, сформулировать цель, как это нередко и делается, в короткой фразе: «цель – решить поставленную проблему исследования» (при условии, конечно, что проблема сформулирована грамотно и адекватно). Однако при таком формулировании цели исследователь берет на себя смелость утверждать, что полностью исчерпал проблему. Например, Д.И. Менделеев

открыл Периодический закон и тем самым исчерпал проблему классификации химических элементов, а А. Эйнштейн, создав специальную теорию относительности, решил проблему соответствия законов механики и электродинамики. Но в общем случае рискованно утверждать, что исследователь полностью решил стоящую перед ним проблему.

Когда определена цель исследования, то есть когда становится ясным, какого рода результаты могут быть получены в данном исследовании и какова их возможная структура, исследователь определяет критерии оценки достоверности будущих результатов. Критерий оценки – самый сложный и острый вопрос для любого исследования. Из-за ошибочного выбора критериев результаты исследований могут содержать неправильные выводы о предмете исследования, что в ходе эксплуатации в условиях шахт может приводить к серьезным технологическим авариям.

Результат теоретического исследования должен отвечать следующим принципам, сформулированным в [15] для любых отраслей научного знания:

1) *предметность* – означает, что вся совокупность понятий и утверждений научной теории должна относиться к одной и той же предметной области;

2) *полнота* – означает, что эта теория должна описывать все явления и процессы из ее предметной области;

3) *непротиворечивость* – означает, что все постулаты, идеи, принципы, модели, условия и другие структурные элементы данной теории логически не должны противоречить друг другу;

4) *интерпретируемость* – означает, что теория должна обладать эмпирическим содержанием, должна предусматривать содержательную интерпретацию формальных результатов – без эмпирической интерпретации нет теории, поскольку в противном случае она превращается в простой набор знаков, формул;

5) *проверяемость* – выступает как установление соответствия содержания положений теории свойствам и отношениям реальных объектов;

6) *достоверность* – означает, что в научной теории истинность ее основных положений достоверно установлена.

Естественно, вышеприведенные критерии научной теории являются первоначальными. Они позволяют предварительно оценить результаты теоретического исследования по его завершении. Если выдвигаемая теория не удовлетворяет, хотя бы одному из перечисленных принципов, ее нельзя считать окончательной и в полной мере обоснованной. Окончательным критерием достоверности научной теории является ее реализация в массовой практике. Применительно к теориям, выдвигаемым в геомеханике, окончательным критерием достоверности следует считать внедрение в производственный процесс обеспечения поддержания выработок технологических элементов, повышающих их устойчивость и качество эксплуатации.

Конструирование исследования – это стадия фазы проектирования научного исследования, включающая этапы определения его задач и его планирования. Под задачей понимается данная в определенных конкретных

условиях цель деятельности. Задачи исследования обычно формулируются в одном из двух вариантов: первый – задачи формулируются как самостоятельные этапы исследования с четко обозначенной временной структурой – каждая следующая задача рассматривается только на основе решения предыдущей; второй – задачи формулируются как самостоятельные части исследования без четкой временной последовательности решения.

Например, конструирование исследования поведения горного массива вблизи одиночной выработки формулируется на основе первого варианта. Так как, в исследовании необходимо последовательно решать несколько задач прямо связанных друг с другом по информационной пирамиде – иначе невозможно вычлнить и структурировать параметры, влияющие на распределение напряжений и деформаций в горном массиве. Если говорить о проектировании новых видов крепи, то в данном случае исследование может проходить по второму варианту. Сама крепь может быть разделена на несколько конструктивных элементов, рассматривать поведение которых возможно параллельно.

На следующем этапе стадии конструирования научного исследования происходит создание методики исследования. Методика – это документ, который включает в себя описание проблемы, объекта, предмета исследования, его цели, гипотезы, задачи, методологических основ и методов исследования. Кроме того, создание методики исследования включает в себя еще планирование, то есть разработку временного графика выполнения намеченных работ.

На этом можно считать завершенным рассмотрение фазы проектирования научного исследования. Как было показано, различные задачи, рассматриваемые в рамках геомеханики, могут быть в целом решены на основании обобщенных подходов методологии научных исследований. Четкая классификация и логическая увязка объектов и процессов на основе единого подхода позволяет исследователю не только экономить ресурсы при решении научных проблем, но и делает возможным согласование результатов, получаемых в смежных исследовательских областях. Это тем более важно, когда в качестве опоры на достоверность аналитико-экспериментальных исследований используют натурный эксперимент, что характерно для большинства прикладных наук. Кроме того, в дальнейшем общность в подходе рассмотрения проблем позволила авторам успешно объединить в единое исследование задачи о рассмотрении напряженно-деформированного состояния горного массива и поведение конструктивных элементов крепи выработки.

Далее будет рассмотрена технологическая фаза проведения исследования применительно к задачам геомеханики.

1.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ФАЗА НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Технологическая фаза исследования заключается в непосредственной проверке построенной научной гипотезы в соответствии с разработанным на стадии конструирования и технологической подготовки исследования комплексом рабочих материалов и оборудования. Технологическая фаза состоит из двух стадий: проведения исследования и оформления результатов.

Стадия проведения исследования включает два этапа: *теоретический этап* (анализ и систематизация литературных данных, отработка понятийного аппарата, построение логической структуры теоретической части исследования) и *эмпирический этап* – проведение опытно-экспериментальной работы.

Определим понятия теория науки и научная концепция (теория). Под теорией науки понимается вся совокупность теоретических знаний в той или иной отрасли науки (например, геомеханике). В то же время, в каждой научной области существует множество научных концепций. По сути дела каждая добротная диссертация, представляет собой целостную концепцию [21, 22].

Процесс построения логической структуры концепции состоит из двух этапов: этап первый – *индукция* – восхождение от конкретного к абстрактному, когда исследователь должен определить центральное системообразующее звено своей концепции, пока все результаты не сведутся в авторскую концепцию, буквально несколько строк емкой формулировки, отражающей в самом общем сжатом виде всю совокупность результатов, всю суть работы; этап второй – *конкретизация* – дедуктивный процесс восхождения от абстрактного к конкретному, на этом этапе формулировка концепции развивается, разворачивается в совокупности принципов, факторов, условий, моделей, механизмов и т.п.

В процессе обобщения результатов исследователю приходится, с одной стороны, все время обращаться к своей предметной области в аспекте требований полноты теории – какие при этом «пустоты» образовались в предметной области – их надо будет в дальнейшем заполнять, в том числе, возможно, дополнительной опытно-экспериментальной работой или заимствованием результатов у других авторов. С другой стороны – постоянно соотносить получаемые обобщения и предметную область с совокупностью получаемых результатов опять же в аспекте требования полноты, а также непротиворечивости строящейся концепции.

На этапе индукции, исследователь детально выписывает все имеющиеся у него результаты, все, что представляет интерес. И начинает группировать по определенным основаниям классификаций в первичные обобщения. При аналитико-экспериментальных исследованиях на этом этапе формулируется совокупность предположений поведения модели, что определяет последовательность и характер проведения вычислительных экспериментов [12, 16]. Решение многопараметрической задачи оптимизации может быть выполнено при помощи разнообразного математического аппарата и с учетом раз-

личных комбинаций характеристик объекта исследования. Рассмотрение структуры комбинации прочностных характеристик пород горного массива на этапе индукции, приводит к формированию аналитической модели развития напряженно-деформированного состояния как совокупности параметров: предела прочности, коэффициента Пуассона, угла внутреннего трения, функции реологии и т.п.

Специфика научного исследования состоит в том, что аналитико-экспериментальная работа, хотя она и занимает значительную, а подчас и большую часть бюджета времени исследователя, служит лишь для подтверждения или опровержения предварительно сделанных им теоретических построений, начиная с гипотезы.

Аналитико-экспериментальные исследования начинаются, когда выявлены базовые теоретические построения. Прежде, чем будут организованы и проведены эксперименты, которые подтвердят или опровергнут выдвигаемую гипотезу, необходимо выполнить планирование научной работы. Следовательно, на первом этапе аналитико-экспериментального исследования производится определение совокупности действительных показателей, используемых в виде доступных вариаций при проведении вычислительных экспериментов на втором – экспериментальном этапе. Затем, на третьем этапе, полученные данные подвергаются дополнительной обработке с целью выявления обобщенных зависимостей, получаемых в неявной форме в результате совокупности выполненных исследований.

Теперь более подробно рассмотрим типовые задачи анализа данных и используемые при решении этих задач статистические методы. После выполнения необходимых вычислительных экспериментов, в ряде случаев, полученные результаты должны быть обобщены и проанализированы на предмет их соответствия предложенной теории или гипотезы. Различный тип и (или) объем промежуточных данных определяет, каким конкретно методом анализа данных следует воспользоваться исследователю. Можно выделить следующие общие группы этих задач (табл. 1.2).

Описание данных – компактное описание имеющихся данных с помощью различных агрегированных показателей и графиков. К этому классу можно отнести также задачу определения необходимого объема выборки (минимального числа исследуемых объектов), необходимого для того, чтобы сделать обоснованные выводы.

В практике научных исследований обычно имеется совокупность выполненных расчетов (десятки, сотни, а иногда – тысячи результатов измерений индивидуальных характеристик), поэтому возникает задача компактного описания имеющихся данных. Для этого используют *методы описательной статистики* – описания результатов с помощью различных агрегированных показателей и графиков.

Показатели описательной статистики можно разбить на несколько групп [11]:

- *показатели положения* – описывают положение экспериментальных данных на числовой оси;

- *показатели разброса* – описывают степень разброса данных относительно своего среднего значения (например: выборочная дисперсия, разность между минимальным и максимальным элементами);
- *показатели асимметрии* (например: положение медианы относительно среднего);
- *гистограммы*.

Таблица 1.2

ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

ЗАДАЧА	Описание данных	Изучение сходства и различий	Исследование зависимостей	Снижение размерности	Классификация
МЕТОДЫ	<ul style="list-style-type: none"> • описательная статистика • определение необходимого объема выборки 	статистические критерии: <ul style="list-style-type: none"> • Крамера-Уэлча • Вилкоксона-Манна-Уитни • χ^2 • Фишера 	<ul style="list-style-type: none"> • корреляционный анализ • дисперсионный анализ • регрессионный анализ 	<ul style="list-style-type: none"> • факторный анализ • метод главных компонент 	<ul style="list-style-type: none"> • дискриминантный анализ • кластерный анализ • группировка

Данные показатели используются для наглядного представления и первичного (визуального) анализа результатов измерений характеристик экспериментальной группы.

Рассмотрим сравнение двух выборок (изучение сходства/различий) на примере определения достоверности различия конечных состояний экспериментальной и контрольной группы в вычислительном эксперименте. Для этого формулируются статистические гипотезы:

- *нулевая* – об отсутствии различий;
- *альтернативная* – о значимости (достоверности) различий.

Для принятия решения о том, какую из гипотез (нулевую или альтернативную) следует принять, используют решающие правила – статистические критерии. То есть, на основании информации о результатах вычислений (характеристиках элементов экспериментальной и контрольной группы) по известным формулам [11, 20] вычисляется число, называемое эмпирическим значением критерия. Это число сравнивается с известным эталонным числом, называемым критическим значением критерия.

Критические значения приводятся, как правило, для нескольких уровней значимости. Уровнем значимости называется вероятность ошибки, заключающейся в непринятии нулевой гипотезы, когда она верна, то есть вероятность того, что различия сочтены существенными, а они на самом деле случайны.

При решении задач геомеханики используют уровни значимости, равные вероятности 0,1, или 0,05. В процентах, выборки не различаются с вероятностями 10% и 5%. Соответственно, вероятности того, что выборки различаются, составят 0,9 и 0,95 (в процентах – 90%, 95%). В экономических или психологических экспериментальных исследованиях обычно ограничиваются значением 0,05, то есть допускается не более чем 5% возможность ошибки (95% уровень достоверности различий). В естественных, технических науках чаще требуются уровни достоверности различий 99% или 99,9%. В этом смысле задачи геомеханики стоят отдельно и это относится не только к экспериментальным группам, но и к теоретическим исследованиям состояния подземных сооружений и окружающих их горных пород.

В исследованиях такого рода крайне сложно локализовать существенные и несущественные показатели, определяющие изменения напряженно-деформированного состояния системы «массив-крепь выработки». Поэтому достаточно часто уровни достоверности различий при проведении натуральных и вычислительных экспериментов применительно к задачам геомеханики устанавливают в 90%, а в редких случаях – в 80%.

Если полученное исследователем эмпирическое значение критерия оказывается меньше или равно критическому, то принимается нулевая гипотеза – считается, что на заданном уровне значимости характеристики экспериментальной и контрольной групп совпадают. В противном случае, если эмпирическое значение критерия оказывается строго больше критического, то нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная гипотеза.

Следующим шагом после изучения сходства/различий является установление факта наличия/отсутствия зависимости между показателями и количественное описание этих зависимостей. Для этих целей используются, соответственно, корреляционный и дисперсионный анализ, а также регрессионный анализ [19, 21].

Корреляция (correlation) – связь между двумя или более переменными (в последнем случае корреляция называется множественной). Цель корреляционного анализа – установление наличия или отсутствия этой связи, то есть установление факта зависимости каких-либо явлений, процессов друг от друга или их независимости.

Когда имеются две переменные, значения которых измерены в шкале отнoшений, используется коэффициент линейной корреляции Пирсона r , который принимает значения от -1 до $+1$ (нулевое его значение свидетельствует об отсутствии корреляции), на котором каждая точка соответствует отдельному объекту, описываемому двумя переменным – x и y . Термин «линейный» свидетельствует о том, что исследуется наличие линейной связи между переменными – если $r(x, y) = 1$, то одна переменная линейно зависит от другой (и, естественно, наоборот), то есть существуют константы a и b , причем $a > 0$, такие что $y = ax + b$.

На рисунках (1.2, а, в) изображены ситуации, когда все эксперименталь-

ные точки лежат на прямой (абсолютное значение коэффициента линейной корреляции равно единице). В ситуации, изображенной на рисунке (1.2, б) однозначно провести прямую через экспериментальные точки невозможно (коэффициент линейной корреляции равен нулю).

Если экспериментальные точки сгруппированы около некоторой прямой (рис. 1.2, г, д), то коэффициент линейной корреляции принимает значения, отличные от нуля, причем чем «ближе» точки к прямой, тем выше абсолютное значение коэффициента линейной корреляции. То есть, чем выше абсолютное значение коэффициента Пирсона, тем сильнее исследуемые переменные линейно связаны между собой.

Для данных, измеренных в порядковой шкале, следует использовать коэффициент ранговой корреляции Спирмена (он может применяться и для данных, измеренных в интервальной шкале, так как является непараметрическим и улавливает тенденцию – изменения переменных в одном направлении), который обозначается S и определяется сравнением рангов – номеров значений сравниваемых переменных в их упорядочении.

Изучение наличия или отсутствия зависимости между переменными можно также проводить и с помощью дисперсионного анализа. Дисперсия характеризует «разброс» значений переменной. Переменные связаны, если для объектов, отличающихся значениями одной переменной, отличаются и значения другой переменной. Значит, нужно для всех объектов, имеющих одно и то же значение так называемой независимой переменной, посмотреть, насколько различаются (насколько велика дисперсия) значения другой (или других) переменной, называемой зависимой переменной. Дисперсионный анализ как раз и дает возможность сравнить отношение дисперсии зависимой переменной (межгрупповой дисперсии) с дисперсией внутри групп объектов, характеризуемых одними и теми же значениями независимой переменной (внутригрупповой дисперсией).

Говоря проще, дисперсионный анализ заключается в следующем – выдвигается гипотеза о наличии зависимости между двумя переменными – сечениями подземной выработки и показателем прочности окру-

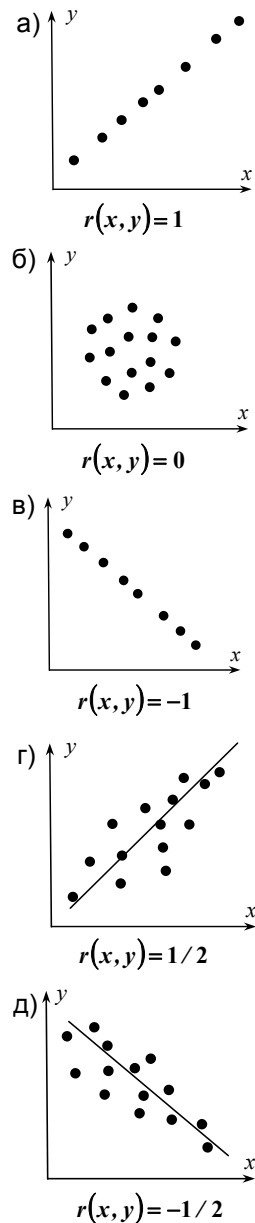


Рис. 1.2. Линейная корреляция в разных ситуациях

жающего ее горного массива. Выделяются группы элементов выборки с одинаковыми значениями независимой переменной – площадью сечения выработки. Если гипотеза о зависимости величины площади поперечного сечения выработки от прочности пород горного массива верна, то значения зависимой переменной внутри каждой такой группы должны различаться не очень сильно (внутригрупповая дисперсия уровня образования должна быть мала). Напротив, значения зависимой переменной для различающихся по возрасту групп сотрудников должны различаться сильно (межгрупповая дисперсия уровня образования должна быть велика). То есть, переменные зависимы, если отношение межгрупповой дисперсии к внутригрупповой велико. Если же гипотеза о наличии зависимости между переменными не верна, то это отношение должно быть мало.

Регрессионный анализ предназначен для того, чтобы найти явный вид функциональной зависимости между переменными. Для этого предполагается, что зависимая переменная (отклик) определяется известной функцией (моделью), зависящей от независимой переменной или переменных (факторов) и некоторого параметра. Требуется найти такие значения этого параметра, чтобы полученная модель наилучшим образом описывала имеющиеся экспериментальные данные. Например, в простой линейной регрессии предполагается, что зависимая переменная y является линейной функцией $y = ax + b$ от независимой переменной x . Требуется найти значения параметров a и b , при которых прямая $ax + b$ будет наилучшим образом описывать (аппроксимировать) экспериментальные точки $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$.

Можно использовать полиномиальную регрессию, в которой предполагается, что зависимая переменная является полиномом (многочленом) некоторой степени от независимой переменной. Например, полиномом второй степени (знакомая всем из школьного курса алгебры парабола) будет зависимость вида $y = ax^2 + bx + c$ и задачей регрессии будет нахождение коэффициентов a , b и c . Возможно также использование множественной регрессии – определения зависимости одной переменной от нескольких факторов (независимых переменных).

Регрессионный анализ, помимо того, что он позволяет количественно описывать зависимость между переменными, дает возможность прогнозировать значения зависимых переменных – подставляя в найденную формулу значения независимых переменных, можно получать прогноз значений зависимых. При этом следует помнить, что построенная модель «локальна», то есть, получена для некоторых вполне конкретных значений переменных. Экстраполяция результатов модели на более широкие области значений переменных может привести к ошибочным выводам.

В результате проведения аналитико-экспериментальных исследований возникают большие массивы информации. Например, в ходе проведения вычислительного эксперимента по изучению устойчивости горной выработки

при различных условиях ее эксплуатации с учетом изменения прочностных характеристик отдельных расчетных областей, результатом расчетов будет многомерный массив данных с числом элементов, равным произведению числа расчетных областей на число прочностных характеристик и на число выбранных комбинаций этих показателей. Возникает вопрос, а все ли полученные данные являются информативными. Желательно сразу выявить существенные переменные и сконцентрировать внимание на них. В этом случае могут помочь соответствующие статистические методы, примеры которых будут рассмотрены ниже.

Существует целый класс задач снижения размерности, цель которых как раз и заключается в уменьшении числа анализируемых переменных либо посредством выделения существенных переменных, либо/и построения новых показателей, на основании полученных в результате эксперимента. Для снижения размерности используется факторный анализ, основными методами которого являются приведенные ниже метод главных компонент и многомерное шкалирование [21].

Метод главных компонент заключается в получении нескольких новых показателей – главных компонент, являющихся линейными комбинациями исходных показателей, полученных в результате эксперимента. Главные компоненты упорядочиваются в порядке убывания той дисперсии, которую они «объясняют». Первая главная компонента объясняет большую часть дисперсии, чем вторая, вторая – большую, чем третья и т.д. Понятно, что чем больше главных компонент будет учитываться, тем большую часть изменений можно будет объяснить.

Преимущество метода главных компонент заключается в том, что зачастую первые несколько главных компонент (одна-две-три) объясняют большую часть изменений большого числа показателей. Кроме того, может оказаться, что в первые несколько главных компонент входят не все исходные параметры. Тогда можно сделать вывод о том, какие параметры являются существенными, и на них следует обратить внимание в первую очередь.

Решив задачи описания данных, установления сходства/отличий, проанализировав качественно и количественно зависимости между переменными и выявив существенные переменные, можно анализировать соотношение групп переменных и прогнозировать значения одних переменных в зависимости от значений других переменных или времени развития того или иного процесса.

Во многих экспериментах имеется значительное число объектов (субъектов). В результате измерения их показателей получается набор их частных оценок. Понятно, что сравнивать между собой и анализировать одновременно все частные оценки не всегда возможно и целесообразно, так как всегда существует их разброс, обусловленный неконтролируемым различием объектов эксперимента.

Поэтому для того, чтобы, во-первых, получить обозримое число характеристик и, во-вторых, для того, чтобы сгладить индивидуальные колебания,

используют так называемые агрегированные (коллективные, групповые, производные) оценки. Например, если имелись частные (индивидуальные) замеры пучения пород почвы на отдельных участках подземных выработок, то агрегированной оценкой будет усредненный показатель для всех участков. Использование кавычек не случайно, так как получение агрегированных оценок на основании частных является их преобразованием, и преобразование это следует выполнять корректно.

Нередко встречаются случаи, когда какое-либо изучаемое явление, процесс характеризуется несколькими показателями – вектором показателей. При этом часто возникает вопрос о возможности однозначной оценки явления, процесса или изучаемых их свойств одной величиной – комплексной оценкой.

Достаточно простым и интуитивно понятным методом агрегирования балльных оценок является использование так называемых матриц свертки [20], элементы которых содержат значения агрегированного показателя, а агрегируемые баллы задают номер строки и столбца.

В некоторое оправдание используемым на практике некорректным построениям комплексных оценок следует отметить, что проблема агрегирования векторных оценок на сегодняшний день исследована не полностью, а существующие результаты, даже для их применения на практике, зачастую требуют хорошего знания высшей математики. Качественно проблема векторных оценок (проблема принятия решений при многих критериях) может быть проиллюстрирована следующим образом: имеются два варианта крепи подземной выработки с одной и той же себестоимостью возведения же размером первоначальных вложений (допустим, 5000 гривен за погонный метр), причем первый характеризуется более продолжительным периодом эксплуатации (300 дней), но и более высоким риском конструктивного разрушения (предположим, что вероятность разрушения равна 0,2), чем второй (период эксплуатации – 200 дней, вероятность конструктивного разрушения – 0,05). Какой из проектов крепи следует выбрать для монтажа в реальных условиях? Ответ не может быть однозначным. Если бы первый вариант крепи лучше сохранял эксплуатационные характеристики выработки и был менее рискованным, то следовало бы выбирать его. Но в данном случае имеются два критерия, в каждом из которых лучше только одна из предложенных альтернатив. Тогда на первом шаге выделяют множество эффективных альтернатив по Парето, то есть таких альтернатив, для которых не существует других допустимых альтернатив, которые были бы «не хуже» по всем критериям, а по одному из критериев – «строго лучше». В рассматриваемом примере оба проекта эффективны по Парето.

Уже на втором шаге может возникнуть несколько вариантов проведения дальнейшего анализа:

- вводится комплексный критерий, оценка по которому будет вычисляться агрегированием оценок по исходным критериям;
- упорядочиваются критерии по важности. Если считать продолжитель-

ность эксплуатации выработки более важным критерием, чем риск конструктивного разрушения, то следует выбрать первый проект, иначе – наоборот;

– возможны и другие варианты принятия решений, часть из которых будет обеспечивать выбор первого варианта крепи, а другая часть – второго.

Даже из приведенного элементарного примера многокритериальной задачи принятия решений видно, что универсальных «рецептов» в этой области не существует [11]. Если получены количественные результаты по отдельным показателям, то можно ограничиться их качественной интерпретацией, не загоняя под общий знаменатель, проанализировать и сравнить исследуемые объекты отдельно по каждому из показателей. Такой подход наиболее оправдан при проведении анализа данных аналитико-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния системы «массив-крепь выработки». В отдельном, пусть и достаточно объемном исследовании невозможно промоделировать все аспекты, влияющие на изменение контура выработки в реальном горном массиве. С другой стороны, снижение числа критериев может привести к неадекватности получаемых результатов или утрировать модель, что сделает бессмысленным последующий анализ первичных данных.

Теперь перейдем на изложение собственно практических аспектов методологии проведения аналитико-экспериментальных исследований, результаты которых будут приведены в данной работе в следующих главах. Основные теоретико-практические методы проведения научных исследований уже в общем виде были изложены выше. В дальнейшем основной упор будет сделан на частные моменты реализации методологии аналитико-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния системы «массив-крепь выработки» методом конечных элементов. Именно результаты этих научных вычислительных экспериментов составляют основу данной работы.

2. ГЕОМЕХАНИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТОВЫХ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

2.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Проблема прогнозирования проявлений горного давления в подземных выработках имеет уже вековую историю и по-прежнему не потеряла своей актуальности, что подтверждается многочисленными современными исследованиями геомеханических процессов в окрестности выработок. Такой интерес к данной проблеме обусловлен, прежде всего, нуждами горнодобывающей отрасли, поскольку устойчивость сети подземных выработок предопределяет эффективность функционирования шахты в целом. Не ослабевающий научный интерес поддерживается постоянным развитием геомеханических моделей взаимодействия породного массива с крепью горной выработки в плане более полного и достоверного учета гаммы физико-механических свойств массива, его структуры, конструктивных особенностей крепи и режимов ее работы.

Принципиально новый качественный уровень современных геомеханических исследований сформировали два основных фактора: развитие компьютерной техники с соответствующим программным обеспечением и создание достаточно обширной базы данных механических свойств горных пород как в допредельном, так и в запредельном состояниях с учетом реологии поведения массива и ослабляющих воздействий геологического и техногенного характера. Сочетание указанных факторов позволяет решать не доступные ранее весьма сложные геомеханические задачи, характеризующиеся одно-временным учетом пространственной неоднородности механических, геометрических и силовых параметров системы «слоистый массив-крепь выработки».

В этой связи новые потенциальные возможности исследований настоятельно требуют совершенствования системного методологического подхода при моделировании геомеханических процессов в окрестности выработки, главная концепция которого заключается в максимально достоверном отражении свойств, структуры, конструктивных и силовых параметров объекта исследования.

Накопленный опыт компьютерного исследования геомеханических процессов указывает на целесообразность поэтапного приближения модели к реальному объекту с многократным повторением циклов оценки достоверности и адекватности полученных результатов. Поэтапность исследований

подразумевает:

– моделирование механических свойств породного массива в несколько последовательных стадий: упругое и упругопластическое деформирование в допредельном состоянии, деформирование в запредельном состоянии с учетом разупрочнения и разрыхления породы, реологическая модель упругопластического деформирования в допредельном состоянии, реологическая модель полной диаграммы деформирования породы;

– моделирование структуры массива в окрестности выработки: слоистый углевмещающий массив, представленный породами с различными физико-механическими свойствами; массив с нарушенными контактами между породными слоями; нарушенные контакты между породными слоями с моделированием основных систем природной трещиноватости в пределах каждого слоя;

– моделирование крепи производится для типовых сечений горных выработок в направлении последовательного приближения к ее реальным конструктивно-технологическим особенностям: крепи с межрамным ограждением и забутованным закрепным пространством; пространственное (третья координата – продольная ось выработки) моделирование группы рам с конструктивной идеализацией узлов податливости (замковых соединений) и межрамного ограждения; пространственное моделирование в упругой постановке (обязательное для дискретно устанавливаемых вдоль выработки типов крепей рамных, анкерных, рамно-анкерных, металло-бетонных и т.п.) с конструктивной идеализацией наиболее геометрически сложных узлов при сохранении принципа их работы; пространственное моделирование в упругой постановке с полным отображением геометрических параметров всех узлов крепи; пространственное моделирование по полной диаграмме деформирования материалов (сталь, бетон, дерево и другие, забутовка из разрушенной породы или заполнение тампонажным раствором закрепного пространства, упрочненные твердеющими смесями приконтурные породы и так далее) всех реальных конструктивных особенностей конкретного типа крепи;

– поэтапное обоснование исходных положений моделирования: на первой стадии выбирается (наиболее характерная для конкретной горно-геологической и горнотехнической ситуации) структура и свойства вмещающего выработку породного массива, конструкция крепи, начальные и граничные условия ее взаимодействия с приконтурными породами, размеры пространственной модели и т.п.; на второй стадии выбирается наиболее характерные (для данной шахты или геолого-промышленного района) диапазоны изменения структуры и свойств вмещающего массива, интервалы вариации типовых сечений выработок с соответствующими конструкциями крепи и ее типоразмерами, варианты режимов работы крепи с соответствующими граничными условиями; на третьей стадии исследуется поведение системы «слоистый массив-крепь выработки» для крайних значений выбранных диапазонов применения ее параметров; на четвертой стадии обосновываются диапазоны изменения основных влияющих параметров систе-

мы «слоистый массив-крепь выработки», варианты начальных и граничных условий ее деформирования, целесообразные размеры геомеханической модели применительно к конкретной выработке, шахте или геолого-промышленному району;

– оценка достоверности и адекватности геомеханической модели: последовательная оценка отдельно каждого из принятых в модели идеализаций и допущений по геометрическим, механическим и силовым параметрам системы «слоистый массив-крепь выработки» на основе соответствующих расчетов и последующего анализа ее напряженно-деформированного состояния (НДС) по каждой из компонент напряжений и перемещений; анализ степени погрешности допущений и идеализаций формируемой геомеханической модели и ее корректировка по результатам анализа; проверка адекватности и достоверности результатов моделирования на соответствие существующим аналитическим, лабораторным и шахтным исследованиям и корректировка модели на основе полученных выводов;

– обобщение результатов моделирования и разработка рекомендаций: для обоснованных ранее диапазонов изменения геометрических, механических и силовых параметров системы «слоистый массив-крепь выработки» проводится комплекс расчетов ее НДС, который формирует базу данных для построения уравнений регрессии связи параметров системы (существенно влияющих на ее НДС) и характеристик состояния выработки; на основе семейства уравнений регрессии создается методика прогноза проявлений горного давления и оценки состояния выработки для конкретной шахты или геолого-промышленного района в целом.

2.2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Широкое многообразие подходов к расчету рациональных параметров схем крепления горных выработок можно систематизировать по применяемым методам исследования: аналитические и численные методы, лабораторные исследования на эквивалентных и оптически активных материалах, исследования непосредственно в шахтных условиях.

Как правило, шахтные исследования призваны оценить достоверность той или иной методики расчета, полученной аналитическим путем, реальным условиям и в случае необходимости уточнить с помощью поправочных коэффициентов. Создание методики расчета рациональных параметров средств крепления, исключительно на базе шахтных экспериментов, весьма трудоемко и продолжительно во времени, что обусловлено влиянием на состояние выработки большого количества факторов.

Моделирование горно-геологической и горнотехнической ситуации в окрестности пластовой выработки с помощью эквивалентных материалов также имеет дискретный характер определения параметров конструкции крепи при

значительной трудоемкости проведения исследований. Однако, на моделях из эквивалентных материалов можно проследить процесс деформирования и взаимовлияния элементов исследуемой геомеханической системы.

Указанных недостатков в определенной степени лишены аналитические и численные методы исследования, обладающие общностью результатов решения.

Математическое моделирование и вычислительный эксперимент – ведущие методологии изучения глобальных моделей процессов и явлений на Земле. В задачах геомеханики применение математического эксперимента позволяет избежать лишних трудоемких натурных экспериментов, постановка которых не только требует значительных финансовых затрат, но и приводит к существенным потерям времени на производстве.

Особенности решения задач геомеханики можно выделить в три основные группы [23, 24]:

- учет строения горных массивов, связанный с наличием в них породных слоев, существенно различающихся по механическим свойствам, разделенных различными поверхностями природной трещиноватости с разными сцеплением и трением по этим поверхностям;

- в ходе решения задачи приходится учитывать не только упруго-пластическое деформирование, но и так называемые стадии разупрочнения и разрыхления в определенных областях горного массива;

- геомеханические процессы в горном массиве зависят от реологических характеристик породных слоев, размеров и взаимного расположения горных выработок, их изменения во времени и пространстве при ведении горных работ.

Поскольку формирование расчетных схем для задач геомеханики связано с необходимостью описания большого числа нерегулярных параметров и сложных граничных условий, исследователи прибегают к вынужденному упрощению в постановке задачи с целью снижения размерности уравнений, описывающих систему, и функций, учитывающих особенности начальной нагрузки и геометрии.

Если на ранних стадиях развития численных методов считалось возможным получение с их помощью для задач геомеханики только качественных результатов [24], то с развитием самих численных методов и представлений о напряженно-деформированном состоянии (НДС) горного массива становится возможным получение не только адекватных качественных, но и в достаточной мере точных количественных результатов [23].

Все многообразие расчетных схем можно представить как комбинацию трех основных классов:

- *геометрические признаки*: понятия плоского или пространственного решения; наличие или отсутствие симметрии; использование одно-, двух- и многосвязных областей и т.п.;

- *внешние воздействия и механические свойства породного массива и инженерных конструкций*: учет фильтрации жидкости и газа; изотропная,

орто- или анизотропная среда; упругая, упругопластическая или вязкопластическая деформация массива; без или с учетом разупрочнения и разрыхления пород и т.д.;

– *конструктивно-технологические особенности сооружения, охраны и функционирования выработок*: конструктивно-технологическая схема проведения выработок; последовательность ведения подготовительных и очистных работ; виды выработок и способы их охраны, а также конструкции и режимы работы крепи.

Каждый класс расчетных схем порождает отдельный подход в формировании математической модели, а комбинация учитываемых факторов позволяет усложнять или упрощать предлагаемое решение. Поэтому исторически можно наблюдать картину поэтапного усложнения математических моделей, используемых в задачах геомеханики.

В стремлении снизить вычислительные затраты большинство исследователей сознательно идут на упрощение модели математического эксперимента – не всегда оправданное. Во многих работах вообще отсутствует критическая оценка избираемых параметров расчета, комбинация которых и в конкретных условиях может дать значительные отклонения в получаемых результатах. Отсюда следует, что развивать расчетные модели необходимо по пути максимального приближения их к реальным условиям эксплуатации, то есть к созданию модели среды горного массива и элементов крепи выработок, находящихся в сложных условиях взаимодействия, с учетом локальных нарушений, связанных с натурными геотехногенными условиями.

Из всего вышеизложенного следует сделать вывод о необходимости разработки математической модели, способной отображать реальное состояние приконтурного породного массива, форму выработки, ее крепь и способ охраны с учетом максимально возможного числа геологических и техногенных факторов. Создание такой модели невозможно без всестороннего анализа большого числа расчетов, проводимых с выбором разнообразных начальных и граничных условий для конкретной расчетной схемы. Такой подход позволит разработать и вычислительно доказать адекватность создаваемой модели, которую целесообразно использовать для проведения математического эксперимента в научно-прикладных целях.

Для разработки новой вычислительной модели целесообразным является:

– выполнение ее в объемной постановке, описывающей весь спектр взаимодействия отдельных элементов крепи как между собой, так с породами примыкающего к поверхности выработки горного массива;

– определение полной диаграммы «напряжение-деформация» пород и материалов крепи;

– выявление влияния структуры горного массива, в том числе геологических нарушений и условий контакта породных слоев.

При решении задач геомеханики постоянно приходится сталкиваться с проблемой расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. Горный массив и слагающие его

породы обладают большим числом характеристик, учет которых при математическом моделировании возможен только при использовании конечно-разностных схем расчетов. В настоящее время стандартом де-факто при решении геомеханических задач стал метод конечных элементов (МКЭ).

С конца 60-х и до середины 80-х годов XX столетия выполнены обширные исследования учеными-механиками (в первую очередь необходимо выделить работы О.К. Зенкевича, Б.З. Амусина, Ж.С. Ержанова, В.Ю. Изако-на, Ю.М. Либермана, А.Б. Фадеева, Е.М. Морозова и др.), которые заложили основу методологии применения МКЭ к решению задач геомеханики в упругой и упруго-пластической постановке. В этот период основной проблемой, препятствующей широкому применению МКЭ в геомеханике, стало несоответствие между сложностью созданных математических моделей и вычислительными мощностями компьютеров.

По существу анализа современных работ, посвященных конечно-разностному моделированию геомеханических процессов в окрестности подземных выработок, четко прослеживаются следующие тенденции развития данного направления исследований.

Во-первых, наиболее широко используется метод конечных элементов, имеющий наиболее универсальные возможности. Однако, при решении сложных геомеханических задач, одновременно рассматривающих многофакторность механических свойств пород, неоднородности структуры вмещающего массива и геометрических параметров объекта, возможна комбинация МКЭ, МГЭ и МДЭ для получения более достоверного решения. Основная сложность применения такой комбинации заключается в объективном отражении физической сущности процесса на границе сопряжения элементов модели, которые исследуются различными конечно-разностными методами.

Во-вторых, многие задачи требуют пространственной постановки для более достоверного отражения геомеханических процессов, что и наблюдается на современном этапе оценки состояния массивов горных пород.

В-третьих, все большее число работ посвящается учету неоднородности механических характеристик массива и его структуры, весьма существенно влияющей на результаты расчета поля НДС вокруг выработок, как это было установлено при исследовании широкого круга задач.

В-четвертых, неуклонно расширяется количество работ, в которых учитывается не только пластические и реологические свойства горных пород, но и полная диаграмма их деформирования (предельное и запредельное состояния), что, по мнению авторов, повышает достоверность расчетов и приближает геомеханическую модель к реальному объекту.

Можно выделить три основных группы факторов, влияющих на развитие методики применения МКЭ в задачах геомеханики:

- *описание физико-механических характеристик пород* – постоянно продолжается усложнение описательной части характеристик пород различного типа и условий их залегания;

- анализ технологических факторов строительства и эксплуатации шахт и подземных сооружений – разработка новых типов и методик использования начальных и граничных условий, применяемых в расчетной модели;
- корректировка теорий прочности и пластичности, используемых при компьютерном моделировании – особенности конечно-разностной схемы позволяют модернизировать условия перехода и развития зон предельного и запредельного состояния материала, получаемых в ходе расчета МКЭ.

Несмотря на широту рассмотренных моделей, тем не менее, видно, что для большинства случаев решения задач геомеханики возможно применение классических математических моделей механики деформируемого твердого тела. Однако, многообразие получаемых решений говорит о практической универсальности МКЭ для задач геомеханики и перспективности развития данного метода расчета в дальнейшем.

Принимая во внимание необходимость учета комплекса геомеханических и горнотехнических факторов очевиден вывод о целесообразности использования для решения поставленных задач современных компьютерных программ метода конечных элементов: построение моделей – программа *Solid Works 2005*, расчет напряженно-деформированного состояния элементов системы в упругой постановке – приложение *Desain Star*, учет анизотропии материалов – программа *Cosmos-M*.

Кроме того, для удобства описания всех этапов решения задачи, исследуемый объект назван (как взаимовлияющая и взаимосвязанная геомеханическая структура): система «слоистый массив-крепь выработки».

2.3. ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В основу проведения исследований в данном случае положена следующая обобщенная логическая структура:

- разработка и оптимизация расчетной модели вычислительного эксперимента;
- первичное тестирование расчетной модели для различных показателей физических свойств ее элементов;
- проведение последовательности основных вычислительных экспериментов;
- первичная подготовка полученных данных, заключающаяся в определении объемных эпюр напряжений и деформаций различных элементов расчетной модели;
- статистическая обработка и выявление критически важных показателей результатов расчетов;
- формирование технологических критериев, на основе которых определяются оптимальные показатели крепления и поддержания горной выработки.

При проведении расчетов методом конечных элементов в задачах геоме-

ханики применяются два вида расчетных моделей: *плоская* и *пространственная*. В нашем случае сделан выбор в пользу пространственной модели. Она обладает, с нашей точки зрения, рядом преимуществ перед плоской моделью:

- позволяет учитывать в расчетах неоднородность породного массива в двух перпендикулярных вертикальных плоскостях;
- максимально точно отображает условия контакта между элементами крепи выработки и горным массивом;
- позволяет в полной мере реализовывать в расчетах все возможные физические характеристики реальных объектов.

Проще говоря, использование такого вида расчетной модели минимизирует возможности исследователя на внесение побочных ошибок в результат расчета. Например, в ряде опубликованных результатов исследований поведения горного массива вблизи выработки указывается на то, что учет силы трения между породными слоями не имеет смысла. Такой вывод часто делается авторами, использующими в моделировании задачи плоскую постановку, хотя на практике и при выполнении объемного моделирования это не подтверждается.

Дело не в самой силе трения, а возможности свободного перемещения породных слоев относительно друг друга. В плоской постановке сложно адекватно задать данную физическую характеристику, отсюда большая внутренняя погрешность вычислений. И как результат – неадекватные первичные данные расчетов, на основе которых делаются соответствующие выводы. Для пространственной модели такие проблемы не характерны.

Построение расчетной модели начинается с изучения строения горного массива в зоне расположения подземной выработки. Таким образом, выделяются элементы горного массива (породные слои), которые обладают характерными геометрическими и механическими характеристиками. Для каждого из слоев строится трехмерная модель, имеющая горизонтальные размеры порядка ста метров. Затем, модели слоев собираются в модель горного массива в соответствии с его реальной структурой.

Следующим этапом становится моделирование выработки в горном массиве. Эта операция достаточно проста и заключается в двух действиях: построение поперечного сечения выработки и расположение оси выработки в нужном месте модели горного массива.

После этого или параллельно, создается модель крепи выработки. Технология создания этой модели значительно различается не только для различных видов крепи, но и для различных условий проведения расчетных экспериментов. Кроме того, отдельной, а иногда и значительной проблемой, является процедура размещения модели крепи в модели горного массива с выработкой. Часто эти действия носят не тривиальный характер, и их описание требует отдельной большой публикации.

В понятие решение проблемы методом конечных элементов зачастую включают не только подход к решению прикладных задач, но и совокупность

численных методов, позволяющих получить результат в различной постановке исходной задачи. Выбор постановки задачи целиком ложится на плечи исследователя и должен быть обусловлен особенностями реального объекта и расчетной модели, созданной на его основе.

В нашем случае последовательно выполнялись расчеты для одной и той же расчетной области в условиях упругой, упругопластической и учета реологических свойств пород при постановке задачи. Сравнительный анализ результатов, полученных таким образом, позволяет определить правомерность выбора того или иного типа физической задачи, в рамках которой возможно получение приемлемых, с точки зрения правдоподобности, окончательных выводов исследований.

Более того, в ходе проведения расчетов на данном этапе исследования проводится анализ значимости отдельных показателей расчетной модели на результаты определения напряженно-деформированного состояния системы «слоистый массив-крепь выработки». В это понятие входят: определение наилучших показателей сходимости численных методов; условия контакта между элементами расчетной модели; начальные условия расчета; граничные условия модели; внешний размер расчетной области; уровень детализации и вид вычислительной сетки.

Метод конечных элементов относится к так называемым сеточным методам, для которых характерно разбиение основной области расчета на более мелкие расчетные подобласти. Такая подобласть в этом методе называется конечный элемент.

Физическое состояние конечного элемента описывается набором непрерывных математических функций, вид которых для каждого элемента может быть задан произвольным образом. Поэтому геометрические размер и форма конечного элемента определяют точность и размерность производимых расчетов. Понятно, что построение вычислительной сетки, определение ее оптимальных параметров является отдельной специфической подзадачей проводимых вычислительных экспериментов.

В нашем случае выбор формы конечного элемента в виде тетраэдра обусловлен его достаточной универсальностью в описании различных геометрических форм. А рассмотрение конечного элемента как геометрической фигуры второго порядка позволяет несколько увеличить размер самого элемента без потери точности вычислений. Вычислительная сетка имеет переменный шаг – это делает возможным качественное описание всех элементов расчетной модели, не зависимо от их линейных размеров.

Кроме того, для последующего анализа, при построении сетки конечных элементов были использованы контрольные точки (датчики). В такую точку при построении вычислительной сетки обязательно помещается узел конечного элемента, что позволяет получить «точное» значение напряжений и деформаций в характерной точке расчетной области. В проведенных исследованиях эти точки размещались по контуру выработки и на внешней поверхности крепи выработки: в верхней точке свода; в пяти точках почвы; в

точках перехода боковой стенки выработки в свод.

Итак, после построения вычислительной сетки и определения основных показателей, влияющих на качество расчета, происходит переход к проведению самого вычислительного эксперимента. На данном этапе исследователь выполняет в большей степени пассивную роль. Его участие в проведении эксперимента сводится к наблюдению за процессом расчета и при необходимости внесению изменений в расчетную конфигурацию вычислительной машины. Но иногда, в том числе и при проведении данных исследований, результаты, получаемые в ходе проведения основных расчетов, требовали дополнительного тестирования модели. В этом случае вычислительного эксперимента такой откат на предыдущий этап исследований был вызван следующими факторами: промежуточные расчеты показали возникновение особых точек в зонах, где по теоретическим предпосылкам их быть не должно; неверно были выбраны условия контакта элементов крепи; анализ сходимости численных методов, используемых в расчетах, показал их неудовлетворительное качество.

На современном этапе развития методологии вычислительного эксперимента стандартно принято визуализировать полученные результаты для простоты их последующего анализа. При использовании в исследованиях объемной вычислительной модели для представления и последующего анализа результатов необходимо выбирать характерные сечения.

В рассмотренной задаче выделено три, безусловно, характерных сечения: вертикальное сечение вдоль выработки, проходящее через ось ее симметрии; вертикальное поперечное сечение, относительно продольной оси выработки – сечение, проходящее через ось симметрии профиля рамной крепи; вертикальное поперечное сечение, относительно продольной оси выработки – сечение равноудаленно проходящее между двумя соседними рами. Наиболее информативным сечением, по результатам первичного тестирования, было выбрано последнее.

Для этого сечения были выбраны и построены следующие четыре эпюры: интенсивности напряжений; нормальных вертикальных напряжений; нормальных горизонтальных напряжений; полных перемещений. Выбор этих эпюр обусловлен общим подходом к анализу первичных данных расчета. Среди других возможных вариантов эпюр (главные напряжения, касательные напряжения, линейные деформации и т.п.) эти эпюры наиболее информативны и легко читаемы с точки зрения прикладного анализа данных. Кроме того, для данного вида решаемой задачи комплексный анализ этих эпюр обеспечивает всеобъемлющее описание напряженно-деформированного состояния расчетной модели.

В некоторых случаях эпюры строились только для отдельных элементов вычислительной модели – отдельно крепь выработки; отдельно породные слои горного массива. Такой подход обуславливается необходимостью качественного анализа эпюр, как для крепи, так и для горного массива. Просто порядок значений напряжений в крепи выработки и окружающем ее горном

массиве значительно различия. Отсюда становится невозможным в рамках одной эпюры подобрать такой диапазон значений, который сделал бы возможным визуальное отображение градиента напряжений во всей расчетной области.

При решении задачи в упруго-пластической постановке и с учетом реологии породных слоев эпюры напряжений для удобства анализа представляют в виде анимационных роликов, показывающих процесс изменения поля напряжений на различных этапах расчета.

Следующим этапом подготовки первичных данных является построение обычных графиков, отображающих в одной или нескольких контрольных точках состояние или изменение определенной физической характеристики. Для этого по номеру расчетного узла производится выборка информации из массивов данных, полученных в результате расчетов. Извлеченные табличные данные, при необходимости, агрегируются в сводные таблицы, в последующем используемые для построения необходимых графиков.

Статистической обработке результатов вычислений и формированию технологических критериев посвящены следующие разделы данной работы. Поэтому в этой главе особенности их реализации, в рамках выработанной методологии исследований не рассматриваются.

Таким образом, нами рассмотрены базовые структуры построения современной научной методологии, приведены особенности реализации методологии научных исследований при решении задач геомеханики, описана основная логическая структура исследований напряженно-деформированного состояния системы «слоистый массив-крепь выработки» методом конечных элементов.

2.4. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Основой современного вычислительного эксперимента являются численные методы. Каждый численный метод использует для проведения расчетов математическую модель, описывающую реальный объект или процесс. Проблема адекватности математических моделей имеет непосредственное отношение к эффективности функционирования в процессе эксплуатации программного обеспечения, реализующего вычислительный эксперимент. Выдаваемые программным продуктом практические результаты в значительной степени зависят от надежности информации, используемой при математическом моделировании в качестве начальных и граничных условий.

В работах, посвященных исследованию состояния горного массива ослабляемого системой выработок, используются приближенные методы анализа математических моделей, описывающих сложное взаимодействие крепи с породной средой. Существенная нелинейность и вероятностная основа таких моделей, невозможность строгого учета компонент вектора состояния ставят перед исследователями сложные проблемы анализа ситуации, пре-

одоление которых связано со специфическими трудностями и требует большого труда и навыков. Современные работы такого направления выполняются на базе обобщения идей и методов на все более абстрактные ситуации, требующие новых разработок и конструкций. Используемые подходы иногда создают видимость исчерпывающего решения задачи, тогда как проблема состоит не в возможности получения приближенного решения, а в фактической эффективности предлагаемого алгоритма вычислительного эксперимента.

Видимая тривиальность вычислительных задач способствует появлению работ, не связанных с экспериментальной проверкой полученных данных. В отдельных случаях даже не содержится подробного алгоритма и численного материала, позволяющего судить об эффективности метода и качестве оценки полученного результата с позиций вычислительной математики. Искусство анализа и квалификация результата как близкого к экспериментальным данным – необходимый элемент исследовательской работы. Трудности решения задач геомеханики состоят в том, что сравнительно малая погрешность в исходных данных при вычислении компонент математических моделей связана с большой неопределенностью в конечном решении. Такая ситуация особенно недопустима в задачах оценки потери устойчивости приконтурных пород выработки. Так как решение представляет собой информацию о важнейшем параметре, влияющем на устойчивость выработки, погрешность при оценке которого на практике может привести к тяжелым последствиям.

Теперь рассмотрим четыре ключевых момента, определяющих адекватность результатов вычислительного эксперимента в задачах геомеханики, решаемых на основе абстрактной математической модели.

Первый – планирование эксперимента. Возникающие при практическом решении задач геомеханики особенности планирования эксперимента часто выходят за рамки классического подхода и требуют специального обобщения с учетом специфики рассматриваемых проблем. При решении задачи, максимально приближенной к реальным условиям, вычислительные ресурсы могут быть существенно ограничены, а априорная информация недостаточна для несмещенной оценки функции регрессии. В этих условиях приходится считаться не только со случайной ошибкой приближения, но и с систематической ошибкой, вызванной неадекватностью принятой модели. Выбор пространства, в котором ищется оценка, приходится осуществлять совместно с планом эксперимента и методом оценивания.

Понимая под планом эксперимента ξ вероятностную меру на области планирования U с конечным носителем $\text{supp } \xi = \{h \in U, \xi(h) \neq 0\}$ и обозначая через H_1 конечномерное подпространство некоторого пространства H ($H_1 \subseteq H$), которому принадлежит функция регрессии, будем считать, что по условиям реального эксперимента могут быть использованы только планы из допустимого множества

$$J_N = \{\xi \in J_N : \text{card}(\text{sup } \xi) \leq n\}, \quad (2.1)$$

где n – число, характеризующее ограниченность ресурсов.

Выбор пространства оценивания $H_1 = H_\xi$ и оператора оценивания $S = S_\xi$ обеспечивает при фиксированном плане $\xi \in J_N$ нахождение наилучшего в метрике пространства H приближения к произвольному элементу η из H . При этом пространство оценивания H_ξ должно обеспечивать построение оценки неизвестного элемента $\eta \in H$. Выполнение всех этих условий приводит к качественному планированию вычислительного эксперимента.

Второй – выбор оптимальных условий эксперимента. Задача выбора оптимальных условий вычислительного эксперимента в геомеханике сводится к определению надежной оценки характеристик объекта и параметров среды и связана с построением нормированного дискретного плана для динамического объекта, развивающегося во времени и пространстве. Пассивная стратегия планирования такого эксперимента характеризуется тем, что объект функционирует в режиме нормальной эксплуатации. В ходе эксперимента на основе анализа ситуации выбираются моменты времени и координаты точек, в которых следует производить вычисления. Выполнив серию расчетов при некоторых фиксированных значениях исследуемого фактора в различные моменты времени и имея модель системы, можно подсчитать нормированную информационную матрицу, описывающую ситуацию для оптимальных условий проведения вычислительного эксперимента.

Третий – оптимальная структура модели. Для условий проведения расчетов в задачах геомеханики значительное усложнение используемых математических моделей приводит к экспоненциальному росту объемов вычислений и получаемых результатов, затрудняющему процедуру представления, анализа и адаптации окончательных данных вычислительного эксперимента.

На практике приходится избегать чрезмерного усложнения модели за счет включения дополнительных регрессоров. Системный анализ задачи выбора наилучшей полиномиальной регрессии позволяет сформулировать подход к определению степени алгебраического многочлена, наиболее точно аппроксимирующего заданную экспериментальную зависимость $\{y_n, x_n\}$. Суть его состоит в дополнении классического метода (выбор в качестве k_{opt} величины k , доставляющей минимальное значение сумме квадратов отклонений) описанием способа определения экспериментального массива $\{y_n\}$

$$y_n = g(G(x_n) + \xi_n), \quad (2.2)$$

где $G(x_n)$ – некоторая функция; ξ_n – случайные ошибки ($n = 1, N$).

В результате анализа полученного вектора значений определяется подмножество величин, характеризующее набор параметров критичных в дан-

ной постановке задачи.

Четвертый – особенности вычислительной технологии. Вычислительные трудности при реализации алгоритмов расчета систем с большим числом степеней свободы часто связаны с процедурой обращения матрицы $X^T X$ системы нормальных уравнений

$$(X^T X)^{-1} \beta = X^T y. \quad (2.3)$$

Поэтому, при решении многокритериальных задач численными методами используют подход псевдообращения, обеспечивающий работу вычислительных процедур в условиях вырожденности матриц.

Сравнительный анализ получаемых результатов с помощью различных подходов обращения матриц дает возможность выделить прямой метод Гревилла, позволяющий работать непосредственно с матрицей X . Эта матрица лучше обусловлена, чем матрица $X^T X$. В результате существенно повышается устойчивость к погрешностям округления.

В случае использования нелинейных по параметрам моделей возникает проблема оценок коэффициентов регрессии. При разреженности априорного множества параметров такая оценка может вообще не существовать (не достигается минимум суммы квадратов отклонений).

Планирование вычислительного эксперимента в геомеханике связано с выбором оптимальных методик вычисления, обеспечивающих допустимое качество результата расчета характеристик выработки и параметров горного массива. Для эффективной реализации процесса вычислений необходима разработка информационной технологии, обеспечивающей определение состояния динамического объекта и прогноз его поведения в различных условиях эксплуатации, в том числе и в экстремальных ситуациях. Здесь четко определяется граница между результатами вычислительного эксперимента и системой последующего анализа полученных данных. В частности, для интеллектуальных систем принятия решения дополнительный анализ получаемых данных не нужен.

Исходя из выше изложенного, можно выделить основные особенности проведения вычислительного эксперимента в задачах геомеханики с применением метода конечных элементов, требующие уточнения для обеспечения адекватности расчетных моделей:

- размер и форма области, описываемой в модели;
- характер начальных условий;
- характер и величина граничных условий;
- метод описания элементов крепи;
- определение диапазона физико-механических характеристик пород, используемых при моделировании горного массива.

Размер и форма области твердотельного моделирования горного массива, примыкающего к выработке, влияет на размерность решаемой задачи и

априори на форму целевой функции, задающей распределение перемещений по всей расчетной области. Для выработок, пройденных под малым углом к горизонту, на основе тестовых расчетов, в качестве базовой формы области расчета выбран параллелепипед, имеющий следующие параметры:

- верхняя и нижняя грани ориентированы параллельно почве выработки и отстоят от ее оси на длину в семь радиусов окружности, описанной вокруг профиля выработки;
- боковые грани, ориентированные вдоль оси выработки, отстоят от ее оси на длину в пять радиусов окружности, описанной вокруг профиля выработки;
- боковые грани, пересекающие ось выработки, располагаются друг от друга на расстоянии, определяемом из характеристик крепи выработки, моделируемой в вычислительном эксперименте.

Параллелепипед в качестве базовой формы области расчета позволяет наиболее просто приложить начальные и граничные условия, хорошо согласующиеся с реальными условиями нагружения физического объекта (горного массива). Формы шара или круга, определенной толщины, вообще не применимы в задачах геомеханики в связи с большими сложностями наложения граничных условий.

Выбор размеров параллелепипеда обусловлен оптимизацией размерности основных матриц метода конечных элементов, что особенно важно при решении задач геомеханики в упруго-пластической постановке. Увеличение линейных размеров позволило бы свести к нулю воздействие на получаемый результат расчета граничных условий, однако при этом катастрофически сокращается величина доступных вычислительных ресурсов, что в конечном случае, как правило, приводит к отказу вычислительного алгоритма.

Другим важным фактором, подлежащим дополнительному анализу, является определение параметров начальных условий. Начальные условия могут значительно влиять на результаты вычислительного эксперимента при решении задач в упруго-пластической постановке и с учетом реологических свойств пород рассматриваемого горного массива. Одним из наиболее значимых начальных условий является задание формы функции приложения нагрузок во времени. Данная функция может быть определена только на основе натурных наблюдений или лабораторных исследований для конкретных горно-геологических условий. Тестовые расчеты, выполненные для различных форм данной функции, показали ее ощутимое влияние на формирование в горном массиве зон разупрочнения. Это влияние выражается как в изменении формы зоны разупрочнения, так и в вариациях значений максимальных напряжений, возникающих в горном массиве.

Следующим фактором, ощутимо влияющим на картину распределения напряжений при упруго-пластической постановке задачи, является выбор теории пластичности, используемой для описания предельного и предельного поведения материала. Анализ тестовых расчетов показал, что при выборе критериев Мизеса и Треска, при сложном напряженно-дефор-

мированном состоянии области расчета, порог перехода материала породы в запредельное состояние на 10-12% выше, чем при выборе критерия Друкера-Прагера, но при этом рост перемещений контура выработки во втором случае имеет более пологий вид и на отдельных участках контура величины смещений имеют большее абсолютное значение. Однако, вычислительная устойчивость расчетной модели, использующей критерий Мизеса, намного выше аналогичной характеристики для критериев Треска и Друкера-Прагера. Поэтому данный показатель должен проходить этап оптимизации при каждом, даже незначительном, изменении расчетной модели, поскольку возможные погрешности вычислений могут приводить к срыву итерационного процесса, вызываемого невозможностью определения целевой функции на всем пространстве значений.

При выборе граничных условий их разделяют на две основные группы – пассивные и активные. В задачах геомеханики в качестве пассивных используют симметрию, мягкое основание, шарниры и жесткое основание. В качестве активных граничных условий используют давление (распределенную нагрузку), силу тяжести (если модель обладает собственным весом) и очень редко сосредоточенное усилие. Пассивные граничные условия обладают свойством постоянства и не изменяются в ходе выполнения расчетов. Активные, напротив, могут изменять как величину, так и характер. В частности, при решении задачи в упруго-пластической постановке нагружение расчетной области происходит по линейному закону от нуля до приведенной единицы.

В случае, когда рассматривается выработка, пройденная с малым углом к горизонту, наиболее оптимальной комбинацией граничных условий можно считать следующую: на вертикальные грани параллелепипеда накладывается симметрия; основание жестко фиксируется, что позволяет добиться высокой устойчивости вычислительного процесса; к верхней грани прикладывается равномерно распределенная нагрузка при расчете вне зоны влияния очистных работ или нагрузка, распределение которой задается сложным образом, если необходимо учитывать влияние очистных работ.

Использование граничного условия «мягкое основание» можно считать неэффективным, особенно при проведении расчетов в упруго-пластической постановке, поскольку сложность проводимых расчетов и время их проведения возрастает многократно, что в свою очередь снижает надежность получаемых результатов. С другой стороны, эффект демпфера может быть достигнут простой комбинацией жесткого основания и примыкающих к нему двух-трех слоев конечных элементов с высоким уровнем пластичности, что несколько увеличит размерность задачи, но не усложнит сам вычислительный процесс.

Широкое применение в расчетной схеме граничного условия «симметрия» обусловлено как самим типом решаемой задачи геомеханики, так и высоким уровнем универсальности этого граничного условия. Очень важной особенностью данного граничного условия является слабое влияние его на

формы целевой функции и высокая скорость нивелирования возмущений, привносимых им в расчетную схему.

Именно влиянием граничных условий на форму целевой функции обусловлено увеличение расстояния между вертикальными гранями расчетной области, проходящими перпендикулярно оси выработки. Для получения наиболее адекватного результата в среднем сечении расчетной области необходимо смоделировать выработку, содержащую в длину от трех до пяти рам крепи. При этом грани расчетной схемы необходимо располагать таким образом, чтобы отсекали на двое основные силовые элементы крепи (например, для рамной крепи грань должна проходить через ось симметрии рамы, а для анкерной через ось симметрии анкера).

В ходе проведения тестовых расчетов, было показано, что для пространственной модели с относительно малой расчетной сетью, критически важно обеспечить высокую детализацию элементов крепи выработки. Данный вывод сделан на основе анализа ряда расчетных моделей, где крепь выработки моделировалась с различной степенью адекватности – от моделирования в виде распределенного давления на контуре выработки до точного воспроизведения всех конструктивных элементов. Оптимальным следует считать подход точного моделирования элементов крепи, имеющих максимальный геометрический размер больший, чем 15 минимальных размеров конечных элементов, используемых в расчете.

Важным моментом при моделировании крепи является определение условий контакта крепи и поверхности породного массива. Поскольку в большинстве расчетных схем материал крепи обладает более высокими прочностными характеристиками, нежели породы горного массива, на площадках контакта крепи и породы возникает высокий градиент перемещений. Для повышения адекватности расчетной схемы в этом случае приходится использовать методику вычисления изменения поверхности контакта. Это не только повышает размерность задачи, так как число узлов на поверхности контакта удваивается, но и приводит к значительным вычислительным затратам. Поэтому, с одной стороны, необходимо крайне осторожно использовать этот подход, а с другой – применять его повсеместно в задачах геомеханики, при решении которых ожидаются большие перемещения узлов по контуру выработки.

Определение диапазона физико-механических характеристик материала пород, используемых при моделировании горного массива, зависит от типа решаемой задачи и наличия соответствующих показателей, полученных в ходе натурных и лабораторных исследований. Анализ расчетов, проведенных для различных вариантов учета прочностных характеристик пород, показал следующее: ортотропность значительно влияет на распределение горизонтальных напряжений, ее учет приводит к росту перемещений по контуру выработки; учет полной диаграммы «напряжение-деформация» позволяет наиболее полно отобразить процесс деформирования приконтурных горных пород; учет температурных характеристик не оказывает зримого эффекта; учет

реологических свойств пород позволяет получить полные перемещения на контуре выработки в любой момент времени ее эксплуатации.

Таким образом, получение надежных, качественно и количественно адекватных результатов вычислительного эксперимента для задач геомеханики возможно только при комплексном учете широкого спектра характеристик математической модели, ряд которых должен проходить оптимизацию для каждой серии выполняемых расчетов и обеспечивать при этом сходимость вычислений с низкими значениями привносимых погрешностей.

2.5. АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Изложенные методологические принципы проведения компьютерного моделирования геомеханических процессов в окрестности пластовой подготовительной выработки позволяют, на наш взгляд, разработать наиболее объективную методику прогнозной оценки ее состояния, достаточно полно учитывающую основные влияющие факторы. Конкретизация предлагаемого подхода приведена на примере оценки состояния пластовой подготовительной выработки вне зоны влияния очистных работ для условий слоистого углевещающего массива слабых пород, например, Западного Донбасса. Для наглядности алгоритм исследований отражен в виде последовательности выполнения этапов с сопровождением некоторыми иллюстрациями.

1. *Глубина расположения выработки.*
2. *Ориентировка выработки относительно угольного пласта.*
3. *Структура углевещающей толщи.*
4. *Механические характеристики вмещающего выработку массива в допредельном состоянии.*
5. *Типовое сечение выработки.*
6. *Конструктивно-технологические характеристики крепи.*

Изложенные шесть этапов касаются обоснования исходных данных для компьютерного моделирования поведения системы «слоистый массив-крепь выработки»; последующие этапы направлены на ее совершенствование и оценку адекватности и достоверности в соответствии с предложенной методологией моделирования геомеханических процессов.

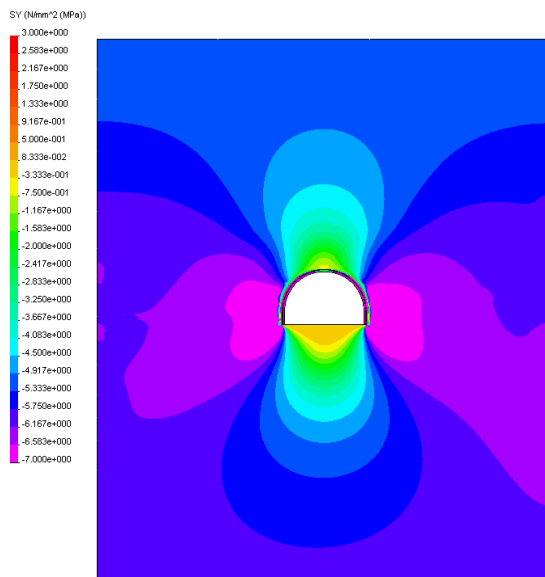
7. *Оценка размеров (по координатам Y , X и Z) пространственной геомеханической модели.* Задача этапа – установление минимально достаточных размеров системы «слоистый массив-крепь выработки», при которых граничные условия по поверхностям модели не оказывают существенного влияния на возмущения поля напряжений и перемещений в окрестности выработки. Для этого достаточно, чтобы компоненты НДС на граничных поверхностях модели приближались к исходному негидростатическому состоянию нетронутого массива с погрешностью до 10%. При этом расчет НДС выполняется в упругой постановке, которая, с одной стороны, наиболее чув-

ствительна к возмущениям полей напряжений и перемещений, вызванных неоднородностью геометрических и механических параметров системы; с другой стороны, относительная погрешность НДС на границах модели не связана с глубиной разработки.

В качестве иллюстрации обоснования данного пункта на рис. 2.1 приведены эпюры вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x напряжений при одном из сочетаний геометрических и механических параметров системы при ее размерах: по координате $Y-36$ м, $X-30$ м и $Z-3,2$ м (7 рам вдоль выработки с шагом установки 0,5 м). Как видно из рис. 2.1, а, вдоль (по координате X) верхней и нижней граничных поверхностях модели устанавливается практически равномерное (максимальное отклонение не превышает 6%) распределение компоненты σ_y , соответствующее величине γH (γ – средневзвешенный объемный вес породы, H – глубина расположения верхней и нижней поверхностей модели) нетронутого массива, что указывает на достаточность принятых вертикальных размеров модели по фактору поля σ_y . Горизонтальные напряжения σ_x относительно стабилизируются только на верхней (отклонение до 16%) и нижней (отклонение до 14%) граничных поверхностях модели (см. рис. 2.1, б) и близки к величине $\lambda\gamma H$ ($\lambda = \mu/1-\mu$, μ – коэффициент Пуассона) нетронутого массива. На боковых граничных поверхностях модели имеются весьма значительные колебания σ_x , что объясняется возникновением дополнительных изгибающих напряжений σ_x от прогиба породных слоев в полость выработки и не противоречит классическим положениям механики твердого деформируемого тела. Это явление обусловлено учетом слоистости массива, когда кривизна нейтральной оси изгиба ближних к выработке породных слоев меняет знак из-за их небольшой мощности и колебания σ_x возрастают до 100...120% от $\lambda\gamma H$. Таким образом, по фактору поля σ_x размеры модели недостаточны и требуют увеличения. Проанализировав поле всех компонент напряжений и перемещений (при данном сочетании параметров системы «слоистый массив-крепь выработки») установлены минимально достаточные размеры модели: по координате $Y-40$ м, по координате $X-50$ м; по координате Z стабильность НДС достигается при моделировании уже 5 рам вдоль выработки ($Z = 2,2$ м).

Аналогичное исследование выполнено при нескольких крайних сочетаниях параметров системы «слоистый массив-крепь выработки», для которой наиболее существенно влияющими являются структура и свойства углевмещающего массива. В рассматриваемой геомеханической задаче было целесообразно выделить два крайних случая: максимально разнородные по модулю деформации соседние слои углевмещающей толщи, сложенной тонкими и мощными породными слоями. Проведенный вычислительный эксперимент не изменил вышеуказанные минимально достаточные размеры модели.

а)



б)

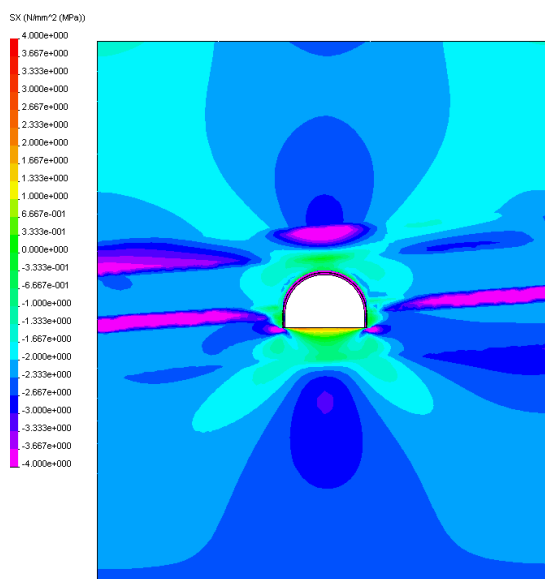


Рис. 2.1. Распределение а) вертикальных σ_y и б) горизонтальных σ_x напряжений в окрестности штрека без нарушения контакта между породными слоями

8. Оценка соответствия результатов расчета НДС (в упругой постановке) классическим положениям механики подземных сооружений. Анализ результатов расчета НДС моделей этапа №7 произведен по каждой компоненте напряжений, в ходе которого устанавливалось наличие или отсутствие противоречий положениям механики подземных сооружений в целом или к известным исследованиям (в данной области) в частности. Например, на рис. 2.1, а, четко прослеживаются общеизвестные факты образования в кровле и почве выработки зон разгрузки с появлением растягивающих вертикальных напряжений σ_y . Эти зоны провоцируют развитие свода обрушения пород в кровле и пучения почвы, которому способствует концентрация сжимающих σ_y в боках выработки, формирующая подобие зоны опорного давления. Соответствие классическим положениям поля горизонтальных напряжений σ_x в приконтурных породах кровли и почвы, интенсифицирующих процесс их разупрочнения. Касательные напряжения τ_{xy} имеют практически симметричное (относительно оси, проходящей под углом 45° через центр координат) распределение с изменением знака (относительно вертикальной и горизонтальной осей выработки), что обусловлено малым углом падения угольного пласта и, соответственно, несущественной разницей между векторами главных напряжений σ_1 , σ_3 и векторами σ_y , σ_x . Эти данные указывают на соответствие результатов расчета классическим положениям механики твердого деформируемого тела. Тестированием эпюр распределения компонент напряжения в рамной крепи установлено следующее: горизонтальные напряжения σ_x в районе замка свода имеют близкие к максимуму значения и меняют знак от растяжения во внутренних волокнах до сжатия во внешних, что указывает на наличие максимума изгибающего момента, деформирующего свод рамы внутрь выработки; максимум вертикальных напряжений σ_y располагается ближе к опоре стойки рамы и также меняет свой знак по толщине сечения спецпрофиля, способствуя изгибу стойки, что опять-таки согласуется с многочисленными исследованиями работы рамной крепи; максимумы интенсивности приведенных напряжений σ располагаются в районе замка свода и боках рамы на участке между пятой свода и опорой стойки, что согласуется с фактами появления пластических деформаций и разрушения крепи (на отмеченных участках), установленными в ходе шахтных наблюдений.

Таким образом, анализ результатов расчета НДС моделей этапа №7 выявил противоречий основным положениям механики подземных сооружений и соответствующим исследованиям взаимодействия породного массива с крепью выработки. Более того, установлено, что касательные напряжения по поверхностям напластований породных слоев и угля, как правило, существенно превышают (иногда на порядок) силы сцепления (или сопротивления чистому сдвигу) между слоями. Поэтому в окрестности выработки происходит

нарушение контакта между соседними слоями породы, что необходимо отражать в геомеханической модели для повышения ее достоверности.

9. *Учет нарушенных контактов между слоями углевмещающей толщи в окрестности выработки.* Задача этапа – смоделировать в упругой постановке нарушенные контакты между соседними слоями (факт установлен при исследованиях этапа №8), что обуславливает возможность их проскальзывания относительно друг друга при прогибе в направлении полости пластовой выработки. Для наглядности на рис. 2.2 приведена эпюра σ_x при нарушенных контактах между слоями, которая существенно отличается от соответствующей эпюры (см. рис. 2.1, б) с ненарушенными контактами в сторону увеличения прогиба слоев и соответствующих концентраций напряжений σ_x . Аналогичные тенденции наблюдаются и с другими компонентами поля напряжений в окрестности выработки, что доказывает необходимость учета нарушений по плоскостям напластования углевмещающей породной толщи и обуславливает повышение адекватности модели системы «слоистый массив-крепь выработки» и достоверности результатов расчета ее НДС.

10. *Оценка размеров модели при учете нарушенных контактов между породными слоями.* По аналогии с исследованиями этапа №7 определены минимально достаточные размеры модели. Необходимость этого этапа вызвана увеличением интенсивности прогиба породных слоев при нарушениях межслоевых контактов, что доказывается увеличением минимально необходимой ширины модели (по координате X до 60 м). По вертикальной координате Y и осевой координате Z длины пластовой выработки размеры модели остаются прежними.

11. *Обоснование структуры модели близлежащей углевмещающей толщи пород.* Задача этапа – оценить два взаимосвязанных фактора: во-первых, выяснить, насколько влияет (на НДС системы «слоистый массив-крепь выработки») мощность породных слоев и угольного пласта и, во-вторых, возможно-ли строение близлежащей углевмещающей толщи достаточно достоверно описать одной моделью. Такое стремление обусловлено особенностями метода конечных элементов, предусматривающим построение новой модели каждый раз при изменении каких-либо ее геометрических параметров; с другой стороны, необходимо ограничиться по-возможности меньшим количеством вариантов структуры массива в окрестности выработки при максимальном их охвате реального строения углевмещающей толщи пород, например, Западного Донбасса.

12. *Оценка влияния деформационных характеристик близлежащих породных слоев на НДС системы «слоистый массив-крепь выработки».* Задача этапа включает три составляющие: во-первых, выявить закономерности влияния деформационных характеристик породных слоев на НДС системы в целом и, в частности, на размеры зон опорного давления и разгрузки (в окрестности выработки) как факторы, определяющие интенсивность проявлений горного давления; во-вторых, оценить соответствие результатов моделирования положениям механики подземных сооружений и существующим

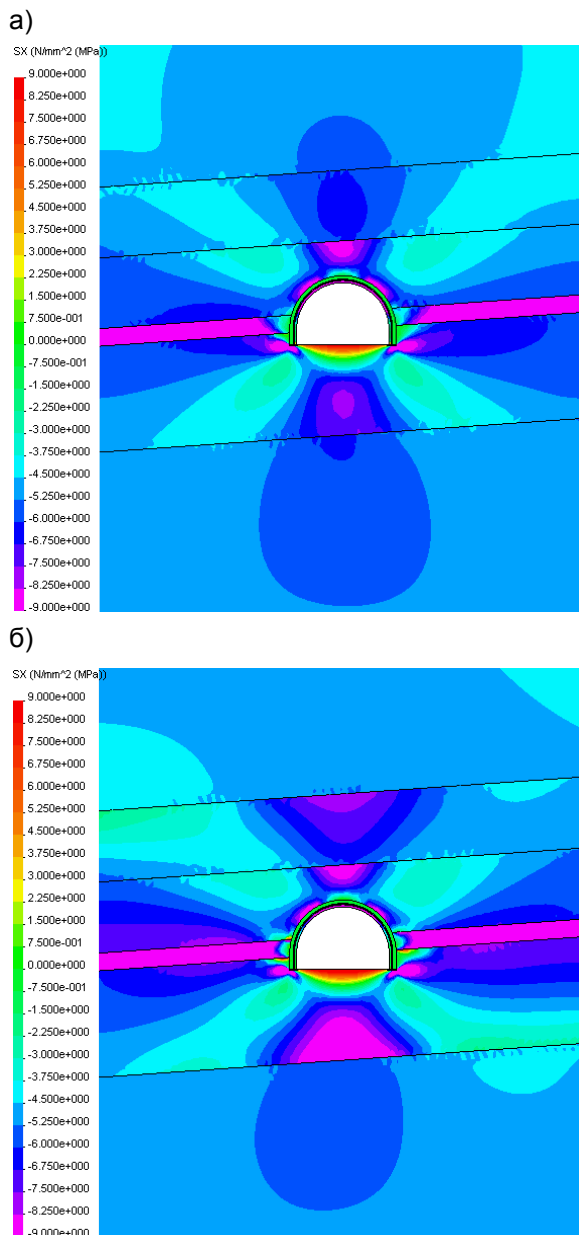


Рис. 2.2. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x при нарушенных контактах между слоями

представлениям о геомеханических процессах вокруг выработки; в-третьих, установить количественные закономерности роста зон опорного давления и разгрузки с увеличением глубины расположения выработки. Для реализации данной задачи было просчитано 27 вариантов соотношений модулей деформации $E_i^{K,II}$ близлежащих породных слоев.

Подводя промежуточный итог, отметим, что этапы №7...№12 обосновали особенности состояния системы «слоистый массив-крепь выработки» и дали позитивную оценку адекватности результатов моделирования (в упругой постановке) основным положениям механики подземных сооружений и современным представлениям о геомеханических процессах в слоистом массиве в окрестности пластовой выработки. Последующие этапы направлены на совершенствование модели в части учета полной диаграммы деформирования материалов всех элементов системы, и на оценку адекватности и достоверности по результатам существующих аналитических, лабораторных и шахтных исследований в этой области.

13. *Обоснование механических характеристик полных диаграмм деформирования материалов элементов системы «слоистый массив-крепь выработки».* В соответствии с общепринятой в геомеханике идеализацией полная диаграмма деформирования породы и угля моделируется тремя линейными участками со следующими характеристиками: предел прочности на

одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, относительная остаточная прочность $\frac{\sigma_{сж}^o}{\sigma_{сж}}$ на ста-

дии разрыхления, модуль деформации E на упругопластической стадии и

относительный модуль спада $\frac{M}{E}$ на стадии разупрочнения. Современные

исследования предельного состояния пород, например, Западного Донбасса позволили обосновать наиболее объективные интервалы изменения

вышеперечисленных характеристик: $0,05 \leq \frac{\sigma_{сж}^o}{\sigma_{сж}} \leq 0,20$; $0,5 \leq \frac{M}{E} \leq 3$. Характе-

ристики допредельного состояния указаны ранее (этап №4); здесь следует отметить необходимость учета ослабляющих породу факторов, что наиболее обоснованно выполнять по рекомендациям отраслевых нормативных документов. Рамная крепь (как установлено на предыдущих этапах) испытывает весьма значительные напряжения и деформации, поэтому смоделирована реальная диаграмма нагружения стали Ст.5, учитывающая площадку текучести при наступлении предельного состояния $\sigma = \sigma_T = 270$ МПа, а также

стадию упрочнения металла до величины $\sigma = \sigma^6 = 500...620$ МПа (σ_T и σ^6 – предел текучести и временное сопротивление разрыву). Полная диаграмма деформирования затяжки ввиду ее свободного прогиба (под нагрузкой) и возможного последующего разрушения моделируется с модулем спада, стремящимся к бесконечности, и остаточной прочностью, равной нулю. Пол-

ная диаграмма деформирования разрушенной породы в закрепном пространстве (забутовки) построена по результатам шахтных экспериментов в условиях ОАО «Павлоградуголь».

14. *Расчет НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» по полной диаграмме деформирования материалов ее элементов.*

15. *Оценка адекватности и достоверности результатов расчетов НДС системы по полной диаграмме деформирования материалов.* Адекватность результатов оценивается по двум направлениям: анализ особенностей полей напряжений и перемещений и анализ закономерностей влияния того или иного геомеханического параметра системы.

Достоверность результатов оценивается путем построения семейства зависимостей развития перемещений контура выработки с ростом глубины H разработки при вариации того или иного геомеханического параметра системы «слоистый массив-крепь выработки». Эти зависимости сравниваются с результатами шахтных наблюдений и рекомендациями отраслевых руководящих документов, для чего под конкретные горно-геологические условия шахтного эксперимента проводятся дополнительные расчеты.

16. *Исследование влияния типоразмера поперечного сечения выработки на перемещения ее контура.* Предыдущий этап доказал адекватность и достоверность предлагаемой методики моделирования состояния системы «слоистый массив-крепь выработки». Поэтому вполне обоснованно исследования, выполненные для одного типового сечения выработки, провести для других типовых сечений, которые наиболее часто используются на конкретной шахте или по региону. Здесь повторяются исследования этапа №14 для каждого из выбранных типовых сечений, и создается база данных по закономерностям развития перемещений контура выработки с ростом глубины разработки.

17. *Анализ закономерностей влияния размеров сечения и оценка их достоверности.* По результатам расчетов этапа №16 устанавливаются закономерности изменения перемещений на всех участках контура выработки при переменной площади $S_{св}$ поперечного сечения выработки в свету до осадки (как наиболее объективный параметр, характеризующий типовое сечение). Эти закономерности оцениваются на предмет соответствия рекомендациям нормативных методик.

18. *Создание методики прогноза состояния пластовой выработки.* В ходе выполнения предыдущих этапов исследований получается достаточно обширный массив данных по влиянию основных геомеханических параметров на состояние системы «слоистый массив-крепь выработки» в целом и перемещения контура выработки в частности. Используя методы корреляционно-дисперсионного анализа указанных данных, строятся уравнения многофакторной регрессии для расчета перемещений по всему периметру выработки, которые совместно с комплексом критериев позволяют дать достаточно объективную прогнозную оценку эксплуатационного состояния пластовой выработки, сооружаемой в слоистом массиве слабых пород.

19. *Перспективы развития предлагаемой методики.* С появлением более совершенного программного обеспечения и компьютерной техники возникает возможность моделирования более сложных геомеханических систем, учитывающих возрастающее количество факторов. В этом плане появляются перспективы одновременного моделирования не только реальных конструктивных особенностей крепи и структуры неоднородного слоистого массива, но и его нарушенность естественной и искусственной трещиноватостью, реологию поведения массива в допредельном и запредельном состояниях и т.п. Параллельная перспектива развития методики видится в ее расширении на условия влияния очистных работ, моделирование способов охраны выработки и увязки ее состояния с пространственно-временными параметрами очистных работ.

3. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ»

3.1. ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ В ОКРЕСТНОСТИ БАЗОВОГО УЧАСТКА ПЛАСТОВОЙ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

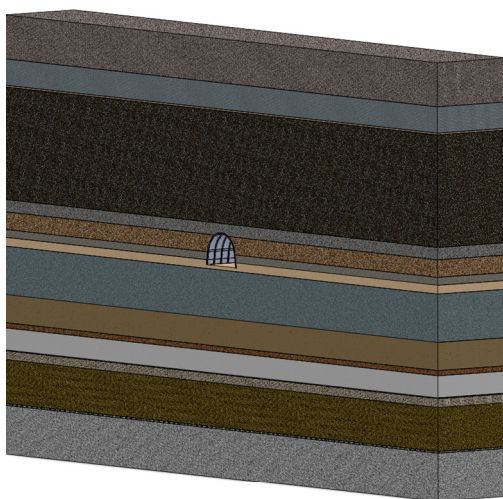


Рис. 3.1. Модель структуры угле вмещающей
толщи пласта C_6 на базовом участке
конвейерного квершлага

Каждая из перечисленных ранее задач была направлена на разработку модели пластовой выработки блока №3 шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь», которая призвана максимально адекватно реальным горно-геологическим условиям исследовать процесс сдвижения слоистого массива слабых пород в окрестности выработки для отработки технологии геомеханического моделирования. Здесь первоочередной задачей является построение реальной структуры угле вмещающей толщи на базовом участке пластовой выработки, в качестве которого был выбран район пикета ПК26 конвейерного квершлага. На данном участке оборудована реперная станция

для проведения наблюдений за проявлениями горного давления.

Модель угле вмещающей толщи построена по данным имеющихся геологических изысканий. При этом использована оценка структуры по близлежащим скважинам НЗ-5230 и №13981 и данным паспорта проведения и крепления конвейерного квершлага.

Модель структуры близлежащего породного массива вокруг пласта C_6 (на базовом участке) приведена на рис. 3.1 и включает 17 породных слоев и угольных пластов, которые пронумерованы в порядке увеличения глубины расположения: 1 – алевролит мощностью 5,0 м; 2 – аргиллит мощностью 3,0 м; 3 – известняк мощностью 0,2 м; 4 – аргиллит мощностью 12,8 м; 5 – алевролит мощностью 1,4 м; 6 – аргиллит мощностью 2,0 м; 7 – угольный пласт C_6 мощностью 0,9 м; 8 – аргиллит мощностью 1,0 м; 9 – песчаник мощностью 5,5 м; 10 – ар-

гиллит мощностью 3,2 м; 11 – песчаник мощностью 0,6 м; 12 – аргиллит мощностью 2,5 м; 13 – угольный пласт C_5^2 мощностью 0,1 м; 14 – песчаник мощностью 1,0 м; 15 – алевролит мощностью 5,0 м; 16 – угольный пласт C_5^1 мощностью 0,2 м; 17 – аргиллит мощностью 5,55 м.

В целом высота модели (по координате Y) углевмещающей толщи составила 49,95 м; ширина модели (по координате X) в тестовом расчете принята 30 м.

Конвейерный квершлаг на базовом участке проводился с подрывкой почвы пласта C_6 на среднюю глубину 0,4 м, что отражено в модели.

В соответствии с планом горных работ глубина расположения базового участка выработки составляет $H = 360$ м (по почве пласта C_6).

Условия на границах модели. Верхняя горизонтальная плоскость модели имеет отметку 334,7 м, что при средневзвешенном объемном весе пород $\gamma = 24$ кН/м³ формирует вертикальную нагрузку на верхней границе модели $\sigma_y = \gamma H = 8,03$ МПа. Принята в расчетах $\sigma_y = 8$ МПа. Нижняя граница модели имеет жесткую опору и служит плоскостью начала отсчета вертикальной координаты Y . По боковым плоскостям модели введено условие плоской деформации, что отвечает реальному механизму деформирования массива и широко используется в механике подземных сооружений [25-28]. Согласно этому условию в нетронутом массиве действуют горизонтальные сжимающие напряжения

$$\sigma_x = \lambda \gamma H = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H, \quad (3.1)$$

где μ – коэффициент Пуассона рассматриваемого породного слоя или пласта угля.

Помещая в базу данных сведения о механических характеристиках углевмещающей толщи (в том числе и величины μ), мы автоматически моделируем воздействие горизонтальных напряжений σ_x на боковых границах модели. Точка отсчета по координате X совпадает с вертикальной осью выработки.

Третье измерение модели (толщина по координате Z) совпадает с продольной осью выработки и составляет 5 м (в тестовом расчете) для построения шести комплектов рамных крепей с шагом установки 1 м. Крайние рамы разрезаны по вертикальной оси спецпрофиля СВП для симметрии модели по координате Z . Условия плоской деформации вводятся также по плоскостям, ограничивающим толщину модели, где действуют сжимающие напряжения (нетронутого массива)

$$\sigma_z = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H. \quad (3.2)$$

Начало отсчета по координате Z помещено в середину модели (по ее толщине), то есть на расстоянии 2,5 м от боковой граничной плоскости.

Кроме компонент поля напряжений в модели анализируется также величина приведенных напряжений σ (или интенсивность напряжений как интегральный параметр НДС, используемый в прочностных расчетах). По общепринятому для горных пород закону Кулона-Мора [25-28]

$$\sigma = \sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3, \quad (3.3)$$

где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения по элементарному объему; φ – угол внутреннего трения породы.

Для рамной крепи и арматуры анкеров угол внутреннего трения полагается равным нулю [29] в соответствии с классической теорией прочности металлов.

3.2. ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОДНЫХ СЛОЕВ И УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПО ПОЛНОЙ ДИАГРАММЕ ИХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Требование достижения максимально возможной степени адекватности моделирования геомеханических процессов в окрестности пластовой выработки предполагает не только построение реальной структуры углевмещающей толщи, но и описание наиболее достоверных (в пределах интервалов вариации характеристик) механических свойств каждого из элементов системы «слоистый массив-крепь выработки».

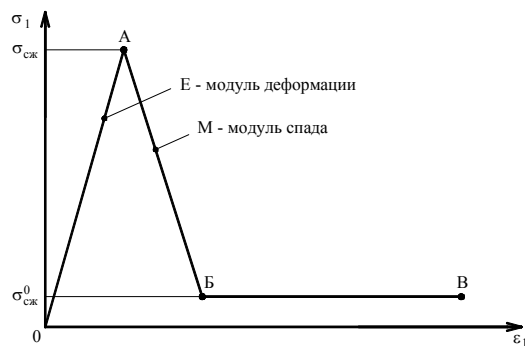


Рис. 3.2. Моделирование полной диаграммы деформирования породы

В этом плане наибольшие трудности моделирования связаны с отражением реального поведения горной породы на всех стадиях ее деформирования: упруго-пластическое, разупрочнение и разрыхление (на стадии так называемого «руинного» разрушения). Учет всех стадий деформирования особенно необходим для слабых горных пород, слагающих углевмещающую толщу, например, Западного Донбасса.

В связи с вышеизложенным в разработанной модели углевмещающей толщи пласта C_6 применяется так называемая полная диаграмма деформирования (от начала нагружения до полного разрушения материала), оп-

ределяющая экспериментально на «жестких» прессах связь относительной деформации ε_1 и максимального главного напряжения σ_1 . Полная диаграмма деформирования горной породы (рис. 3.2) в соответствии с общепринятыми в геомеханических исследованиях допущениями [26, 27, 30] представлена в виде трех линейных участков: ОА – упруго-пластическая стадия деформирования, точка А – предельное состояние, АВ – стадия разупрочнения, БВ – разрыхление на стадии «руинного» разрушения. Такая диаграмма деформирования породы характеризуется четырьмя параметрами: $\sigma_{сж}$ – предел прочности на одноосное сжатие нарушенной породы, $\sigma_{сж}^o$ – остаточная прочность по завершении процесса ее разупрочнения, E – модуль деформации породы (являющийся линейной аппроксимацией упруго-пластического участка деформирования), M – модуль спада (являющийся линейной аппроксимацией участка разупрочнения породы).

Такая апробированная в геомеханических исследованиях диаграмма деформирования породы требует расширенной информации о механических характеристиках углевмещающей толщи, которой не обладает геологическая служба ни одной из шахт Украины. Поэтому предложен следующий подход к формированию базы исходных данных. Прежде всего, используется информация о свойствах пород по отобранным близлежащим скважинам (в пределах высоты модели): описание структуры каждого породного слоя и угольного пласта, их предел прочности на одноосное сжатие, определяемые в ходе геологических изысканий на исследуемом участке шахтного поля. По некоторым скважинам иногда можно встретить более расширенную информацию, например: предел прочности на растяжение, модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения. Эти данные используются косвенным образом для оценки упруго-пластических свойств породы и степени хрупкости ее разрушения, которые позволяют продолжить интервалы изменения параметров (E , M и $\sigma_{сж}^o$) полной диаграммы деформирования. Далее анализируются результаты исследований механических свойств, представленных в модели пород по литературным источникам. В этом плане наиболее широкомасштабные исследования полной диаграммы деформирования пород углевмещающей толщи Западного Донбасса выполнены в ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины [30-32], по данным которых для каждого типа породы подбираются недостающие механические характеристики. В результате такого комплексного подхода составлена база данных механических свойств пород углевмещающей толщи на экспериментальном участке выработки, которая приведена в табл. 3.1 и использована в расчетах НДС системы «слоистый массив-крепь выработки». Попутно заметим, что в геомеханических расчетах обычно используется относительная остаточная

прочность $\frac{\sigma_{сж}^o}{\sigma_{сж}}$ и относительный модуль спада $\frac{M}{E}$, которые и указаны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Тип породы	$\sigma_{сж}$, МПа	$E \cdot 10^4$, МПа	$\frac{\sigma_{сж}^o}{\sigma_{сж}}$	$\frac{M}{E}$
1	Алевролит	9,0	0,40	0,12	2,0
2	Аргиллит	8,5	0,20	0,20	0,5
3	Известняк	44,5	1,00	0,12	1,0
4	Аргиллит	13,0	0,30	0,20	0,5
5	Алевролит	20,6	0,60	0,12	2,0
6	Аргиллит	13,0	0,30	0,20	0,5
7	Угольный пласт C_6	31,5	0,33	0,10	4,0
8	Аргиллит	11,0	0,80	0,15	1,0
9	Песчаник	45,5	2,00	0,08	4,0
10	Аргиллит	11,0	0,80	0,15	1,0
11	Песчаник	45,5	2,00	0,08	4,0
12	Аргиллит	11,0	0,80	0,15	1,0
13	Угольный пласт C_5^2	30,0	0,33	0,10	4,0
14	Песчаник	45,5	2,00	0,08	4,0
15	Алевролит	14,3	1,50	0,10	2,0
16	Угольный пласт C_5^1	30,0	0,33	0,10	4,0
17	Аргиллит	15,5	0,60	0,15	1,0

3.3. ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ»

Минимально достаточные размеры модели (по координатам Y , X и Z) определяются по условию стабилизации поля напряжений по ее границам в соответствии с начальным негидростатическим состоянием нетронутого массива. Такой критерий обеспечивает (с общепринятой допускаемой погрешностью до 10%) минимальное влияние граничных условий по поверхностям модели на НДС системы «слоистый массив-крепь выработки». Для выполнения указанного мероприятия построена тестовая модель, анализ НДС которой дал следующие результаты.

Вертикальные напряжения σ_y на верхней границе модели распределены практически равномерно с отклонением не более 3,9% по отношению к величине нетронутого массива $\gamma H = 8$ МПа. На нижней границе модели колебания σ_y не превышают 4,3% по отношению к $\gamma H = 9,2$ МПа (глубина нижней границы $H = 384,65$ м). На боковых границах модели σ_y монотонно возрастает от 8 МПа до 9,2 МПа с отклонениями не более 6,2% от соответствующей величины γH нетронутого массива. Таким образом, возмущения компоненты σ_y вблизи пластовой выработки снижаются при движении к границам модели (по координатам Y и X) и практически стабилизируются, приближаясь к γH нетронутого массива с допустимой для горнотехнических расчетов погрешно-

стью. Следовательно, по фактору распределения поля вертикальных напряжений σ_y размеры модели (см. §3.2) вполне достаточны.

Горизонтальные напряжения σ_x наилучшим образом (отклонения до 2,5%) стабилизируются на нижней границе модели и составляют 3,9 МПа при коэффициенте Пуассона нижнего породного слоя (аргиллит) $\mu = 0,30$. На верхней и боковых границах тестовой модели наблюдаются более существенные колебания σ_x в сравнении с формулой (3.1), что объясняется возникновением дополнительных напряжений σ_x от прогиба породных слоев в направлении выработки и не противоречит классическим положениям механики подземных сооружений. Эти возмущения превышают допустимые отклонения в 10% только для тонких прослойков породы (известняк в кровле мощностью 0,2 м и угля (в почве пласт C_5^2 мощностью 0,1 м и пласт C_5^1 мощностью 0,2 м), которые имеют достаточно низкий момент сопротивления сечения изгибу. Однако, эти возмущения σ_x никоим образом не сказываются на поле напряжений σ_x в окрестности пластовой выработки, так как связаны с краевыми эффектами закрепления модели и имеют весьма удаленные от выработки локальные области, максимальные размеры которых составляют 0,7 м на левой границе и 3,5 м на правой границе при размерах самой модели $49,95 \times 30$ м. Таким образом, по фактору распределения поля горизонтальных напряжений σ_x размеры модели выбраны обоснованно.

Касательные напряжения τ_{xy} имеют возмущения в окрестности выработки на глубину до 8 м, а на границах модели практически исчезают, что обусловлено малым углом падения пласта C_6 ($\alpha = 3...4^\circ$) и по этой причине незначительной разницей между векторами главных напряжений σ_1 , σ_2 и векторами напряжений σ_y , σ_x . Следовательно, по фактору распределения поля касательных напряжений τ_{xy} требование наличия на границах модели начального состояния нетронутого массива выполняется полностью.

Приведенные напряжения σ являются определенной комбинацией компонент σ_y , σ_x и τ_{xy} по формуле (2.3), поэтому имеют аналогичные вполне удовлетворительные отклонения от исходного негидростатического состояния на границах модели.

Выше рассмотрено НДС по плоскостям, ограничивающим модель по высоте и ширине. Необходимо также оценить достаточность толщины (6 комплектов рам, $Z = 5$ м) модели, где главным условием является стабильность поля напряжений в центральной части толщины (рамы №3 и №4). Здесь наиболее ярким показателем являются НДС рамной крепи, где наблюдается наибольший градиент изменения напряжений в модели. Для наглядности на рис. 3.3 представлена эпюра приведенных (интенсивность) напряжений σ , по резуль-

татам анализа которой можно сделаны такие выводы:

- поле σ в центральных рамах (№3 и №4) практически не отличаются друг от друга;
- поле σ в рамах №2 и №5 имеет отклонения от центральных рам (№3 и №4), не превышающие 6,8% в районах сосредоточения максимумов σ .

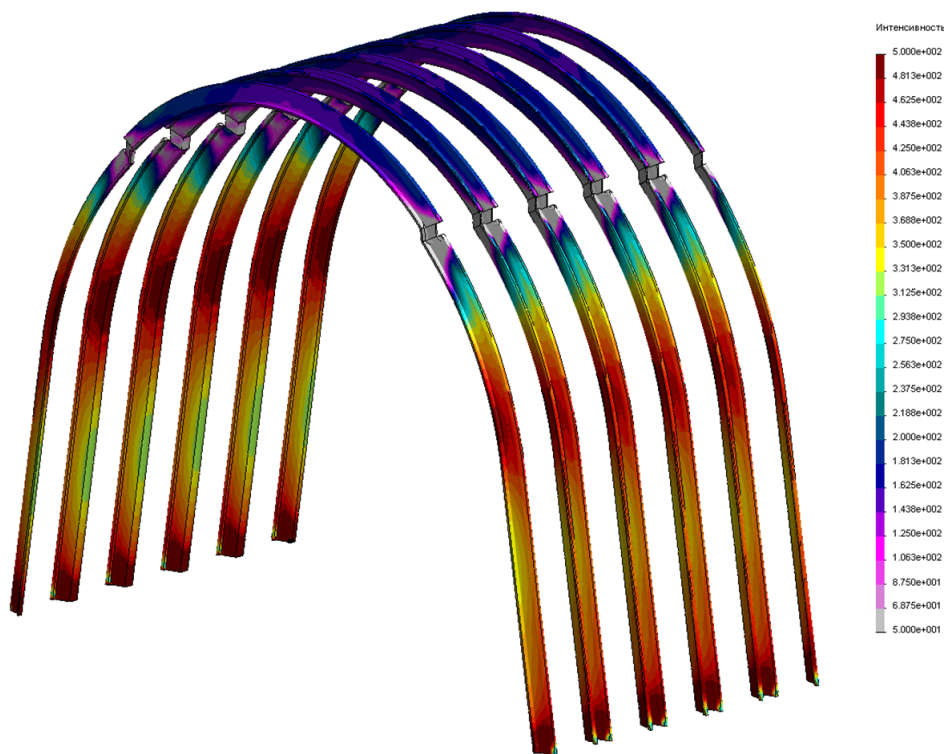


Рис. 3.3. Эпюра приведенных напряжений σ в рамной крепи тестовой модели

Таким образом, толщины модели в 5 м вполне достаточно для избежания краевых эффектов (по координате Z) и выполнения достоверного расчета НДС.

В итоге, анализ поля напряжений в тестовой модели позволяет утверждать, что ее размеры $49,95 \times 30 \times 5$ м вполне достаточны для достоверного описания процесса деформирования геомеханической системы «слоистый массив-крепь выработки».

3.4. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ КРЕПИ БАЗОВОЙ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

3.4.1. КОНСТРУКЦИЯ РАМНОЙ КРЕПИ КШПУ-15,0

Применительно к конструкции крепи (в том числе на базовом участке выработки) основное требование к моделированию системы «слоистый массив-крепь выработки» – максимально возможная адекватность отражения реального объекта приобретает повышенную актуальность. Трудности заключаются в отражении реальных конструктивных особенностей элементов крепи, линейные размеры которых многократно меньше средних размеров элементов угле вмещающей толщи, что требует более мелкой конечноэлементной сетки и существенно увеличивает продолжительность расчетов даже при использовании достаточно мощной компьютерной техники. Тем не менее, в проведенных исследованиях решена задача адекватного отражения конструкции рамной крепи КШПУ-15,0, которая установлена на базовом участке.

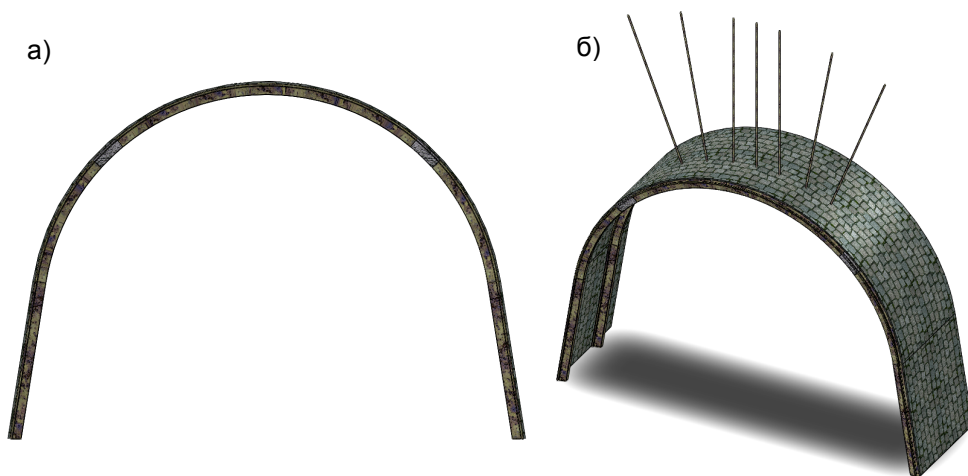


Рис. 3.4. Конструкция крепи базового участка конвейерного квершлага: а) форма поперечного сечения; б) общий вид

Форма и размеры крепи КШПУ-15,0 отражены (рис. 3.4) в соответствии с паспортом крепления конвейерного квершлага блока №3. Рамы изготовлены из спецпрофиля СВП-27 с шагом установки $L = 1$ м вдоль выработки. Смоделировано реальное поперечное сечение спецпрофиля СВП-27 с точным отображением конструкции податливого замка, подпятника и межрамного ограждения из металлической сетки. В соответствии с реальной схемой ус-

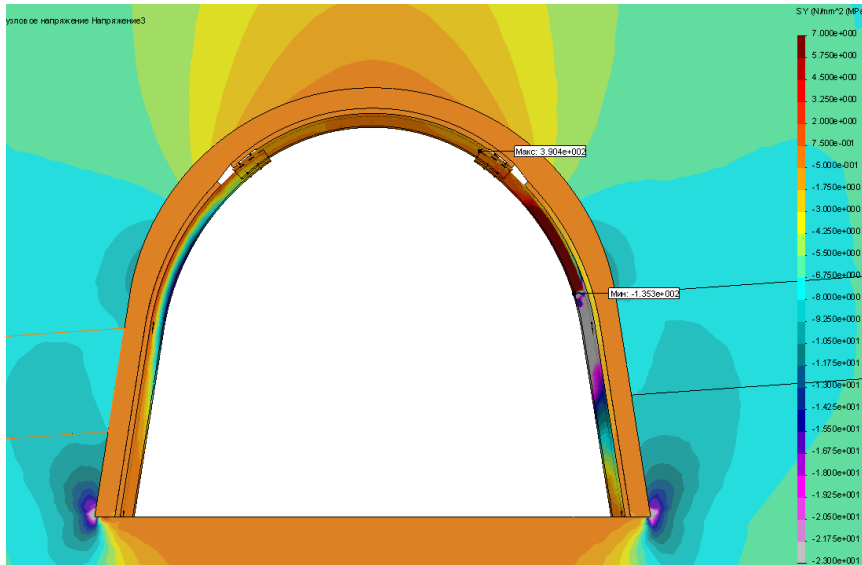
тановки анкеров на экспериментальном участке анкера смоделированы в кровле.

Спецпрофиль СВП изготавливается из стали Ст.5 [33] с механическими характеристиками: расчетный предел текучести $\sigma_T = 270$ МПа, модуль упругости $E^P = 21 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^P = 0,3$. Эти характеристики приняты к расчету при моделировании полной диаграммы деформирования Ст.5, включающей упругую стадию ($\sigma < \sigma_T$), площадку практически идеальной текучести ($\sigma = \sigma_T$) и стадию упрочнения металла до величины временного сопротивления $\sigma^6 = 560$ МПа на разрыв ($\sigma_T < \sigma \leq \sigma^6$). Отражение полной диаграммы деформирования Ст.5 позволяет учесть появление и развитие пластических деформаций в раме, нередко наблюдаемые в шахтных условиях. Такой подход способствует повышению адекватности моделирования реальному объекту. Но конструкция и режимы работы замка податливости и анкеров потребовали проведения специальных исследований на предмет их наиболее адекватного моделирования, что отражено в последующих разделах.

3.4.2. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ЗАМКА ПОДАТЛИВОСТИ РАМНОЙ КРЕПИ

На первом этапе моделирования замка податливости была предпринята попытка точного отражения его конструкции применительно к крепи КШПУ-15,0. В результате весьма трудоемкого и длительного процесса адаптации программного обеспечения к особенностям реальной конструкции замка, начальным и граничным условиям его моделирования удалось произвести расчет НДС системы «слоистый массив-крепь выработки»: эпюра вертикальных напряжений σ_y – рис. 3.5, а; эпюра осевых напряжений σ_Z – рис. 3.5, б; эпюра приведенных напряжений σ – рис. 3.6, а; эпюра горизонтальных напряжений σ_x – рис. 3.6, б. Однако расчет НДС системы удалось выполнить только в упругой постановке до осадки крепи (до срабатывания замка податливости), характеризующейся малыми перемещениями контура выработки. Попытка моделирования полных диаграмм деформирования всех элементов системы «слоистый массив-крепь выработки» выявила нестабильность технологии выполнения расчетов методом МКЭ из-за, как нам представляется, статической неуравновешенности рамы на участке замкового соединения. Анализ данной ситуации выявил, что по причине «точечного» контакта концевых участков профилей стойки и верхняка рамы друг с другом в замке и малой площади этого контакта появляется возможность деформирования (перемещения) рамы на большую величину (по координатам X , Y и Z) при весьма малом приращении нагрузки, что дает сбой в программе и прекращение выполнения

а)



б)

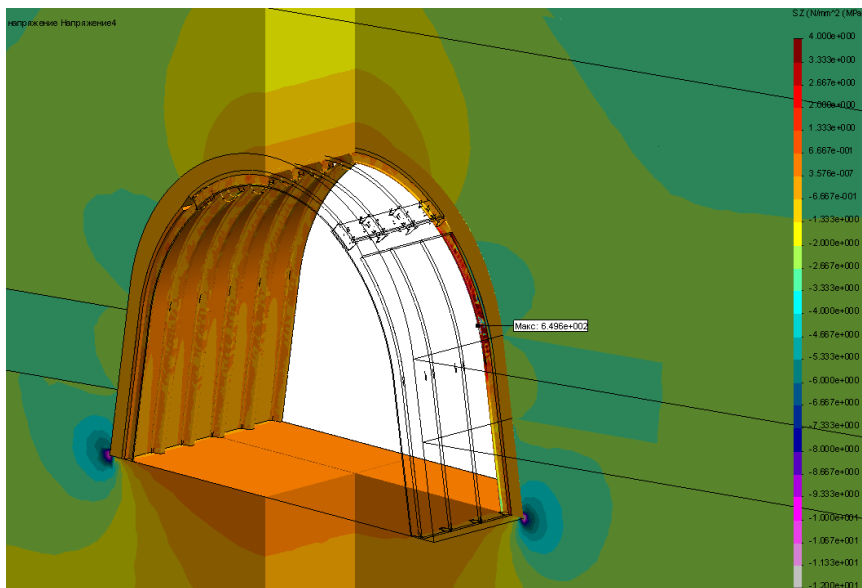
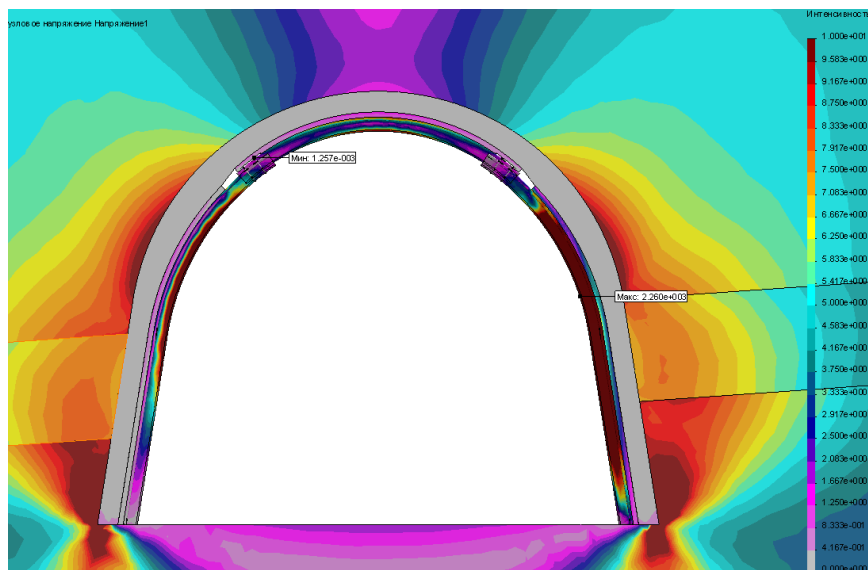


Рис. 3.5. НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» при полном отражении конструкции замка податливости: а) эпюра вертикальных напряжений σ_y ; б) эпюра осевых напряжений σ_z

а)



б)

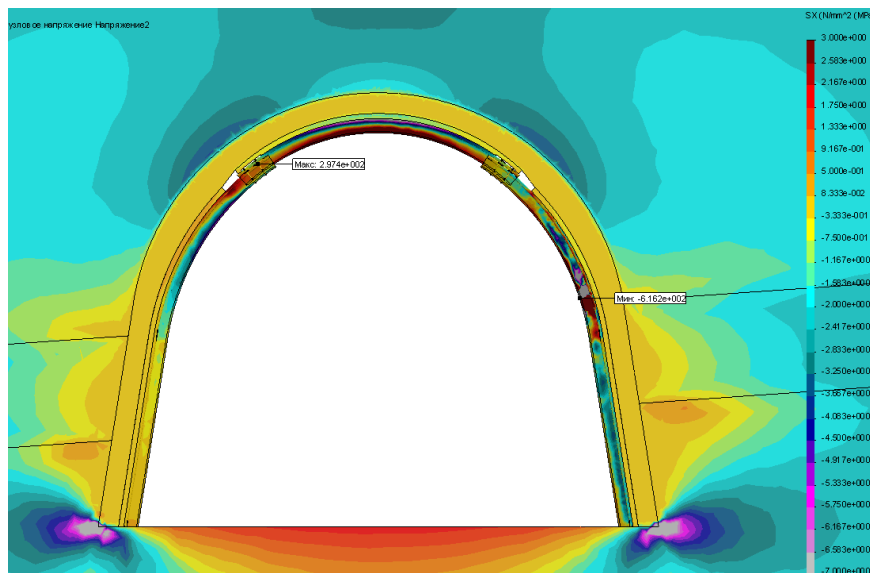
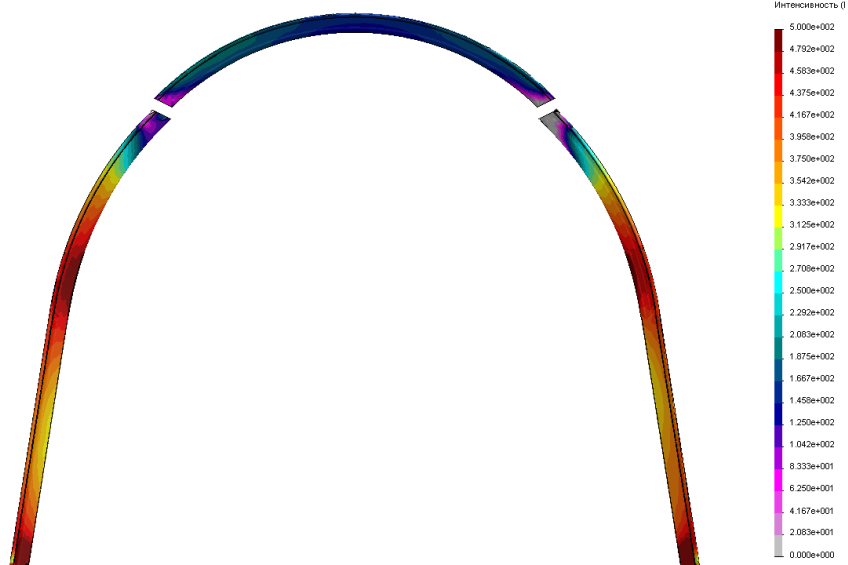


Рис. 3.6. НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» при полном отражении конструкции замка податливости: а) эпюра приведенных напряжений σ ; б) эпюра горизонтальных напряжений σ_x

расчета НДС. Ситуация еще более усугубляется при моделировании процесса податливости замка, когда при скольжении верхняка относительно стойки из-за существующей геометрии рамы площадь их контакта на участке замка произвольно изменяется с увеличением степени свободы перемещения (статическая неуравновешенность) рамы в любом направлении. Также следует учесть перспективу развития данной геомеханической модели в плане отражения реальной схемы установки анкеров, возможности пластического течения металла арматуры анкеров и рамы, появления областей не только разупрочнения, но и разрыхления в близлежащем породном массиве, учета реологических факторов и трещиноватости породы и т.п. Все указанные факторы приводят к усложнению геомеханической модели, что объективно усиливает нестабильность технологий выполнения расчетов НДС и неопределенность во времени преодоления данных трудностей моделирования. Поэтому представляется более целесообразным идеализировать конструкцию замка податливости, которая позволит стабильно продолжать расчеты НДС системы «слоистый массив-крепь выработки». Однако, упрощения конструкции замка не должны искажать его деформационно-силовую характеристику при работе в режиме податливости. Данное условие, на наш взгляд, позволит вполне адекватно смоделировать работу замка податливости.

Моделирование идеализированной конструкции замка податливости было выполнено в два этапа. *На первом* – в районе расположения замка податливости была введена прокладка из легкодеформирующегося материала, который под воздействием сжимающих усилий в раме обеспечивал ее податливость. При этом была достигнута стабильность процесса расчета НДС системы по полной диаграмме деформирования ее элементов, в подтверждение чего приведены эпюры напряжений и перемещений в рамной крепи на рис. 3.7 и 3.8. Анализ эпюр σ_y и σ_x показал их соответствие классическим положениям механики подземных сооружений: верхняк рамы находится под действием локальных растягивающих и небольших сжимающих σ_y , а стойки подвержены значительным сжимающим напряжениям σ_y , так как аккумулируют на себя всю вертикальную нагрузку; горизонтальные напряжения σ_x имеют достаточно высокую величину сжатия в верхняке (собирает на себя боковое давление пород) и знакопеременные напряжения σ_x действуют по контуру стоек, что обусловлено их деформациями на изгиб. Приведенные напряжения σ (по которым производится дальнейший прочностной расчет) указывают на среднюю степень нагруженности верхняка (от 20 до 60% от предела текучести стали Ст.5) и высокую нагруженность стоек с образованием ограниченных пластических областей в районе их опор и на уровне высоты зоны прохода людей. Искусственно увеличенный (для наглядности) масштаб полных перемещений (см. рис. 3.7, б) указывает на изгиб стоек на высоте 0,8...1,5 м с диапазоном перемещений $U = 20...30$ мм рамы в полость выработки. Эти результаты не противоречат визуальным наблюдениям за состоянием крепи на экспериментальном участке конвейерного квершлага.

а)



б)



Рис. 3.7. Рамная крепь с деформационными швами в районе замков податливости:
а) эпюра приведенных напряжений σ ; б) эпюра горизонтальных
напряжений σ_x

а)



б)



Рис. 3.8. Рамная крепь с деформационными швами в районе замков податливости:
 а) эпюра вертикальных напряжений σ_y ; б) эпюра полных перемещений U

Таким образом, моделирование деформационных вставок с легкодеформируемым материалом не вносит существенных искажений в качественную картину нагружения рамной крепи.

Второй этап моделирования замка выполнен для достижения адекватности реальному процессу податливости в количественном плане. В этой связи деформационно-силовая характеристика замка представляет собой зависимость реакции его сопротивления P от величины U_y податливости (как правило, в вертикальном направлении по координате Y). Ряд лабораторных испытаний рамной трехзвенной податливой крепи, в частности, на стендах ИГД им. А.А. Скочинского (Российская Федерация) показывает (рис. 3.9, а) характер работы замка из спецпрофиля СВП, приближающийся к режиму постоянного сопротивления. Этими же экспериментами установлено, что при правильной сборке замка рамная крепь переходит в режим податливости при сопротивлении $P_{нод} = (0,7...0,8)P_{max}$, приближающемся к максимальной несущей способности P_{max} рамы. Описанный режим квазипостоянного сопротивления замка податливости достаточно адекватно можно отразить диаграммой идеальной пластичности материала (рис. 3.9, б), располагаемого в раме по координатам установки замков. Параметры материала должны отражать реальную деформационно-силовую характеристику замка для конкретного типового сечения и номера спецпрофиля СВП. Предел текучести σ_T^3 имитатора замка должен быть таковым, чтобы при средних нормальных напряжениях по площади поперечного сечения СВП (посредине длины замка) при нагрузке на раму 80% от ее несущей способности материал модели переходил в состояние идеальной пластичности и обеспечивал податливость крепи. Данное условие можно выразить формулой

$$\sigma_T^3 = \frac{0,8P_{max}}{2F} \sin \alpha, \quad (3.4)$$

где F – площадь поперечного сечения СВП; α – угол расположения центра замка по отношению к вертикальной оси выработки.

Так, для типоразмера крепи КШПУ-15,0 и СВП-27 на экспериментальном участке конвейерного квершлага $P_{max} = 490$ кН, $\alpha \approx 44^\circ$, $F = 34,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ по данным [33]. Тогда в соответствии с формулой (3.4) получаем требуемое значение предела текучести материала замка $\sigma_T^3 = 39,3$ МПа, которое закладываем в расчет. Модуль упругости и коэффициент Пуассона принимаем как для стали Ст.5 ($E^3 = E^p = 21 \cdot 10^4$ МПа, $\mu^3 = \mu^p = 0,3$), чтобы упругие деформационные характеристики были постоянными по всему контуру рамы.

Имитатор замка в форме поперечного сечения соответствующего номера спецпрофиля СВП располагаем по координатам замков рамы реальной длиной 400 мм. Это позволяет моделировать раму цельной (от левой опоры

до правой) по контуру крепи с двумя вставками из материала имитатора замка, отличающегося от механических характеристик стали Ст.5 только пониженным пределом текучести. Такая идеализация замка податливости обеспечила стабильность процедуры расчета НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» по полной диаграмме деформирования материалов ее элементов.

Анализ НДС геомеханической модели с имитатором замка податливости крепи КШПУ-15,0 будет изложен ниже при ее тестировании.

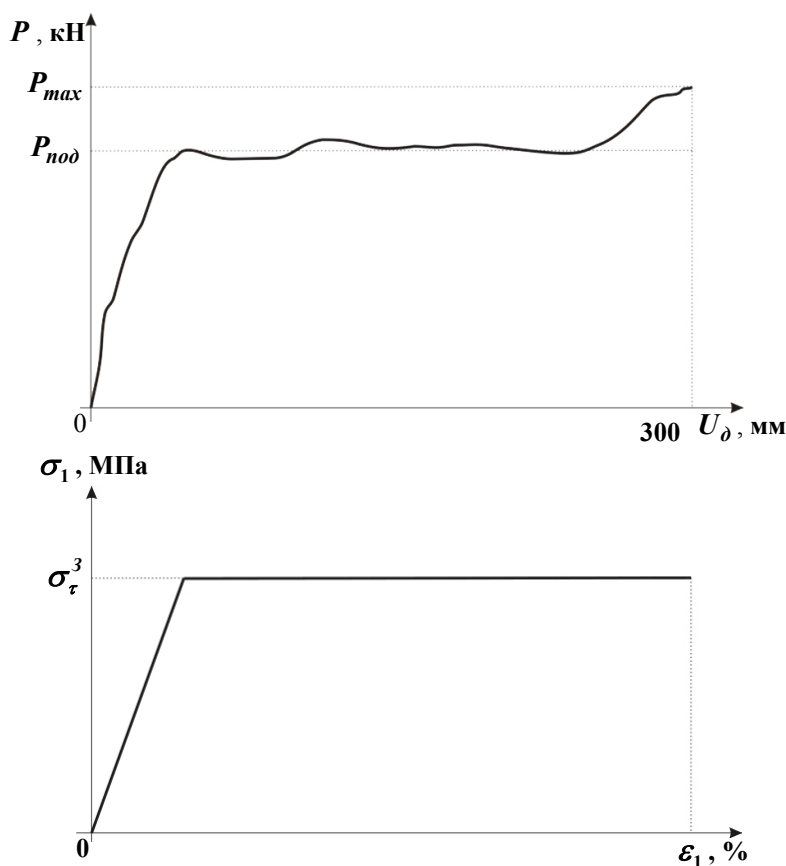


Рис. 3.9. К обоснованию модели замка податливости рамной крепи из СВП:
а) деформационно-силовая характеристика реальной конструкции замка;
б) полная диаграмма деформирования материала имитатора замка

3.4.3. ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ АНКЕРОВ И СХЕМЫ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ

На базовом участке конвейерного квершлага паспортом проведения и крепления предусмотрена установка анкеров по схеме «не полного перекрытия». Однако в действительности в данной схеме отсутствуют по два анкера, устанавливаемые в боках выработки. Такое решение, очевидно, принято по визуальным наблюдениям удовлетворительного состояния боков выработки. Кроме того, в силу затруднений технологического порядка все анкера в кровле установлены вертикально в плоскости поперечного сечения выработки. Эти изменения паспорта крепления учтены в созданной геомеханической модели для корректного выполнения сравнительного анализа результатов моделирования и шахтных наблюдений. Остальные параметры схемы установки анкеров приняты в соответствии с паспортом крепления выработки.

Конструкция анкеров, которые относятся к разновидности сталеполимерных, отображена максимально достоверно. Анкера изготовлены длиной 2400 мм из арматурной стали Ст.3 периодического профиля диаметром 22 мм. Механические свойства стали Ст.3 моделируются по полной диаграмме деформирования и согласно [29] имеют такие значения: предел текучести

$\sigma_T^a = 220$ МПа, временное сопротивление на разрыв $(\sigma^e)^a = 380...470$ МПа,

модуль упругости $E^a = 21 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^a = 0,3$. Анкера вводятся в шпury диаметром 25 мм и длиной 2300 мм. Пространство между арматурой и породными стенками шпury заполнено быстротвердеющим полимерным составом, механические характеристики которого в имеющейся технической документации не приведены. Поэтому усредненные механические характеристики полной диаграммы деформирования быстротвердеющего полимерного состава взяты из исследований [34]: предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}^{n,a} = 80$ МПа, далее имеет место площадка текучести, аналогичная металлам; модуль деформации при сжатии $E^{n,a} = 0,25 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu^{n,a} = 0,4$. Опорная плита анкера моделируется размером $180 \times 180 \times 8$ мм с механическими характеристиками стали Ст.3.

Помимо полного конструктивного соответствия по критерию максимально достоверного моделирования необходимо отобразить реальный режим работы сталеполимерного анкера. Обширные исследования данного вопроса, приведенные в горнотехнической литературе, позволяют утверждать, что сталеполимерный анкер, закрепляемый по всей его длине, имеет весьма жесткую деформационно-силовую характеристику, то есть не допускает сколь-нибудь существенную податливость вплоть до момента разрыва арматуры. Величина податливости сталеполимерного анкера (согласно имеющимся экспериментальным исследованиям) обусловлена в основном растяжением арматуры и не превышает нескольких миллиметров. Более значительная податливость анкера возможна только при нарушении контакта ар-

матуры с породными стенками шпура (низкая адгезия), обусловленного, например, их высокой влажностью. В этих условиях сталеполлимерные анкера применять не рекомендуется.

На базовом участке конвейерного квершлага приконтурные породы кровли не увлажнены, а опыт погашения заанкерованных выработок указывает на достаточное сцепление полимера с породой. Поэтому наиболее объективным будет моделирование контакта арматуры с породными стенками шпура как жесткого с однородными начальными условиями контакта по всей длине шпура.

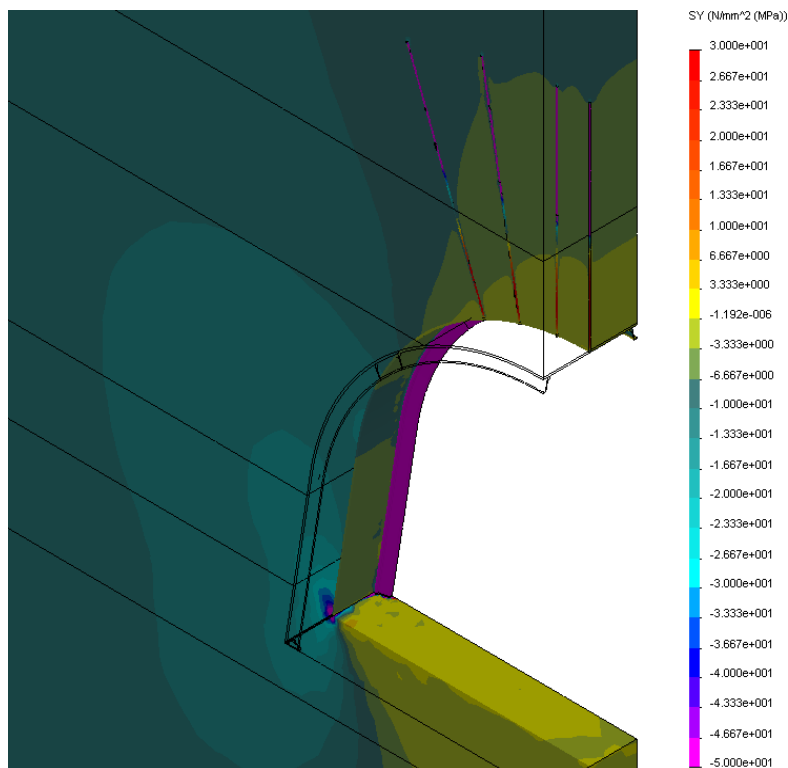
В итоге обоснованы все особенности рамной и анкерной крепей базового участка конвейерного квершлага и разработана геомеханическая модель системы «слоистый массив-крепь выработки».

3.5. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ НА АДЕКВАТНОСТЬ РЕАЛЬНОМУ ОБЪЕКТУ

Задача данного этапа – проанализировать, в какой мере результаты расчета НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» соответствуют (или не противоречат) классическим положениям механики подземных сооружений, существующим представлениям о процессах сдвижения слоистого массива в полость выработки, а также визуальным наблюдениям состояния базового участка конвейерного квершлага. В случае положительной оценки разработанная геомеханическая модель рекомендуется к использованию для прогноза состояния выработок и обоснования принимаемых технических решений по их креплению для условий блока №3 шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь».

На рис. 3.10 показан фрагмент эпюры вертикальных напряжений σ_y в окрестности выработки, на которой четко прослеживаются зоны разгрузки в кровле и почве и зона повышенного горного давления (ПГД) в боках, что вполне согласуется с существующими положениями механики подземных сооружений. В зоне ПГД в боках выработки имеются области, где σ_y превышает предел прочности на сжатие аргиллита, залегающего в непосредственной кровле и почве пласта C_6 ; здесь образуются локальные области предельного состояния аргиллита, создающие повышенное боковое давление на стойки рамы и приводящие к их изгибу с образованием пластических зон в самой стойке (как раз на участках, примыкающих к аргиллиту). В почве выработки зона разгрузки обширнее, чем в кровле, что связано, на наш взгляд, с двумя факторами: во-первых, кровля выработки упрочнена анкерами; во-вторых, в почве залегают мощный слой песчаника (обладающего повышенными прочностными и деформационными характеристиками по отношению к соседним слоям), который благодаря своей жесткости сдерживает проявления горного давления в почве, что также не противоречит современным исследованиям. Также общеизвестен факт (в механике подземных

сооружений) более интенсивного нагружения (разгрузки) того породного слоя (в составе слоистой толщи), который имеет повышенные деформационные характеристики в сравнении с соседними слоями, что и подтверждено на эпюре σ_y .



**Рис. 3.10. Эпюра вертикальных напряжений σ_y на базовом участке
конвейерного квершлага**

Обращает внимание характер распределения σ_y по длине анкеров: наиболее нагруженными растягивающими усилиями σ_y являются участки: заглубленный и примыкающий к выработке; средний участок длины анкера разгружен. Такое поведение анкера, закрепляемого по всей длине шпура, описано во многих исследованиях процессов анкерного упрочнения: преимущественное развитие перемещений породного контура выработки в сравнении с заглубленным концом заставляет арматуру анкера растягиваться и перемещаться совместно с породными стенками шпура; обычно величина перемещения анкера совпадает с перемещением породы в районе его середины (это

разгруженный участок длины анкера), а по концам анкера перемещение породы или больше (контур выработки) или меньше (заглубленный конец), что обуславливает растяжение анкера и его ответную реакцию сжатия на прилегающий объем пород. Следовательно, полученный результат согласуется с существующими представлениями о механизме анкерного упрочнения пород.

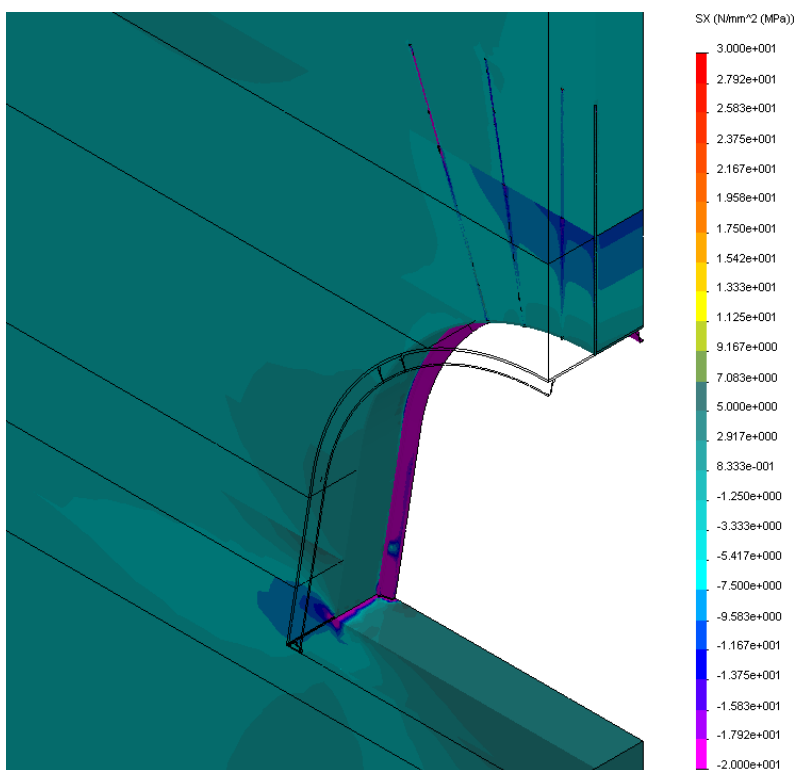


Рис. 3.11. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x на базовом участке конвейерного квершлага

В рамной крепи верхняк достаточно разгружен от σ_y , так как находится под защитой упрочненной анкерами кровли, а стойки (собирающие вертикальную нагрузку по всему контуру рамы) подвержены значительным напряжениям σ_y с появлением локальных пластических областей в районах примыкания аргиллита, что в целом согласуется с визуальными наблюдениями.

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x более однородна (рис. 3.11). Появляются растягивающие σ_x в почве (в основном в аргиллите), которые разупрочняют непосредственную почву и могут вызвать развитие пучения, хотя и

ограниченного из-за небольшой мощности аргиллита. Особо высокая концентрация сжимающих σ_x наблюдается в углу выработки (в районе опор стоек) и их величина превышает $\sigma_{сж}$ аргиллита, что формирует область предельного состояния и повышенную боковую нагрузку в районе опор стоек. По высоте боков выработки также появляются области растягивающих напряжений σ_x , разупрочняющие породу. Это обусловлено изгибом приконтурной части угольного пласта и пород непосредственной кровли за счет действия повышенных вертикальных напряжений σ_y в этой области. Данный фактор усиливает боковую нагрузку на стойки рамы. В непосредственной кровле появляется концентрация сжимающих σ_x , обусловленная упрочняющим действием анкеров: они формируют в кровле подобие грузонесущей породной балки, в которой при изгибе наблюдается сжатие в верхней части, а в нижней – небольшие растягивающие σ_x . Эта картина полностью соответствует сложившимся представлениям о механизме упрочняющего действия анкеров.

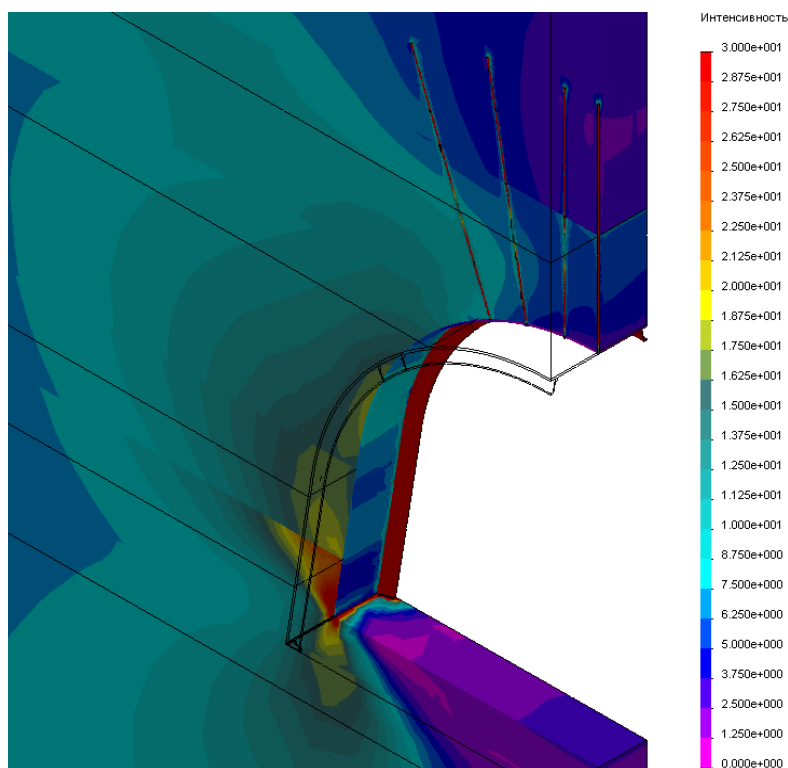


Рис. 3.12. Эпюра приведенных напряжений σ на базовом участке конвейерного квершлага

Четко прослеживается растяжение крайнего анкера, имеющего наименьший угол наклона к оси X , что подтверждает адекватность моделирования анкерной крепи, также как и то, что в арматуре анкеров преимущественно вертикального расположения (как более жестком теле) действуют повышенные сжимающие σ_x в сравнении с породными стенками шпура.

В рамной крепи повышенная боковая нагрузка формирует сжимающие σ_x в верхняке, величина которых, однако, не может вызвать появление пластических зон. В стойках рамы действуют весьма пониженные сжимающие σ_x , вносящие небольшой вклад в появление пластических зон по сравнению с σ_y .

Эпюра распределения приведенных напряжений σ подтверждает описанные выше закономерности (рис. 3.12): более глубокая степень разгрузки пород в непосредственной почве; относительно однородное поле пониженных σ в заанкерванной кровле, обуславливающее ее устойчивое состояние; зона ПГД в боках выработки относительно небольших размеров (до 4...5 м), в которой разрушению подвержены только локальные области аргиллита в непосредственной кровле и почве. Уровень приведенных напряжений σ в арматуре анкеров не вызывает ее пластического течения, а в стойках рамы существует две области (район опоры и на высоте 1,8...2 м от почвы) появления пластического состояния стали Ст.5.

В целом состояние моделируемого базового участка конвейерного квершлага вполне удовлетворительное (по данным расчета), о чем также свидетельствует эпюра полных перемещений рамы (рис. 3.13), величина которых изменяется в пределах 10...30 мм. Небольшой изгиб (до 15...20 мм) имеет место в стойке рамы на высоте 1,2...1,8 м. В качественном плане полученные результаты соответствует визуальным наблюдениям состояния базового участка выработки.

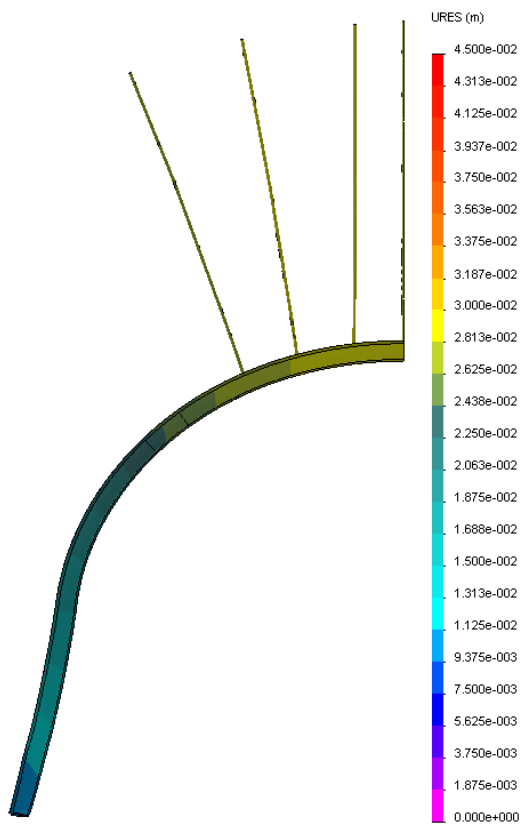


Рис. 3.13. Эпюра полных перемещений U крепи на базовом участке конвейерного квершлага

Таким образом, проведенное тестирование геомеханической модели системы «слоистый массив-крепь выработки» с имитатором замка податливости крепи КШПУ не выявило принципиальных противоречий в сравнении с современными исследованиями процессов сдвижения углевмещающей толщи в окрестности пластовой выработки, с одной стороны, и шахтными наблюдениями – с другой, что обосновывает целесообразность применения разработанной модели для прогнозной оценки состояния выработок блока №3 шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь».

Геомеханическая модель открыта для ее совершенствования (по результатам шахтных исследований) в части учета ослабляющих породу факторов и конструктивно-технологических особенностей сооружения и поддержания выработок.

ВЫВОДЫ

1. В соответствии с принятой методологией компьютерного моделирования пространственной системы «слоистый массив-крепь выработки» обоснованы структура и свойства углевмещающей толщи пород пласта C_6 по полной диаграмме ее деформирования, наиболее объективно описывающей реальное состояние массива.

2. Компьютерная модель рамной и анкерной крепей создана по условию максимально возможного отражения ее конструктивных особенностей. Обоснована модель замка податливости, позволяющая обеспечить стабильность вычислительного процесса при сформированной обширной базе учитываемых параметров геомеханической системы.

3. Тестирование разработанной модели доказало ее адекватность реальному объекту и позволила сделать ряд выводов:

- перспектива развития пучения пород почвы пластовой выработки весьма ограничена по причине залегания в почве достаточно мощного слоя песчаника с повышенными прочностными и деформационными характеристиками; основной вклад в процесс пучения вносит аргиллит малой мощности, залегающий в непосредственной почве;

- анкера в кровле сформировали подобие породной грузонесущей балки, находящейся в устойчивом состоянии и разгружающей верхнюю раму;

- в боках выработки в слабых породах непосредственной кровли и почвы (аргиллит) образуются ограниченные зоны предельного состояния, формирующие повышенную боковую нагрузку на стойки рамы, которые испытывают изгиб при горизонтальном перемещении до 15...20 мм;

- по этой причине в стойках (в районе опоры и на высоте 1,8...2,0 м) образуются пластические области, имеющие ограниченное распространение;

- в перспективе устойчивость выработки оценивается как удовлетворительная, что подтверждается небольшими перемещениями рамной крепи в диапазоне 10...30 мм; однако рекомендуется предусмотреть анкерное упрочнение боков на отдельных участках выработки, где возможно интенсивное проявление разупрочняющих аргиллит факторов.

4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ АНКЕРОВ И РАМ В ЕДИНОЙ ГРУЗОНЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ РАМНО-АНКЕРНОЙ КРЕПИ С САМОРЕГУЛИ- РУЕМЫМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАГРУЗКИ НА НЕСУЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Эффект повышения несущей способности рамной податливой трехзвенной крепи из спецпрофиля СВП и устойчивости пластовой выработки в целом за счет конструктивной механической связи стоек рамы с системой анкеров известен давно и подтвержден рядом экспериментальных исследований в подготовительных выработках шахт Западного Донбасса [35]. Теоретическая основа обоснования параметров рамно-анкерной крепи заложена в работах [36, 37] по снижению концентраций напряжений в геомеханических системах с помощью управляющих воздействий, которые, в частности, могут реализовываться через реакцию анкеров.

4.1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПОДАТЛИВОЙ СВЯЗИ АНКЕРОВ С РАМОЙ

Сущность технических решений [38, 39] заключается в формировании в кровле подготовительной выработки с помощью системы анкеров грузонесущей армированной породной плиты, предотвращающей расслоение пород кровли и резко ограничивающей их перемещение в полость выработки. Предполагается, что породы кровли имеют повышенную опасность разрушения в центральной части выработки, поэтому в этой ее части рекомендуется достаточно густая сетка анкерования, а боковые части грузонесущей плиты в кровле не упрочняются, следовательно, предполагается их устойчивое состояние. Такое предположение подтверждено анализом НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» в работе [40] и шахтными наблюдениями, но в условиях несущественного влияния ослабляющих породу факторов (реологии, обводненности, трещиноватости пород и т.п.). На участках выработки, где близлежащие породы (аргиллиты, алевролиты) обводнены, отмечается интенсификация проявлений горного давления. Тогда, на опасных участках следует менять схему расположения анкеров с целью упрочнения ими и боковых участков грузонесущей опорной плиты в кровле, что требует дополнительных исследований. В любом случае, эффективность работы грузонесущей опорной плиты связана с обеспечением целостности по всей длине ее пролета в кровле выработки. Армированная породная плита призвана воспринимать на себя основную часть вертикальной нагрузки и

ограничивать расслоения пород кровли за счет натяжения анкеров. Рамная же крепь в этом случае, в определенной степени, играет роль ограждающей конструкции и предназначена для восприятия нагрузки от локальных зон потери устойчивости в случае «отказа» отдельных анкеров, то есть рама как бы «страхует» устойчивость кровли на случай локальных возмущений горного давления и частичной потери несущей способности опорной плиты.

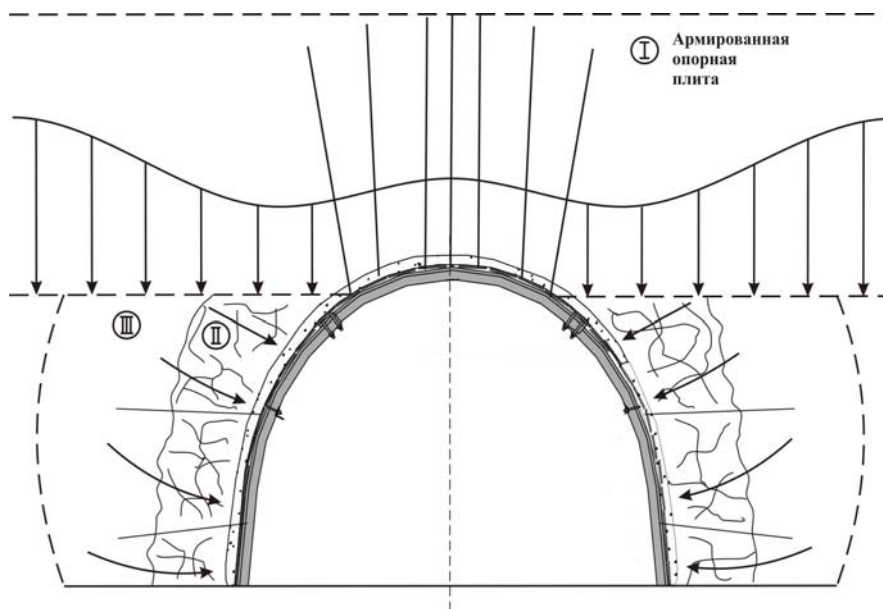


Рис. 4.1. Схема деформирования системы «слоистый массив-крепь выработки»

В боках выработки геомеханические процессы протекают несколько иначе, что в совокупности с техническими рекомендациями работ [38, 39] определяют следующие особенности деформирования системы «слоистый массив-крепь выработки», схематично отображенные на рис. 4.1. Армированная опорная плита (область I) в кровле выработки передает нагрузку на рамную крепь и приконтурные породы в боках; рамная крепь, благодаря своей конструктивной податливости, «уходит» от основной части вертикальной нагрузки и воспринимает только ее меньшую часть; следовательно, основная вертикальная нагрузка передается на приконтурные породы в боках выработки, которые уже являются частично разупрочненными (область II) от действия опорного давления; пониженное сопротивление разупрочненной зоны обуславливает перераспределение нагрузки от опорной плиты на более отдаленные участки боков выработки, НДС которых усиливается и при возможном ослаблении породы на отдельных участках по длине выработки зона разупрочнения в ее породных боках может расширяться (зона III). Под воз-

действием нагрузки от опорной плиты (сформированной в кровле) развиваются косонаправленные перемещения пород в боках выработки, которые нагружают, в том числе и стойки рамы. Два анкера в каждом боку выработки создают вокруг себя локальные области упрочненных пород, однако создать грузонесущую породную конструкцию по всей высоте выработки (как в кровле по ее ширине) два анкера не способны, поэтому боковая нагрузка в значительной мере передается на стойки рамы, где образуются области пластических деформаций, как показали исследования [40].

В данных условиях просматривается два технических решения по обеспечению устойчивости боков выработки:

– установка более густой сетки армирования анкерами повышенной длины приконтурных боковых пород на увеличенную глубину для формирования в боках грузонесущей породной конструкции;

– повышение сопротивления рамной крепи боковым нагрузкам за счет создания дополнительных точек опоры посредством механической связи анкеров со стойками рамы.

Первое решение имеет два основных недостатка: с одной стороны, более густая сетка анкерования боковых пород требует существенного увеличения материальных и трудовых затрат на крепление выработки; с другой стороны, нет уверенности в обеспечении устойчивого состояния боковых пород, так как значительный их объем в той или иной степени уже разупрочнен опорным давлением, в боках выработки – анкера способны предотвращать расслоение в локальном породном объеме вдоль своей оси, но упрочняющий эффект резко ослабевает при наличии плоскостей ослабления, расположенных между соседними анкерами. Таким образом, может возникнуть ситуация формирования грузонесущей конструкции в боках выработки из отдельных породных блоков, скрепленных анкерами. Эта распорная блочная система при существенной боковой нагрузке может терять устойчивость (при перемещении или повороте относительно друг друга соседних блоков) и ожидаемый эффект упрочнения боков достигнут не будет. Кроме того, исследования [40] показали, что установка в боках выработки по два анкера [38] существенно уменьшает перемещение породного контура по высоте стоек рамы, но не предотвращает формирование в стойках двух зон пластического состояния их материала, что, как показала практика, приводит к изгибу стоек рамы в полость выработки, а, следовательно, и к снижению несущей способности рамной и анкерной крепи в целом.

Второе техническое решение (рис. 4.2) заключается в соединении хвостовой части анкеров и стоек рам гибкими стяжками, растянутыми вдоль выработки. В качестве гибких стяжек могут использоваться любые стальные тросы, бывшие в употреблении, применение которых несущественно удорожает стоимость крепления, а дополнительные трудовые затраты также минимальны, так как состоят в растяжке отрезка каната вдоль выработки и его размещении на определенной высоте, например, в зазоре между породным контуром и опорной плитой анкера.

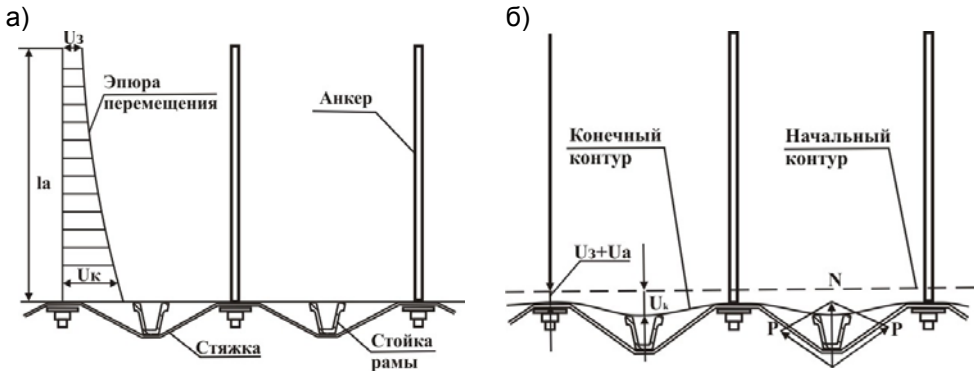


Рис. 4.2. К обоснованию механизма работы рамно-анкерной крепи с гибкими стяжками: а) исходное положение; б) схема натяжения гибких стяжек

С точки зрения геомеханических процессов в боках выработки гибкие стяжки не вносят сколь-нибудь существенных изменений, но, с точки зрения напряженного состояния образованной таким образом рамно-анкерной крепи, происходят его значительные изменения в направлении повышения несущей способности рамы, и в первую очередь ее стоек, что обосновано в следующем параграфе. Сейчас необходимо обосновать предложенные конструктивные решения на основе раскрытия механизма работы рамно-анкерной крепи с гибкими стяжками.

После проведения выработки каждый участок ее породного контура перемещается на определенную величину и нагружает рамную крепь. Общеизвестно, что рамные конструкции податливых крепей из спецпрофиля СВП не в состоянии существенно (влияние до 3...7%) ограничить перемещения породного контура [26, 27, 41], то есть рама перемещается совместно с породным контуром до момента наступления равновесного состояния массива. Также аналитическими и экспериментальными исследованиями установлены факт затухания перемещения породы в глубь массива с увеличением расстояния от контура выработки (см. рис. 4.2, а). Тогда анкер, имея определенную длину l_a закрепления в породе (обычно называется активной длиной анкера и по [38] составляет порядка 1,4 м в боках выработки), испытывает растягивающие усилия, обусловленные разницей между перемещением породы U_k на контуре выработки и перемещением U_3 на заглубленном конце анкера. Эти усилия обуславливают определенное растяжение арматуры анкера и ее смещение относительно породных стенок шпура, что в совокупности характеризуется величиной податливости анкера U_a . В сумме величина $U_3 + U_a$ всегда будет меньше значения U_k , что характеризует преимущественное боковое перемещение стойки рамы над перемещением опорной плиты анкера (см. рис. 4.2, б). Если стойку рамы и хвостовик анкера соединить гибкой связью в пери-

од установки крепи, то по мере продвижения проходческого забоя и развития боковых перемещений породного контура, разница $U_k - U_z - U_a$ будет увеличиваться и гибкая стяжка натягиваться, создавая реакцию N на раму в месте охвата ее стяжкой, то есть возникает податливая дополнительная опора, сопротивляющаяся боковым нагрузкам на раму. Количество и месторасположение таких опор будет соответствовать количеству анкеров в боках выработки (в плоскости поперечного сечения), а сами опоры ограничивают изгиб стоек рамы, что снижает интенсивность их НДС.

Теперь следует обосновать целесообразность применения именно податливых связей между рамной и анкерной крепями. Шахтные наблюдения за состоянием подготовительных выработок, пройденных, например, по пласту C_6 , указывают на разную степень их устойчивости, обусловленной переменной структурой близлежащего массива и интенсивностью действия ослабляющих породу факторов. Тем не менее, даже в весьма благоприятных горно-геологических условиях перемещения породного контура составляют, как минимум, несколько десятков миллиметров. Причем вектор этих перемещений разнонаправленный: в кровле – преимущественно вертикальный, в боках – косонаправленный, со значительной горизонтальной составляющей; кроме того, проявляются процессы пучения, а вместе с ними – вдавливание стоек рамы в слабые породы почвы; также следует учитывать отчасти стохастический характер проявлений горного давления вдоль выработки, когда соседние рамы разнонагружены и деформируются на разную величину в соседних сечениях – тогда возникает осевая составляющая (то есть, вдоль выработки по координате Z) перемещений приконтурных пород и крепи. Таким образом, имеет место спектр направлений перемещений элементов системы «слоистый массив-крепь выработки» во всех трех измерениях пространства (по координатам Y , X и Z).

Относительно данного вывода рассмотрим поведение жесткой связи между анкерами и рамной крепью [42]. Жесткая связь по своему определению не допускает сколь-нибудь существенного удлинения (податливости) в горизонтальном направлении (при соединении стоек с боковыми анкерами); сам сталеполимерный анкер (который принят к применению на шахте «Юбилейная») по своей деформационно-силовой характеристике относится к жестким конструкциям, податливость которой (при недопущении разрушения контакта с породными стенками шпура либо разрыва самой арматуры) характеризуется незначительным перемещением, максимум в несколько миллиметров, обусловленным растяжением арматуры и упруго-пластическим сдвигом ее относительно породных стенок шпура. Следовательно, возникает ситуация, когда компенсировать перемещения породного контура совместно с рамой в несколько десятков миллиметров нечем – усилия в жестких связях стремительно возрастают и происходит одно из трех возможных нарушений: разрыв жесткой связи между стойкой рамы и анкером; потеря несущей способности анкера (частичная или полная) из-за разрыва арматуры или потери ее сцепления с породными стенками шпура; пластический изгиб стойки рамы в месте

действия жесткой связи. Таким образом, податливость в горизонтальном направлении всей конструкции рамно-анкерной крепи посредством податливости основных ее элементов (рама-анкер-узлы механической связи) необходима и обусловлена самой природой проявлений горного давления, особенно в слабых углевмещающих породах Западного Донбасса.

Теперь проанализируем необходимость податливой связи стойки с анкерами в вертикальном направлении. Под воздействием преимущественно вертикального горного давления в кровле рамная крепь не только деформируется, но и перемещается как единая конструкция в направлении почвы. Об этом свидетельствуют как шахтные наблюдения, так и результаты компьютерного моделирования [43, 44], а основная причина такого явления заключается в процессе вдавливания опоры стойки в слабые породы почвы, величина которого может достигать нескольких сотен миллиметров. Значит, неминуемо происходит перемещение по вертикальной координате Y узла крепления механической связи на стойке рамы. При жесткой конструкции этой связи возможны следующие нарушения: разрыв самой жесткой связи из-за чрезмерного ее удлинения; изгиб жесткой связи (например, в виде металлического стержня) с возможным ее последующим разрывом; изгиб хвостовика анкера с возможным его разрывом и разрушением связи с жесткой стяжкой; разрушение устья шпура при изгибе приконтурной части арматуры анкера (скол породных призм у устья шпура) с ее возможным последующим разрывом. Сам изгиб хвостовой части арматуры анкера чреват уменьшением требуемой горизонтальной реакции на стойку рамы, так как классические положения строительной механики утверждают, что усилия внецентренного растяжения (растяжение с изгибом) гораздо быстрее вызывают пластическое течение металла, чем строго осевое растяжение арматуры анкера.

Аналогичные нарушения жесткой связи стоек рамы с анкерами происходят и по осевой координате Z в случае существенных колебаний интенсивности проявлений горного давления вдоль выработки.

Отмеченные недостатки жесткой связи анкера со стойкой рамы устраняются при конструировании связующего элемента, обладающего податливостью (без потери реакции воздействия на стойку) по всем трем направлениям (координаты Y , X и Z) возможного перемещения рамно-анкерной крепи в рамках единой геомеханической системы «слоистый массив-крепь выработка». Конструктивные решения податливого связующего элемента в виде гибкой стяжки предложены в работах [35, 45], отличаются простотой исполнения и подтвердили свою эффективность при шахтных испытаниях.

4.2. ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПА УВЕЛИЧЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАМНОЙ КРЕПИ С ПОМОЩЬЮ АНКЕРОВ

В процессе смещений породного контура выработки на рамную крепь формируется нагрузка $q(x, y)$, распределенная некоторым образом по ее кон-

туру (рис. 4.3), а реакция крепи приводит в равновесное состояние геомеханическую систему в целом. Внешняя нагрузка $q(x,y)$ генерирует в рамной крепи поле напряжений, определяющее степень ее устойчивости, а общепринятые методы расчета [41, 46] утверждают, что основной вклад в НДС рамы (85...95%) вносят изгибающие моменты $M(x,y)$, которые являются функцией внешней нагрузки $q(x,y)$ и геометрических параметров самой рамной крепи. Поэтому функция $M(x,y)$ является наиболее информативной, хорошо согласуется с эпюрой наибольших прогибов рамы (в этих местах в первую очередь появляются области пластических деформаций) и ей уделено основное внимание.

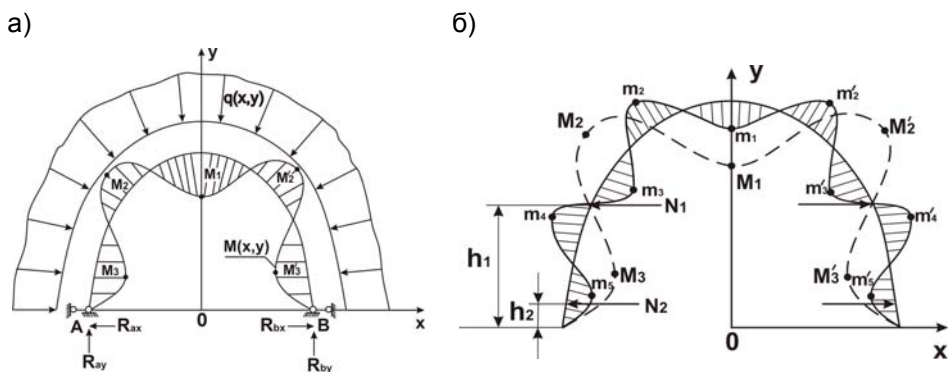


Рис. 4.3. К обоснованию принципа повышения несущей способности рамной крепи с помощью анкеров: а) общая схема нагружения рамы; б) схема понижения максимумов изгибающего момента: — — — до установки механических стяжек; ————— после установки гибких стяжек и создания рамно-анкерной крепи, как единой податливой грузонесущей конструкции

Принцип снижения максимумов изгибающего момента $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$, что тождественно снижению интенсивности напряжений в наиболее опасных сечениях рамы, поясним на наиболее распространенной эпюре $M(x,y)$, где максимумы проявляются: в районе замка свода (M_1), на участке свода между замком и его пятой (M_2) и в стойке рамы (M_3), как показано на рис. 4.3, а. В зависимости от эпюры $q(x,y)$ внешней нагрузки каждый из перечисленных максимумов может быть наибольшим по абсолютной величине и определять несущую способность рамы. Появление пластического состояния материала рамы возможно на каждом из перечисленных участках контура и, если с помощью реакции анкеров удастся снизить величину наибольшего максимума M_i , то это будет равнозначно увеличению несущей способности рамной крепи. Реак-

ции анкеров N_1 и N_2 , передающиеся через стяжки, изменяют как эпюру изгибающего момента $M(x, y)$, так и абсолютную величину ее максимумов M_i . Причем, влияние оказывают не только значения реакции анкеров $N_{1,2}$, но и координаты их действия на раму (в местах контакта рамы со стяжками); обычно в качестве таких координат используют высоту $h_{1,2}$ приложения на-

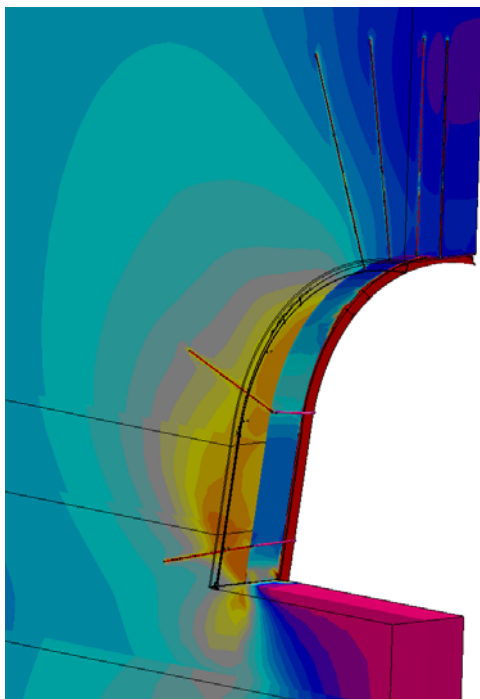


Рис. 4.4. К выбору высоты установки боковых анкеров по участкам наибольшего изгиба рамы

грузок (см. рис. 4.3, б), а угол наклона анкеров в боках выработки не оказывает никакого влияния в случае применения гибких стяжек. Также установлено [35...37], что направленное изменение какого-либо параметра (увеличение или уменьшение $N_{1,2}$ и $h_{1,2}$) снижает один из максимумов M_i (или несколько максимумов), но при этом увеличиваются по абсолютной величине другие максимумы M_i . Таким образом, сосредотачиваться на снижении только наибольшего максимума нельзя, так как другие M_i превзойдут его по абсолютной величине и они уже будут определять несущую способность рамы. Было установлено [36, 37], что минимальные значения наибольшего из всех возможных максимумов реализуются при условии их равенства между собой по абсолютной величине и когда выполняется последовательное изменение их знака по контуру рамы, как это показано на рис. 4.3, б сплошной линией, отражающей эпюру $m(x, y)$ минимизированных миниму-

мов $m_j (j = 1, 2, \dots, k)$. Следовательно, выбрать параметры $N_{1,2}$ и $h_{1,2}$ необходимо комплексно на основе совместного анализа закономерностей изменения всех действующих максимумов M_i и такая задача была решена в работе [45], где предложены зависимости по расчету $N_{1,2}$ и $h_{1,2}$, позволяющие снизить все возможные максимумы M_i до уровня m_j , что обуславливает повышение несущей способности рамной крепи.

Однако, указанные рекомендации получены при введении в геомеханическую модель ряда допущений и идеализаций, касающихся: эпюры нагруз-

ки на крепь; структуры вмещающего массива – он рассмотрен как однородный; переменных характеристик литологических разностей, слагающих близлежащую кровлю и почву выработки; формы выработки и конструктивных особенностей ее крепи. Значит, применительно к конкретной подготовительной выработке (например, откаточный квершлаг по пласту C_6 блока №3 шахты «Юбилейная») существующие рекомендации [45] можно рассматривать лишь в качестве первого приближения. При выполнении данных исследований предложено развитие методологии снижения интенсивности напряжений в раме с помощью реакции анкеров, основанное на использовании современных компьютерных программ метода конечных элементов, позволяющих отразить особенности системы «слоистый массив-крепь выработки» во всех деталях, что устраняет отмеченные выше идеализации и допущения. Сущность предложения заключается в последовательном выполнении следующих этапов.

На первом этапе выполняется моделирование системы «слоистый массив-крепь выработки» в полном соответствии с паспортом крепления выработки при отсутствии связей между боковыми анкерами и стойками рамы для наиболее характерной структуры близлежащего массива на подготавливаемом участке блока №3 шахты «Юбилейная».

Здесь наиболее тщательно анализируется НДС в рамной крепи и выявляются области пластического состояния стали Ст.5.

На втором этапе производится расчет НДС системы с параметрами крепи и боковыми анкерами, но уже с учетом предложения о соединении рам и анкеров гибкими стяжками (рис. 4.4). Здесь производится сравнение эпюр компонент напряжений и размеров зон пластического течения стали Ст.5 в раме.

На третьем этапе, при отсутствии ожидаемого резкого ограничения размеров областей пластического состояния в раме, оцениваются деформации самой рамы и выявляются участки наибольшего изгиба ее профиля, где наблюдаются максимальные изменения первоначальной формы крепи, как это показано на рис. 4.5 реальной модели подготовительной выработки. Изменяется высота установки боковых анкеров, которые теперь размещаются

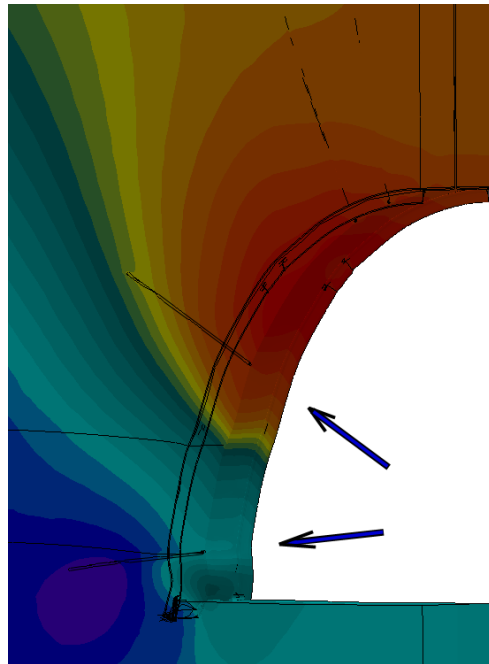


Рис. 4.5. К выбору высоты установки боковых анкеров по участкам наибольшего изгиба рамы

именно на участках наибольшего изгиба рамы, и производится расчет НДС системы при новой схеме крепления с последующей оценкой пластических областей в раме.

Четвертый этап выполняется в случае отрицательного результата предыдущего этапа – пластические области в раме полностью не устранены или не локализованы до незначительных размеров. Тогда проводится серия расчетов при вариации величин реакции $N_{1,2}$ боковых анкеров на раму с целью выявления условий достаточного ограничения (или исключения) зон пластических деформаций в стойках рамной крепи.

4.3. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ АНКЕРОВ И РАМ В ЕДИНОЙ ГРУЗОНЕСУЩЕЙ СИСТЕМЕ КРЕПИ

В первую очередь следует обосновать конструкцию связи хвостовика анкера со стойкой рамы, которая обеспечивает пространственную (по координатам X , Y и Z) податливость без нарушения режимов силового взаимодействия при взаимном перемещении основных (анкер, рама) элементов рамно-анкерной крепи относительно друг друга. Основные принципы реализации пространственной податливой связи анкера со стойкой рамы изложены в [35, 47, 48], проверены при эксплуатации выемочных штреков (в том числе и на шахте «Юбилейная» [35]), а обоснование и некоторая модернизация конструкции податливой рамно-анкерной крепи поясняется на рис. 4.6.

Во-первых, стяжки должны быть гибкими для исключения изгибающего момента (наиболее опасного вида нагрузки для стержневых конструкций) по их длине, что легко осуществляется применением стальных канатов или тросов, возможно, бывших в употреблении, для удешевления конструкции рамно-анкерной крепи. Второе преимущество канатов – возможность их упругого удлинения без разрыва: предварительные расчеты показали, что гибкий поворот каната при преимущественном перемещении стойки (по отношению к хвостовику анкера) на величину боковой податливости крепи КШПУ-15,0 (до 100 мм) требует удлинения контакта всего до 2 мм на длине шага установки рам $L = 1$ м; такое удлинение легко реализуется упругими свойствами канатов и обеспечивает податливость гибкой связи по горизонтали (координата X). Третье преимущество стального каната (даже бывшего в употреблении) – это его высокое разрывное усилие при небольших диаметрах порядка 16...22 мм, что позволяет развивать значительное сопротивление рамно-анкерной крепи проявлениям горного давления.

Во-вторых, применение гибкой стяжки из каната позволяет предельно упростить ее связь со стойкой рамы (см. рис. 4.6): канат прилегает к наружной поверхности СВП на уровне высоты установки соответствующей группы боковых анкеров, а контакт стойки с канатом обеспечивается его натяжением при помощи гайки на хвостовике анкера. В случае перемещения рамы относительно

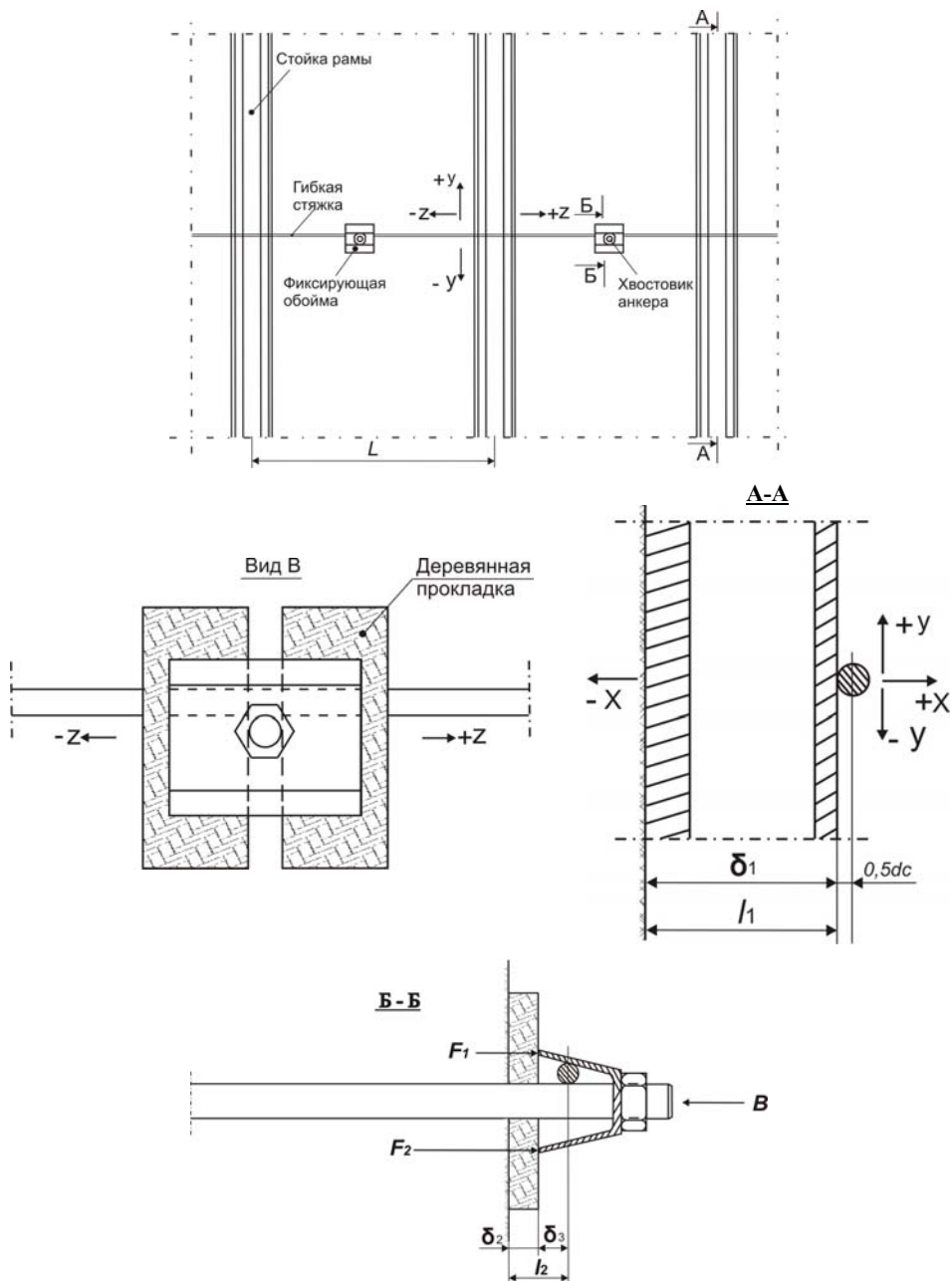


Рис. 4.6. К обоснованию конструктивных связей анкеров с рамной крепью

анкера по вертикали (координата Y) канат будет проскальзывать по поверхности СВП как только вертикальная составляющая натяжения каната превысит силы его трения по поверхности СВП. Таким образом, простое конструктивное решение обеспечивает вертикальную податливость связи рамы с анкерами. Природа силового взаимодействия каната со стойкой рамы посредством сил трения позволяет легко реализовать податливость и в направлении продольной оси выработки (координата Z). Такая податливость необходима по причине объективно существующей неравномерности проявлений горного давления по длине выработки: более нагруженная рама перемещается на большую величину – канат со стороны данной рамы натягивается сильнее и во избежание изгибных усилий, как в хвостовиках соседних анкеров, так и в стойках соседних рам, необходимо уравновесить повышенное натяжение каната на наиболее нагруженной раме; этот процесс происходит автоматически при проскальзывании каната относительно стойки рамы и хвостовика анкера.

В-третьих, пространственная податливость должна отчасти обеспечиваться и узлом крепления каната на хвостовике анкера наряду с требованием предотвращения его изгиба и надежной фиксации каната, как в процессе его натяжения, так и работы в режиме податливости. Предложенная конструкция (см. рис. 4.6) узла крепления каната на хвостовике анкера достаточно проста и малозатратна по причине изготовления фиксирующей обоймы (опорной плиты) из отходов спецпрофиля СВП. В донной части фиксирующей обоймы вырезается отверстие для прохода хвостовика анкера и его закрепления гайкой; канат размещается внутри фиксирующей обоймы между ее внутренней поверхностью и хвостовиком анкера; для обеспечения устойчивости породных стенок шнура в районе его устья используются деревянные прокладки (из отходов при изготовлении деревянных затяжек и т.п.), размещаемые между породным контуром и торцами фиксирующей обоймы. Такая конструкция узла крепления стяжки на хвостовике анкера обеспечивает основное направление податливости – вдоль выработки, так как только совместная работа (по координате Z) связи анкера и связи рамы обеспечит податливость вдоль выработки рамно-анкерной крепи в целом. Остальные направления податливости (по координатам X и Y) обеспечиваются в основном «плавающим» контактом каната со стойкой рамы. Для узла крепления стяжки на хвостовике анкера важным (помимо указанных факторов) является обеспечение надежной фиксации каната в процессе его натяжения, так и дальнейшей работы. С этой точки зрения, в процессе натяжения каната он надежно зафиксирован в обойме с возможностью перемещения совместно с ней и некоторого перемещения относительно обоймы до положения полного контакта с ее внутренней поверхностью и хвостовиком анкера. Одновременно, вдавливанием торцов фиксирующей обоймы в деревянные прокладки компенсируются неточности исходного монтажа узла крепления, и сохраняется целостность устья породных стенок шнура. В ходе дальнейшей работы рамно-анкерной крепи, в случае возникновения вертикальных перемещений стойки относительно анкера, может появиться вертикальная составляющая реакции стяжки на хвостовике

анкера (до момента вертикального проскальзывания каната по стойке). Изгиб хвостовика анкера в вертикальном направлении предотвращает фиксирующая обойма, которая создает восстанавливающий момент от пары сил $F_{1,2}$ (см. рис. 4.6) на торцах обоймы.

Таким образом, предложенная конструкция податливой рамно-анкерной крепи позволяет повысить ее сопротивление проявлениям горного давления при несущественном увеличении материальных и трудовых затрат на ее изготовление и установку.

4.4. РАСЧЕТ ПОДАТЛИВОГО СОЕДИНЕНИЯ РАМЫ С АНКЕРОМ

Предложенное техническое решение должно быть также обосновано расчетным путем применительно к условиям крепления, например, подготовительных выработок шахты «Юбилейная».

Изложенная выше принципиальная конструкция гибкой связи анкера с рамой предельно проста и требует выбора каната, обеспечивающего необходимое по паспорту крепления выработки усилие натяжения каждого анкера, например, $N_{1,2} = 50$ кН. Остальные исходные данные соответствуют паспорту крепления выработки с одним лишь изменением, связанным с рекомендациями НГУ [40] по замене СВП-27 на СВП-19 для крепи КШПУ-15,0.

Предварительное натяжение каждого анкера с усилием не менее 50 кН осуществляется закручиванием гайки на хвостовике анкера; величина крутящего момента на динамометрическом ключе определяется по формуле [49]

$$M_{кр} = \frac{0,24}{\pi} N_{1,2} d_a, \quad (4.1)$$

где $N_{1,2} = 50$ кН – усилие натяжения анкеров; $d_a = 25$ мм – диаметр арматуры анкера.

Расчет по формуле (4.1) показывает, что для достижения требуемой величины натяжения анкеров необходим крутящий момент не менее $M_{кр} = 95,5$ Н·м, что легко осуществляется инвентарным динамометрическим ключом с длиной рукоятки 0,6 м; при этом усилие на рукояти ключа должно составлять около 160 Н (16,2 кгс).

При осуществлении распора анкеров натягиваются гибкие стяжки (рис. 4.7), усилия в которых определяются из параллелограмма сил

$$P = \frac{N_{1,2}}{2 \sin \beta}, \quad (4.2)$$

где P – усилия в гибких стяжках (канате); β – угол наклона стяжки к оси выработки.

Угол наклона стяжки β определяется положением (по координате X) каната при охвате стойки (расстояние l_1) и положением каната на хвостовике анкера (расстояние l_2)

$$\beta = \arctg 2 \frac{l_1 - l_2}{L}, \quad (4.3)$$

где L – шаг установки рам и боковых анкеров вдоль выработки.

Согласно расчетным схемам (см. рис. 4.6 и рис. 4.7) расстояние l_1 определяется

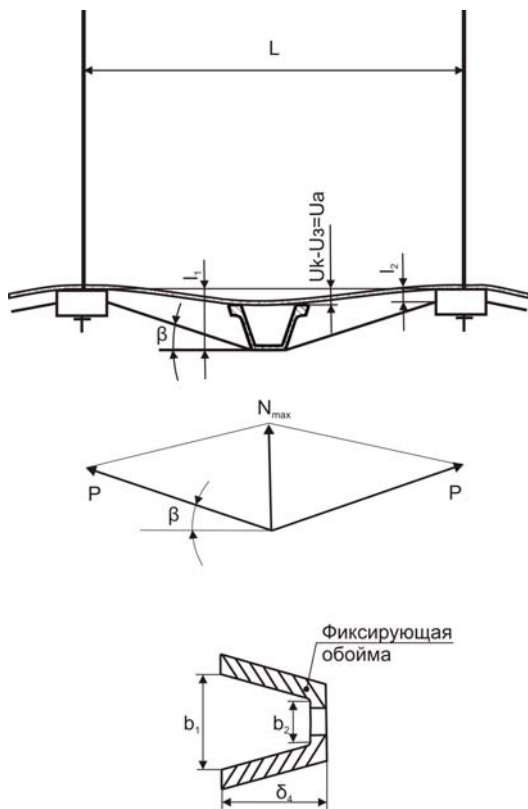


Рис. 4.7. Схемы к расчету гибкой стяжки

высотой δ_1 спецпрофиля СВП-19 (согласно [33] $\delta_1 = 102$ мм), диаметром стяжки d_c , разницей $U_k - U_3 - U_a$ между смещением породного контура U_k в боку выработки, смещением породы на заглубленном конце анкера U_3 и растяжением его арматуры U_a :

$$l_1 = \delta_1 + \frac{d_c}{2} + U_k - U_3 - U_a. \quad (4.4)$$

Расстояние l_2 определяется геометрией узла крепления стяжки на хвостовике анкера (см. рис. 4.6 и рис. 4.7), в частности: толщиной δ_2 деревянной прокладки (стандартная толщина необрезной доски под затяжку $\delta_2 = 25$ мм) и расстоянием δ_3 фиксации каната в обойме:

$$l_2 = \delta_2 + \delta_3, \quad (4.5)$$

$$\text{где } \delta_3 = \delta_4 \frac{e_1 - d_a - 2d_c}{e_1 - e_2}, \quad (4.6)$$

здесь: δ_4 – высота внутренней части фиксирующей обоймы (для СВП-19 $\delta_4 = 68,5$ мм); e_1 и e_2 – максимальная и минимальная внутренняя ширина фиксирующей обоймы (для СВП-19 $e_1 = 94$ мм, $e_2 = 51$ мм).

Остаются неизвестными параметры U_k , U_3 и U_a в формуле (4.4). Пере-

мещения породного контура U_k в боках выработки переменные по ее длине и зависят для одной и той же структуры углевмещающего массива от интенсивности действия ослабляющих породу факторов (в основном обводненности приконтурных пород). Расчеты и инструментальные наблюдения показывают, что величина перемещения боков изменяется от десятков до сотни миллиметров, что соответствует конструктивной боковой податливости крепи КШПУ. Поэтому примем $U_k = 100$ мм для участка более интенсивного проявления горного давления. Величина перемещения пород на заглубленном конце анкера U_3 зависит от перемещений породного контура и функции затухания перемещений $U(x, y)$ по глубине массива. Эксперименты (при установке глубинных анкеров [50]) и аналитические расчеты утверждают, что величина перемещения элементарного породного объема (на стадии разупрочнения) убывает обратно пропорционально расстоянию от контура выработки в первой степени. Тогда можно использовать следующую формулу для расчета U_3 :

$$U_3 = \frac{U_k}{1 + \frac{2l_a}{B}}, \quad (4.7)$$

где $l_a = 1,4$ м – активная длина анкеров в боках согласно паспорта крепления выработки; $B = 5,6$ м – ширина выработки в проходке.

Тогда, принимая $U_k = 100$ мм, получаем значение перемещений на заглубленном конце анкера $U_3 = 66,7$ мм.

Удлинение арматуры анкера U_a под нагрузкой $N_{1,2} = 50$ кН определяется по формуле

$$U_a = \frac{4N_{1,2}l_a}{\pi d_a^2 E_a}, \quad (4.8)$$

где $E_a = 2,1 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости арматуры анкера (сталь Ст.3).

Теперь у нас есть все необходимые данные для расчета по формулам (4.2)-(4.8) растягивающих усилий P в гибких стяжках, по которым выбирается соответствующий канат или осуществляется проверка уже имеющегося каната на разрыв. Наиболее экономичен второй путь, когда, например, после плановой замены канатов на тягово-предохранительных лебедках остались старые (бывшие в употреблении) канаты, допустим канат двойной свивки типа ЛК РО (маркировочная группа 1578) диаметром $d_c = 18$ мм, который имеет разрывное усилие не менее $P_{max} = 161,5$ кН [51]. Произведем проверку данного каната на прочность при его использовании в качестве гибкой стяжки в предложенной конструкции податливой рамно-анкерной крепи.

Расчет выполняется в следующей последовательности:

– определяем удлинение арматуры анкера под воздействием его натя-

жения усилием $N_{1,2} = 50$ кН по формуле (4.8)

$$U_a = \frac{4 \cdot 50 \text{ кН} \cdot 1,4 \text{ м}}{3,14 \left(25 \cdot 10^{-3} \right)^2 \text{ м}^2 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \text{ кПа}} = 0,68 \cdot 10^3 \text{ м} \approx 0,7 \text{ мм};$$

– по формуле (4.7) рассчитываем перемещение боковых пород на заглубленном конце анкера при перемещении контура выработки $U_K = 100$ мм

$$U_3 = \frac{100 \text{ мм}}{1 + \frac{2 \cdot 1,4 \text{ м}}{5,6 \text{ м}}} = 66,7 \text{ мм};$$

– по формуле (4.4) определяем расстояние l_1 между координатой X положения породного контура в месте установки анкера и осью каната ($d_c = 18$ мм), охватывающего стойку рамы из СВП-19 ($\delta_1 = 102$ мм)

$$l_1 = 102 \text{ мм} + \frac{18 \text{ мм}}{2} + 100 \text{ мм} - 66,7 \text{ мм} - 0,7 \text{ мм} = 143,6 \text{ мм};$$

– по формуле (4.6) рассчитываем параметр δ_3 для фиксирующей обоймы, изготовленной из отходов СВП-19 ($\delta_4 = 68,5$ мм, $e_1 = 94$ мм, $e_2 = 51$ мм) при диаметре арматуры анкера $d_a = 25$ мм

$$\delta_3 = 68,5 \text{ мм} \frac{94 \text{ мм} - 25 \text{ мм} - 2 \cdot 18 \text{ мм}}{94 \text{ мм} - 51 \text{ мм}} = 52,6 \text{ мм};$$

– по формуле (4.5) определяем расстояние l_2 между породным контуром и осью каната на хвостовике анкера (при толщине деревянной прокладки $\delta_2 = 25$ мм)

$$l_2 = 25 \text{ мм} + 52,6 \text{ мм} = 77,6 \text{ мм};$$

– определяем угол наклона β гибкой стяжки к продольной оси выработки по формуле (4.3) при шаге установки рам $L = 1$ м

$$\beta = \arctg 2 \cdot \frac{143,6 \text{ мм} - 77,6 \text{ мм}}{1000 \text{ мм}} = 7,52^\circ;$$

– по формуле (4.2) определяем требуемое разрывное усилие гибкой стяжки

$$P = \frac{50 \text{ кН}}{2 \cdot \sin 7,52^\circ} = 190,8 \text{ кН}.$$

Сравнивая расчетное значение (190,8 кН) с разрывным усилием имеюще-

гося каната (161,5 кН), приходим к выводу о его непригодности. Следует увеличить диаметр каната d_c , при котором автоматически растет и его разрывное усилие. Например, для того же типа каната ЛК РО и той же маркировочной группы №1578 [51] диаметр каната $d_c = 20$ мм обеспечивает разрывное усилие не менее $P_{max} = 197,5$ МПа. Таким образом, в условиях поддержания, например, откаточного квершлага блока №3 шахты «Юбилейная» для возведения рамно-анкерной крепи с податливой связью вполне подходит канат марки ЛК РО диаметром $d_c = 20$ мм.

ВЫВОДЫ

1. Результаты компьютерного моделирования НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» позволили раскрыть механизм работы рамной крепи и анкеров при существующей схеме поддержания пластовой выработки, сущность которого сводится к формированию армопородной плитой в кровле повышенного горного давления в боках выработки, приводящего к появлению областей пластического состояния стоек рамы. В этой связи сформулировано ресурсосберегающее направление соединения гибкими связями рамной крепи и анкеров в боках выработки в единую грузонесущую систему, позволяющую повысить устойчивость выработки. При этом, исходя из геомеханики деформирования системы «слоистый массив-крепь выработки», обоснована эффективность создания пространственной податливости между элементами рамно-анкерной крепи.

2. Раскрыт принцип увеличения несущей способности рамной крепи за счет создания дополнительных податливых опор по высоте стоек рамы и разработана методология поиска рациональных параметров рамно-анкерной крепи по результатам компьютерного моделирования изменения НДС рамы по ее контуру.

3. Обосновано технологически простое конструктивное решение по созданию между рамами и анкерами механических связей, обладающих податливостью по всем трем измерениям пространства, которые также характеризуются минимальными затратами материальных и трудовых ресурсов.

4. Создан метод расчета гибких связей и осуществлен выбор стяжек для условий поддержания подготовительных выработок, например блока №3 шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь». Приведенный конкретный пример расчета гибких связей анкеров с рамами наглядно показывает, что из материалов, бывших в употреблении, и отходов (при изготовлении крепежных изделий) можно создать высокоэффективную податливую конструкцию рамно-анкерной крепи с довольно низкими дополнительными затратами, которые существенно окупаются снижением металлоемкости непосредственно рамы.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ ПОРОДНОГО КОНТУРА ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Основная задача данного исследования заключается в раскрытии механизма формирования поля напряжений непосредственно в приконтурных породах, где влияние формы породного обнажения (а значит, и формы крепи выработки) достаточно велико. Несмотря на ограниченные размеры приконтурной породной зоны (обычно 1...1,5 характерного размера выработки) именно в ней происходят основные геомеханические процессы, оказывающие влияние в конечном итоге на устойчивость выработки: образование областей разгрузки в породах кровли и почвы, области повышенного горного давления (ПГД) в боках. В указанных областях образуются зоны предельного состояния породы (стадии разупрочнения и разрыхления в полной диаграмме деформирования), которые вносят решающий вклад в формирование нагрузок на крепь.

Такая постановка задачи, на наш взгляд, наиболее целесообразна, так как вскрывает геомеханические истоки образования возмущений поля НДС – форму и размеры породного обнажения. С другой стороны, общеизвестны исследования по выявлению рациональной формы выработки, в которых, разумеется, нет конкретизации структуры и свойств (тем более по полной диаграмме деформирования) применительно к рассматриваемому участку углевмещающего породного массива. С третьей стороны, следует учитывать технико-экономические аспекты изменения формы породного контура, связанные с изменением конструктивно-технологических параметров крепления выработок, процесса изготовления новых конструкций крепей и т.п.

Проанализировав указанный комплекс вопросов считаем целесообразным провести исследования по оценке устойчивости породных обнажений для двух форм крепей: широко применяемой на шахтах Западного Донбасса серии КШПУ и созданной на уровне экспериментальных образцов серии крепи выпукло-треугольной КВТ-2 (разработчик – ЗДНПЦ «Геомеханика»). В пользу такого варианта сравнения говорит то, что обе серии конструкций крепей предназначены для условий слоистой углевмещающей толщи слабых пород Западного Донбасса, а затраты на промышленное освоение крепи КВТ-2 (в случае ее положительной оценки) относительно невелики. Для объективности сравнительного анализа выбраны типоразмеры, максимально соответствующие друг другу по площади поперечного сечения и назначению выработки: КШПУ-15,0 и КВТ-2-14,5. Структура и свойства углевмещающей толщи соответствуют исследуемому участку шахтного поля ш. «Юбилейная». Размеры породных обнажений приняты по указанным ранее типовым проектным решениям.

Преимущества (недостатки) сравниваемых двух форм породных обнажений оценены по результатам анализа полей распределения вертикальных σ_y , горизонтальных σ_x и приведенных напряжений σ , определяемых с помощью отработанной модели «слоистый массив-крепь выработки», в которой отсутствует сама конструкция рамно-анкерной крепи.

На рис. 5.1 и рис. 5.2 приведены эпюры вертикальных напряжений σ_y для форм породных обнажений, соответствующих крепи КШПУ-15,0 и КВТ-2-14,5. В кровле выработки образуется зона разгрузки с появлением растягивающих σ_y , которым, как известно, любая порода сопротивляется слабо; особо это касается представленных пород малой крепости (аргиллит). Поэтому высота зоны предельного состояния кровли оценивается, как правило, с некоторым запасом по условию отсутствия растягивающих напряжений ($\sigma_y = 0$). Результаты расчета эпюры σ_y показывают, что для формы КШПУ-15,0 высота зоны предельного состояния достигает $h_K = 0,85$ м, а для формы КВТ-2-14,5 $h_K = 0,52$ м. В абсолютном измерении понижение высоты зоны предельного состояния не очень существенно – всего 0,33 м, но в относительном измерении – происходит ограничение на 38,8%, что весьма существенно. Логично предположить, что и сформированная анкерами породная грузонесущая конструкция будет более устойчивая для формы КВТ-2-14,5 и передавать меньшую нагрузку на верхняк рамы.

В почве глубина распространения зоны предельного состояния ($\sigma = 0$) для формы КШПУ-15,0 составила $h_{II} = 3,22$ м, а для формы КВТ-2-14,5 $h_{II} = 2,94$ м; то есть и абсолютная разница (0,28 м) и относительная (8,7%) невелики и можно прогнозировать примерно равную степень устойчивости пород почвы для обеих форм выработки.

В боках выработки действует концентрация сжимающих σ_y , формирующих область предельного состояния, размеры которой оцениваются по величине предела прочности породы на сжатие $\sigma_{сж}$. Этот критерий показывает устойчивое состояние угольного пласта, а слабый аргиллит непосредственной кровли и почвы в боках выработки подвержен разупрочнению и разрушению. Ширина областей предельного состояния в боках выработки:

– для формы КШПУ-15,0 в непосредственной кровле $h_{\sigma} = 3,26$ м, в непосредственной почве $h_{\sigma} = 5,39$ м;

– для формы КВТ-2-14,5 в непосредственной кровле $h_{\sigma} = 2,74$ м, в непосредственной почве $h_{\sigma} = 4,23$ м.

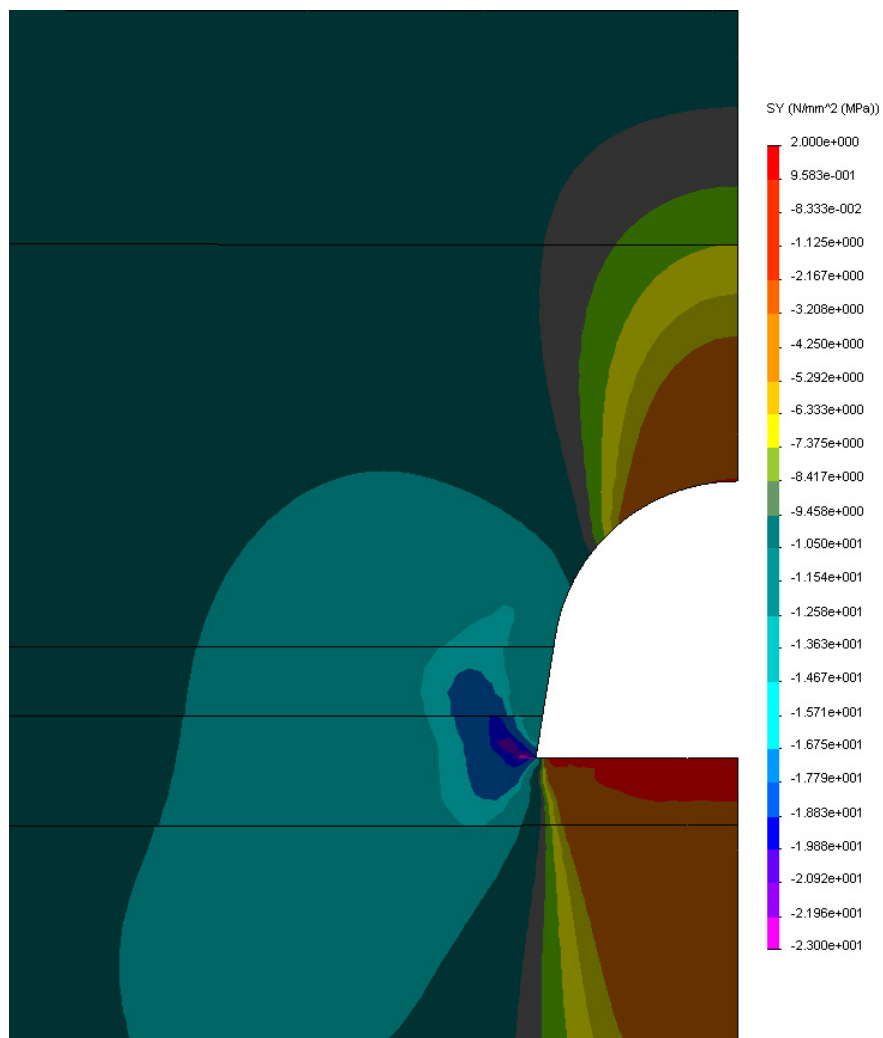


Рис. 5.1. Эпюра вертикальных напряжений σ_y для породного обнажения, соответствующего крепи КШПУ-15,0

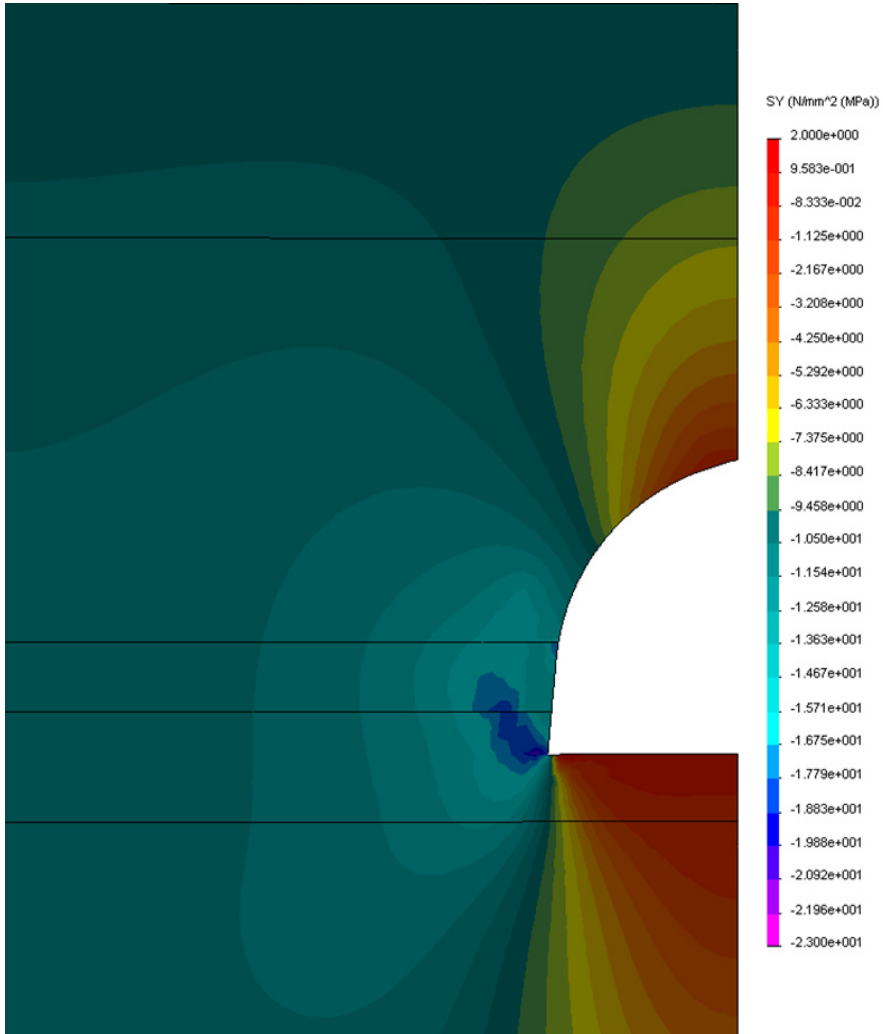


Рис. 5.2. Эпюра вертикальных напряжений σ_y для породного обнажения, соответствующего крепи КВТ-2-14,5

Таким образом, форма КВТ-2-14,5 позволяет сократить ширину зоны предельного состояния в непосредственной кровле на 16%, а в непосредственной почве – на 21,5%. Напомним, что именно в боках выработки наблюдается изгиб стойки (хотя и небольшой по величине) и две локальные области пластического состояния металла, а сокращение ширины зоны предельного состояния аргиллита примерно на 20% позволит снизить боковые нагрузки на стойки рамы.

В заключении анализа поля σ_y следует также отметить более высокую концентрацию σ_y (до 2,5 γH) для формы КШПУ-15,0, где также образуется область пластического состояния стали Ст.5.

Анализ эпюр горизонтальных напряжений σ_x для формы КШПУ-15,0 (рис. 5.3) и формы КВТ-2-14,5 (рис. 5.4) дал следующую информацию.

Четко прослеживается зона разгрузки в почве выработки, в основном аргиллита, и высокая вероятность перехода почти всего слоя в предельное состояние, интенсифицирующего развитие пучения, хотя и небольшого из-за малой мощности слоя. Различая в эпюре σ_x для непосредственной почвы выявились незначительные для формы КШПУ-15,0 и КВТ-2-14,5.

В боках выработки действуют растягивающие σ_x в непосредственной кровле и почве пласта и на большую величину – в угольном пласте, что обусловлено его изгибом в приконтурной зоне под воздействием опорного давления. Ширина зоны предельного состояния в угольном пласте составляет до 1,13 м для формы КШПУ-15,0 и до 0,93 м для формы КВТ-2-14,5, то есть разница составляет 17,7%. В непосредственной кровле и почве пласта ширина зоны предельного состояния невелика ($h_{\delta} = 0,2...0,4$ м).

В кровле выработки сжимающие напряжения σ_x несколько выше (до 10%) в локальных областях для формы КВТ-2-14,5 в сравнении с формой КШПУ-М-15,1, но уровень σ_x далек от разрушающей величины.

Эпюра приведенных напряжений σ для формы КШПУ-15,0 (рис. 5.5) и формы КВТ-2-14,5 (рис. 5.6) обобщает результаты исследований.

В кровле и почве выработки эпюры σ имеют несущественные отличия.

В боках выработки величина σ_{max} не приводит к разрушению угольного пласта, а в непосредственной кровле и почве максимальная ширина зоны разупрочнения составляет:

– в кровле для КШПУ-15,0 $h_{\delta} = 1,53$ м, для КВТ-2-14,5 $h_{\delta} = 1,21$ м; уменьшение на 20,9%;

– в почве для КШПУ-15,0 $h_{\delta} = 1,77$ м, для КВТ-2-14,5 $h_{\delta} = 1,73$ м; уменьшение на 2,3%.

По итогам анализа двух форм породных обнажений можно сделать следующие выводы:

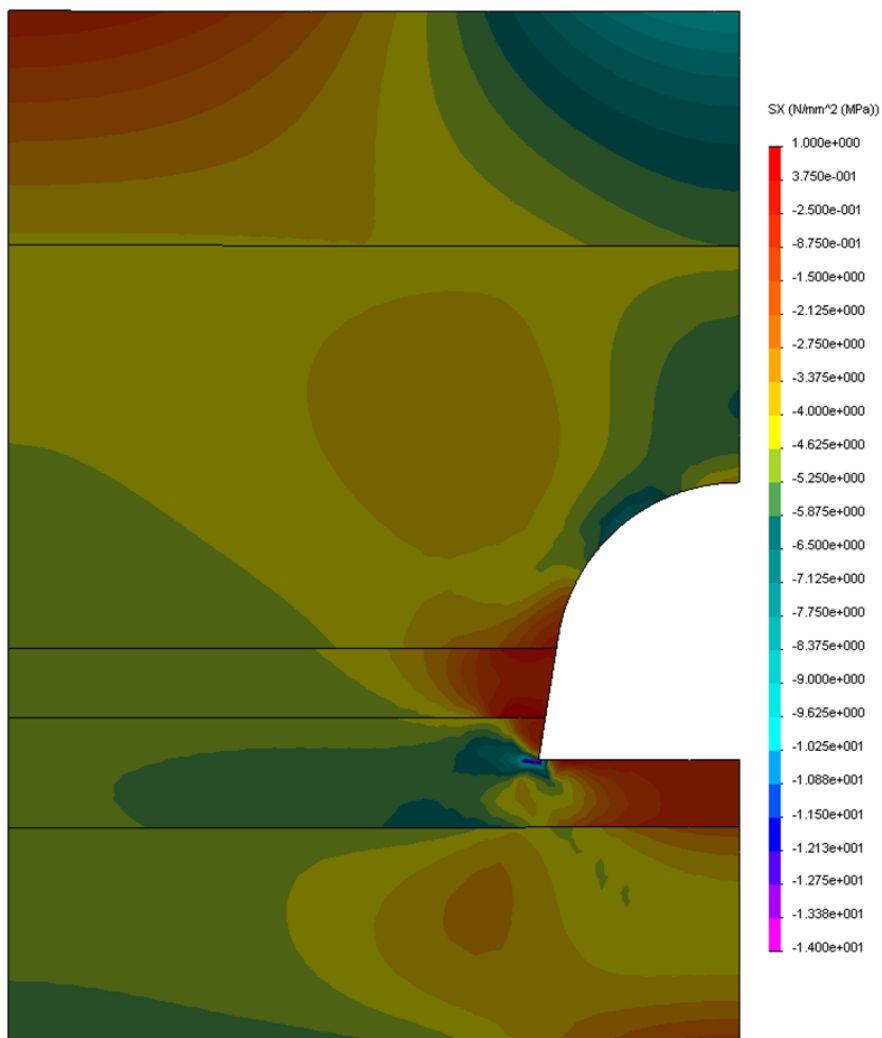


Рис. 5.3. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x для породного обнажения, соответствующего крепи КШПУ-15,0

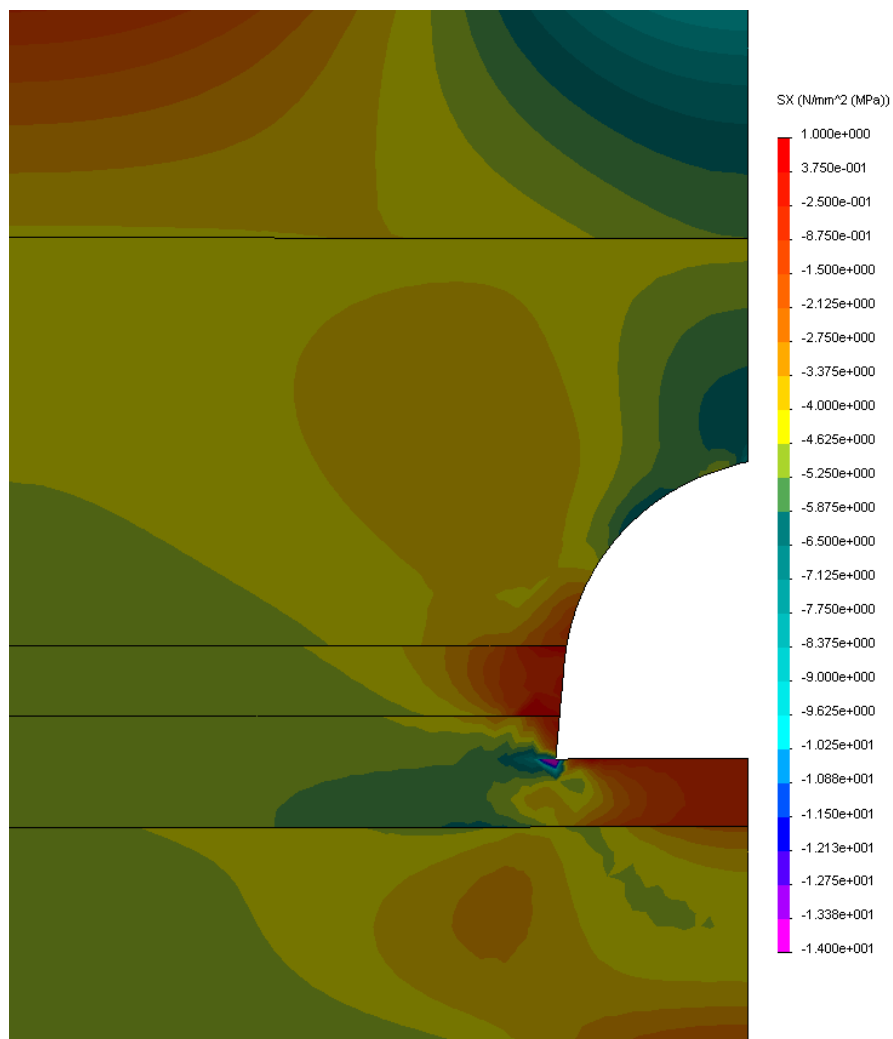


Рис. 5.4. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x для породного обнажения, соответствующего крепи КВТ-2-14,5

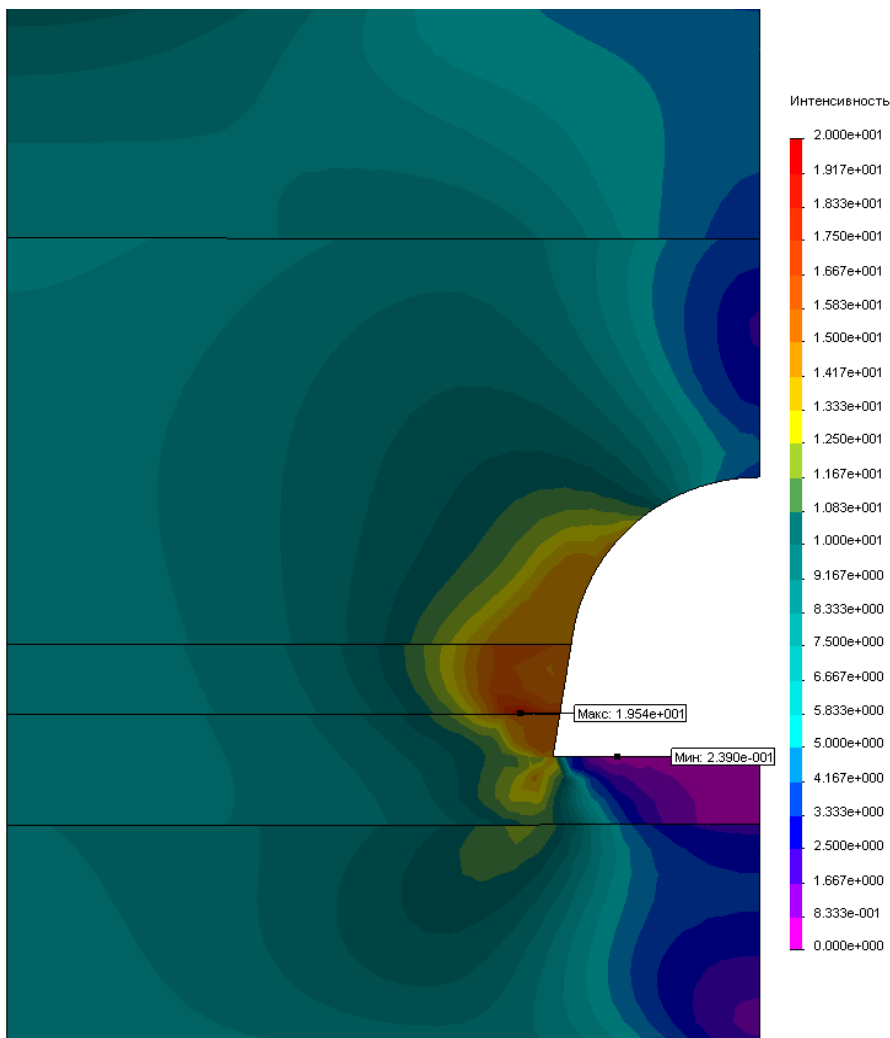


Рис. 5.5. Эпюра приведенных напряжений σ для породного обнажения, соответствующего крепи КШПУ-15,0

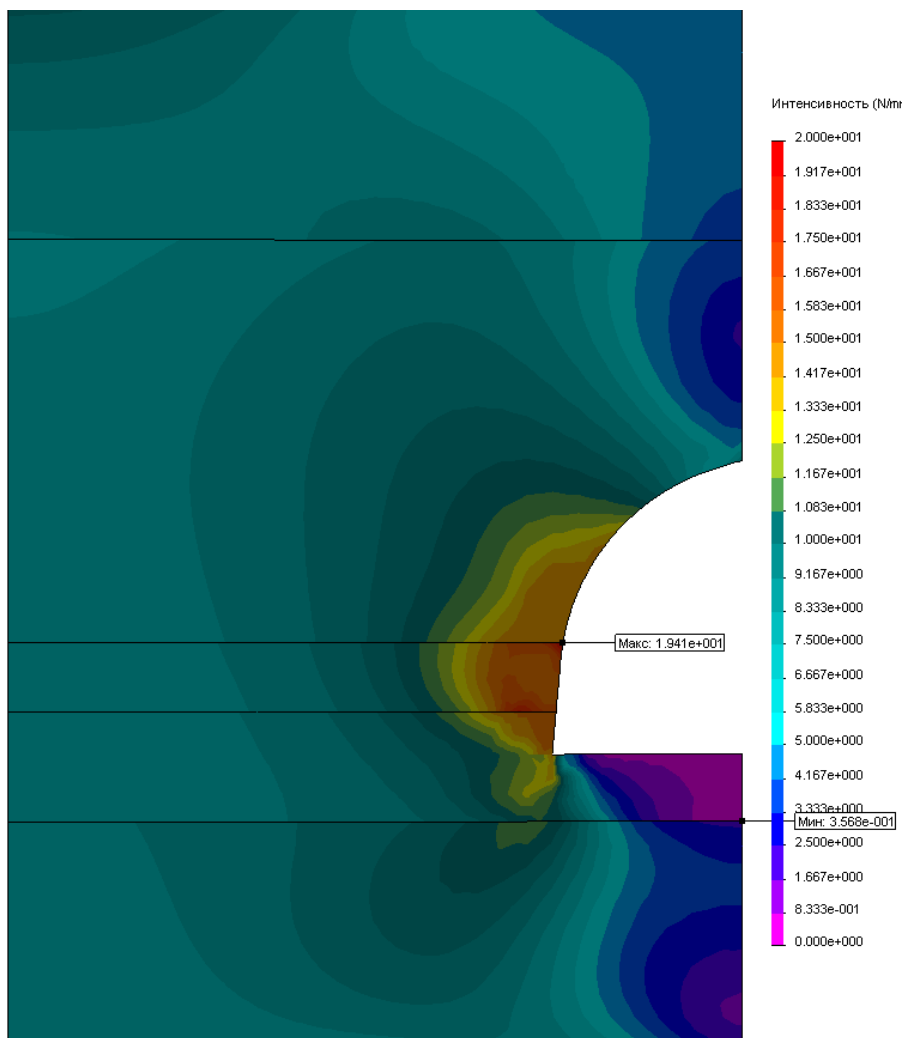


Рис. 5.6. Эпюра приведенных напряжений σ для породного обнажения, соответствующего крепи КВТ-2-14,5

– в кровле выработки за счет снижения интенсивности действия растягивающих вертикальных напряжений σ_y высота зоны предельного состояния уменьшается на 0,33 м для формы КВТ-2-14,5;

– в почве выработки разупрочняется только аргиллит небольшой мощности и разницу в сравниваемых формах породного обнажения можно оценить как несущественную;

– в боках выработки разупрочняются как угольный пласт от действия изгибных растягивающих σ_x , так и аргиллит непосредственной кровли и почвы пласта от действия сжимающих напряжений σ_y ; здесь ширина зоны разупрочнения меньше (порядка 20%) для формы КВТ-2-14,5;

– по причине наибольшей нагруженности стоек рам эффект позитивного влияния формы КВТ-2-14,5 в боках выработки можно использовать в перспективе для повышения устойчивости приконтурных пород в боках и, соответственно, стойки рамы; в комбинации с анкерным упрочнением боков (требуется дополнительных исследований) на проблемных участках выработки установка крепи КВТ-2-14,5 может дать положительный экономический эффект в части снижения металлоемкости рамной крепи.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ТИПА СВП РАМНОЙ КРЕПИ НА НДС СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ»

6.1. ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ КРЕПЛЕНИИ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Исследование закономерности влияния типа СВП рамной крепи КШПУ-15,0 на напряженно-деформированное состояние системы «слоистый массив-крепь выработки» было выполнено для обоснования ресурсосберегающего направления поддержания горных выработок на примере откаточного квершлага блока №3 шахты «Юбилейная». Проектными решениями принята к эксплуатации данная выработка сечением в свету до осадки $15,0 \text{ м}^2$ с крепью КШПУ-15,0, отталкиваясь от этих данных конкретизация задачи ресурсосбережения видится в снижении металлоемкости рамной крепи и, соответственно, трудозатрат на ее установку. Очевидно, металлоемкость рамной крепи на 1 погонный метр выработки в условиях упрочнения пород кровли анкерами можно снижать двумя путями: увеличивать шаг установки рам вдоль выработки или применять более легкие типы СВП.

Выбор наиболее целесообразного направления снижения металлоемкости крепи выполнен на основе современных представлений о механизме взаимодействия рамной податливой крепи с породным массивом и предварительных расчетов НДС системы «слоистый массив-крепь выработки».

Большинство ученых и специалистов едины в представлении о механизме взаимодействия рамной податливой крепи с окружающими породами, который достаточно адекватно сформулирован на базе обширных исследований последних десятилетий, как в аналитическом, так и экспериментальном плане. Основные результаты этих исследований заложены в руководящие нормативные документы по выбору и расчету крепи [52-54].

Развитие процесса взаимодействия податливой крепи с приконтурными породами наглядно представлено схематически двумя общепринятыми закономерностями, показанными на рис. 6.1. В первой половине XX века экспериментально было установлено, что податливая крепь воспринимает значительно меньшую нагрузку, чем жесткая в одних и тех же горно-геологических условиях. Теоретическое обоснование этого факта дано в начале второй половины XX века в работах Р. Феннера и А. Лабасса, где впервые раскрыта закономерность снижения нагрузки P на крепь с ростом величины U ее податливости. Эта закономерность (линия 1 на рис 6.1) названа рядом исследователей «деформационно-силовая характеристика приконтурного массива» и используется в современных руководящих документах

как обобщенный результат обширных экспериментальных и теоретических исследований. Но, если рассматривать закономерность 1 в отрыве от других геомеханических процессов в окрестности выработки, то напрашивается вывод, что при величине U_1 податливости крепи можно полностью избежать нагрузки на нее. В действительности ситуация обстоит иначе, поскольку действует противоположная тенденция роста нагрузки на крепь с увеличением ее податливости (линия 2 на рис. 6.1). Существование данной закономерности обусловлено тем, что с развитием перемещений породного контура выработки (увеличение податливости крепи) растут размеры зоны предельного состояния окружающих пород, которые при потере устойчивости создают своим весом нагрузку на крепь. Чем больше размеры зоны предельного состояния, тем большая нагрузка формируется на крепь при потере устойчивости близлежащего массива вследствие действия различного рода разупрочняющих факторов: трещиноватости, обводненности, реологии и т.д. Таким образом, избежать роста нагрузки на крепь в породах средней крепости, а тем более в слабых породах, практически не удастся. Действие двух взаимно противоположных закономерностей всегда генерирует минимум P_0 нагрузки (в математической постановке данного явления), которая соответствует точке пересечения линий 1 и 2. Поэтому рациональная деформационно-силовая характеристика крепи должна обязательно проходить не ниже точки с нагрузкой P_0 при податливости U_0 (линия 3 на рис. 6.1), что и служит основой в современных рекомендациях по выбору крепи (конечно, с некоторым запасом по величине несущей способности).

Теперь в свете указанных закономерностей проанализируем два направления снижения металлоемкости рамной крепи из спецпрофиля СВП. Увеличение шага установки рам от величины L_1 до величины L_2 неминуемо приведет к росту объемов неустойчивых пород, приходящихся на одну раму, и, соответственно, к росту нагрузки на крепь (рис. 6.2) от величины $(P_0)_1$ до величины $(P_0)_2$. Это, в свою очередь, увеличит напряжения в раме и может вызвать пластическое течение ее материала с потерей несущей способности. В руководящих нормативных документах принята линейная связь увеличения нагрузки на рамы с ростом шага их установки вдоль выработки. Предварительные расчеты НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» при переменном шаге L установки рам подтвердили рост напряжений в крепи при увеличении L . Применительно, например, к условиям проведения откаточного квершлага по пласту C_6 на шахте «Юбилейная» и закрепленного рамной и анкерной крепями по [38] следует отметить, что стойки рам уже находятся в состоянии, близком к пределу текучести стали Ст.5, и какое-либо увеличение шага установки L рам приведет к потере несущей способности. Увеличение же номера спецпрофиля от СВП-27 до СВП-33 не дает экономической выгоды, поскольку снижение металлоемкости от увеличения шага установки рам практически компенсируется повышением металлоемкости каждой рамы от

увеличения номера СВП. Также необходимо обратить внимание на устойчивость приконтурных пород в промежутках между рамами, где растет вероятность локальных вывалов с увеличением шага установки рам. Таким образом, направление ресурсосбережения в данном конкретном случае, связанное с увеличением шага установки рам вдоль выработки, не может быть признано целесообразным.

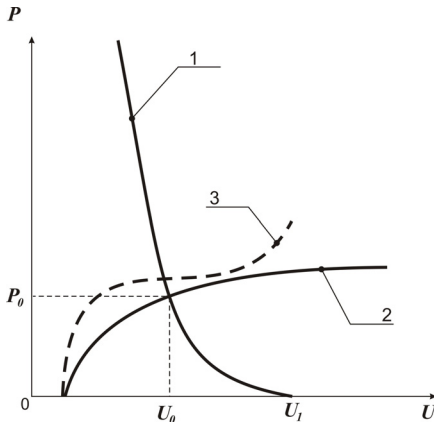


Рис. 6.1. Современная концепция выбора рациональной деформационно-силовой характеристики крепи (3): 1, 2 – деформационно-силовые характеристики породного массива и зоны предельного состояния приконтурных пород

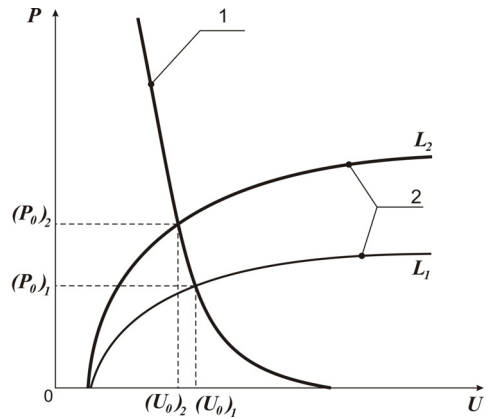


Рис. 6.2. К обоснованию ресурсосберегающего направления увеличения шага установки L рамной крепи: 1, 2 – деформационно-силовые характеристики породного массива и зоны предельного состояния приконтурных пород

Второе направление ресурсосбережения при креплении пластовой выработки рамной и анкерной крепями заключается в установке менее металлоемких рам из облегченных номеров СВП (например, вместо СВП-27 применить СВП-22 или СВП-19). В этой связи предварительное компьютерное моделирование выявило несущественное увеличение напряжений в раме при снижении номера СВП вплоть до СВП-19. Расчеты были проведены для разной структуры углевмещающей толщи, но показали постоянство результатов и потребовали геомеханического объяснения на основе современных представлений о действии двух закономерностей в формировании нагрузки на крепь. Крепь из СВП-27 имеет более высокую несущую способность (в сравнении, например, с СВП-19) как максимальную, так и в режиме податливости, поэтому ее деформационно-силовая характеристика (линия 3 для СВП-27 на рис. 6.3) пересекает линию 1 на уровне действия нагрузки P_{27} и равновесное состояние системы «слоистый массив-крепь выработки» устанавливается при податливости рамы величиной U_{27} . Менее металлоемкая рама из СВП-19 имеет более низкое сопротивление в податливом режиме,

который продлевается до величины U_{19} наступления равновесного состояния системы, при этом нагрузка на раму P_{19} оказывается меньше, чем P_{27} . Принимая во внимание «крутой» наклон линии 1 к оси U , происходит значительное снижение нагрузки P на раму при небольшом росте ее податливости U . Тогда рама из СВП-19, имеющая более низкий момент сопротивления поперечного сечения,

оказывается под влиянием меньшей нагрузки. В этой связи предварительные расчеты НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» установили такое соотношение снижения нагрузки на крепь и момента сопротивления поперечного сечения более легкого СВП, когда эти две тенденции практически компенсируют друг друга по критерию максимальной интенсивности компонент напряжений σ в раме. Таким образом, снижение номера СВП не приводит к существенному изменению НДС в рамной крепи, что является теоретическим обоснованием целесообразности данного направления снижения металлоемкости крепи и трудоемкости ее установки. Это положение было исследовано на геомеханических моделях с рамной и анкерной крепями для участка конвейерного квершлага блока №3 шахты «Юбилейная» при двух типах СВП рамы: СВП-27 и СВП-19.

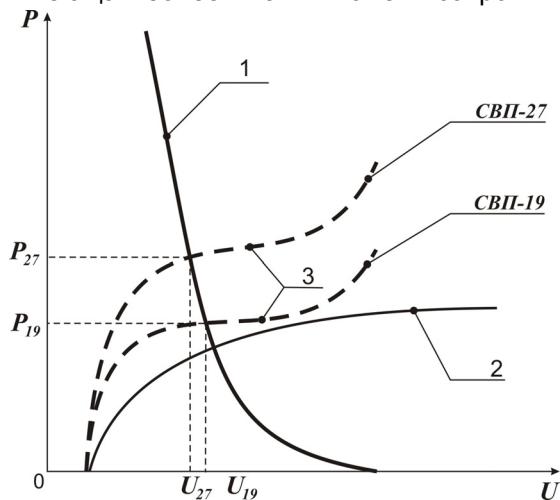


Рис. 6.3. К обоснованию ресурсосберегающего направления применения более легких номеров СВП для рамной крепи: 1, 2, 3 – деформационно-силовая характеристика породного массива, зоны предельного состояния приконтурных пород и податливой крепи, соответственно

6.2. КОРРЕКТИРОВКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Используя отработанную методику построения геомеханической модели были созданы две новые модели (для КШПУ-М-15,0 из СВП-27 и СВП-19) для участка откаточного квершлага блока №3, находящегося за Петропавловским сбросом. По данным близлежащих геологических скважин построена структура углевмещающей толщи пласта C_6 , которая включает (по мере роста глубины залегания) следующие породные слои и угольные пласты: алевролит мощностью 4,0 м; аргиллит мощностью 9,8 м; известняк мощностью 0,2 м; аргиллит

мощностью 5,5 м; пласт C_6^1 мощностью 0,3 м; алевролит мощностью 3,2 м; аргиллит мощностью 5,5 м; пласт C_6 мощностью 0,95 м; алевролит мощностью 1,55 м; песчаник 3,0 м; пласт C_5^3 мощностью 0,2 м; аргиллит мощностью 1,8 м; пласт C_5^2 мощностью 0,3 м; аргиллит мощностью 4,7 м; алевролит мощностью 4,0 м; пласт C_5^1 мощностью 0,3 м; алевролит мощностью 1,7 м; аргиллит мощностью 2,0 м; алевролит мощностью 2,0 м; аргиллит мощностью 2,85 м; пласт C_5 мощностью 0,5 м; аргиллит мощностью 10,65 м.

В соответствии с ранее выполненным тестированием размеры моделей по горизонтали составили 30 м, по вертикали – 63,4 м, что гарантирует исключение влияния граничных условий на НДС системы «слоистый массив-крепь выработки». По осевой координате Z смоделировано 10 рам, что является вполне достаточным для оценки НДС центральных рам.

Механические характеристики породных слоев и угольных пластов приняты в соответствии с таблицей 2.1.

Глубина расположения выработки по почве угольного пласта C_6 составляет $H = 362,3$ м.

Аналогично твердотельному моделированию предыдущих этапов построена выработка с крепью КШПУ-15,0 с межрамным ограждением из металлической сетки и установкой анкеров в кровле в соответствии с «Паспортом проведения и крепления...». Крепь КШПУ-15,0 имеет два варианта исполнения из спецпрофиля СВП-27 и СВП-19. Таким образом, применение облегченного спецпрофиля при постоянном шаге установки $L = 1$ м рам позволит снизить металлоемкость крепи порядка 30%.

6.3. АНАЛИЗ НДС ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ»

Сравнение двух вариантов рамной крепи с установкой анкеров в кровле выработки выполнено на основе анализа НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» по компонентам напряжений и полных перемещений с анализом поля напряжений попарно для рамы из СВП-27 и СВП-19 с целью выявления существенных отличий и объяснения причин их появления.

6.3.1. АНАЛИЗ ПОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ

В первую очередь проведено сравнение поля σ_y в приконтурном породном массиве, а затем в рамной крепи и анкерах; поскольку уровень напряжений в указанных элементах системы отличается как минимум на один порядок, то

применяются две цветовые шкалы σ_y , отдельно для приконтурных пород и отдельно для крепи с иллюстрацией двумя эпюрами для каждого типа СВП.

В непосредственной кровле выработки образуется зона разгрузки, напоминающая по форме свод естественного равновесия по проф. М.М. Протодьяконову (рис. 6.4 и 6.5). Размеры зоны предельного состояния пород обычно оценивается по условию начала появления растягивающих напряжений ($\sigma_y \approx 0$), которым любая горная порода, особенно слоистая и малой крепости, сопротивляется очень слабо. По указанному условию размеры области предельного состояния пород в непосредственной кровле практически одинаковы: для СВП-27 ширина – 2,02 м, высота – 0,43 м; для СВП-19 ширина – 2,09 м, высота – 0,44 м. Таким образом, при установке рамы из СВП-19 ширина зоны увеличивается всего на 3,5%, а высота – на 2,3%. В обоих вариантах наблюдаются весьма ограниченные области (до 0,2...0,3 м) действия растягивающих σ_y до 1 МПа в промежутках между соседними анкерами. Перечисленные выше факты позволяют утверждать о практически одинаковой эпюре распределения вертикальных напряжений σ_y в кровле, как в качественном, так и количественном плане.

В боках выработки сформирована зона опорного давления с повышенными сжимающими напряжениями σ_y , превышающими сопротивление сжатию аргиллита (13 МПа) в непосредственной кровле и алевролита (13,5 МПа) в непосредственной почве угольного пласта C_6 . Размеры этой зоны достаточно обширны и затрагивают по глубине весь слой алевролита в непосредственной почве (как для СВП-27, так и для СВП-19); высота зоны (от почвы выработки) составляет 2,48 м для СВП-27 и 2,54 м для СВП-19 (увеличение до 2,4%), ширина зоны распространения – до 2,04 м для СВП-27 и до 2,08 м для СВП-19 (увеличение до 2,0%).

Максимум σ_y до 20...25 МПа образуется в районе опоры стойки и имеет локальный характер. Таким образом, поле сжимающих напряжений σ_y в боках выработки практически идентично для обоих номеров спецпрофиля СВП.

В почве выработки располагается зона разгрузки, затрагивающая по глубине не только слой алевролита, но и нижележащего песчаника. Растягивающие напряжения σ_y до 3 МПа формируют зону неустойчивых пород в форме обратного свода естественного равновесия по всей мощности непосредственной почвы. Зона предельного состояния по критерию $\sigma_y \approx 0$ распространяется на всю ширину выработки, а по глубине составляет 2,13 м для СВП-27 и 2,17 м для СВП-19 (увеличение до 1,9%). Таким образом, и в почве выработки не наблюдаются сколь-нибудь существенных отличий эпюры σ_y для обоих вариантов СВП.

Теперь проанализируем эпюры σ_y в рамной крепи и анкерах для СВП-27 (рис. 6.6) и СВП-19 (рис. 6.7).

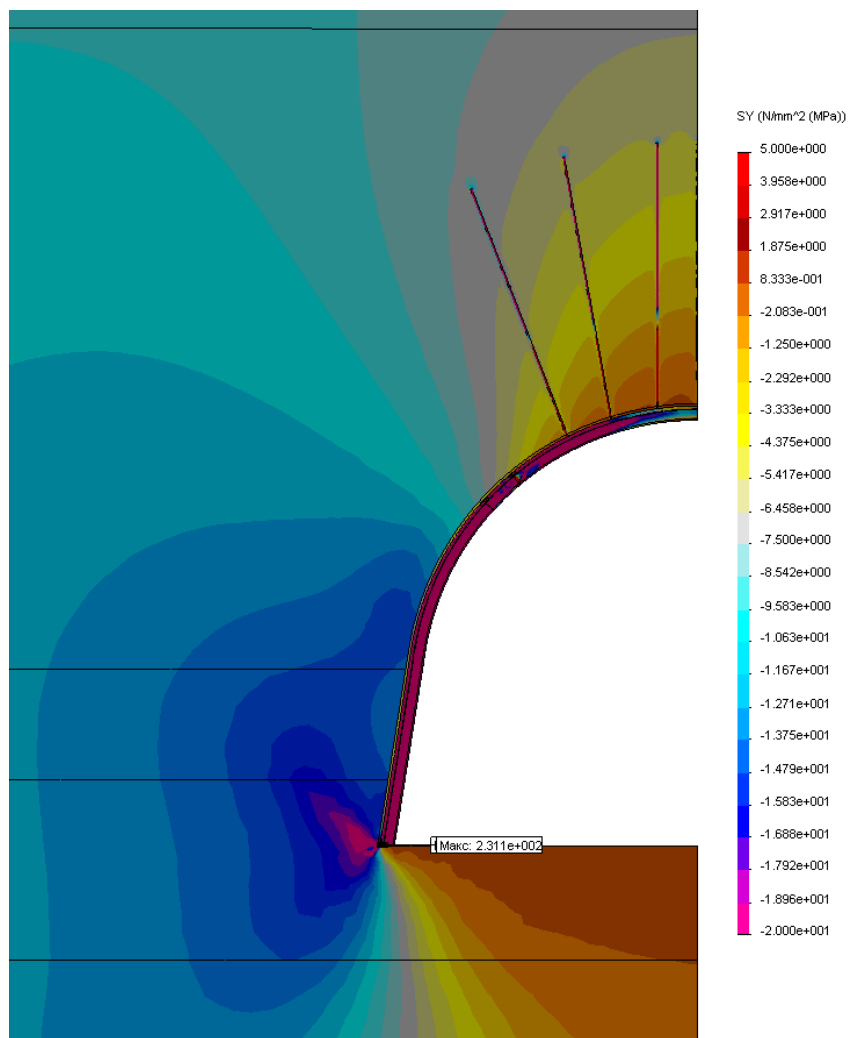


Рис. 6.4. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в системе «слоистый массив-крепь выработки» для варианта применения СВП-27

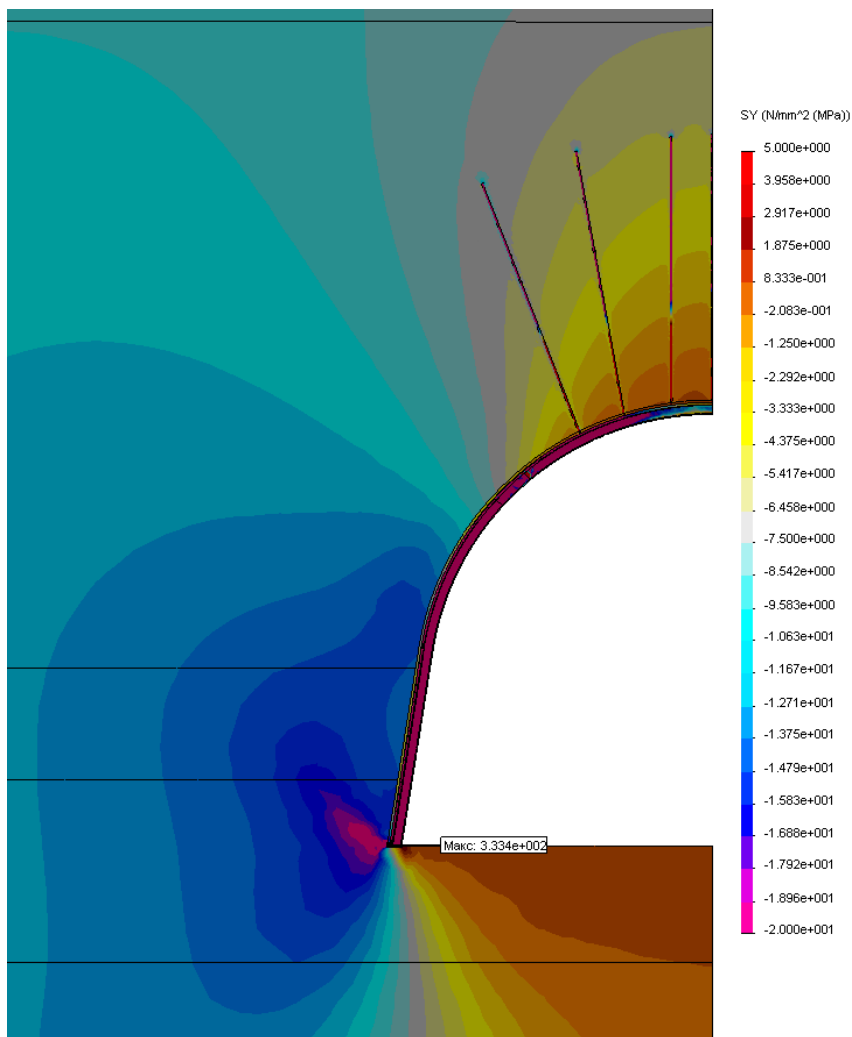


Рис. 6.5. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в системе «слоистый массив-крепь выработки» для варианта применения СВП-19

В верхняке рамы действуют пониженные сжимающие σ_y до 40...60 МПа с переходом в растягивающую область до 10 МПа только в районе замка свода. Эта картина (как в качественном, так и количественном плане) практически одинакова для обоих вариантов СВП и указывает на воздействие относительно небольшой нагрузки в кровле, обуславливающей устойчивое состояние верхняка.

Стойки рамы находятся под воздействием более высоких сжимающих напряжений σ_y : в районе замка податливости на длине до 0,8 м σ_y увеличиваются от 115 МПа до 240 МПа; далее в прямолинейной части стойки (район пяты свода) напряжения σ_y превышают предел текучести стали Ст.5 ($\sigma_T = 270$ МПа) достигая 280 МПа; в районе опоры стойки на высоте до 0,4 м напряжения σ_y снижаются до 150...240 МПа, а на контакте с подпятником снова возникает максимум $\sigma_y = 231,1$ МПа для СВП-27 и 333,4 МПа для СВП-19. Однако область действия контактных напряжений на торце стойки и подпятника весьма ограничена, и существенная разница σ_y объясняется гораздо меньшей площадью контакта для СВП-19. Данное существенное различие является единственным в эпюрах σ_y в рамной крепи, изготавливаемой из СВП-27 и СВП-19, а весь контур рамы находится практически в одинаковом напряженном состоянии по фактору действия вертикальных напряжений σ_y .

Аналогичный вывод можно сделать и при анализе σ_y в анкерной крепи. Здесь для обоих вариантов СВП четко прослеживается переход сжимающих напряжений $\sigma_y = 60...110$ МПа (в заглубленной части длины анкера) в растягивающие $\sigma_y = 0...50$ МПа в примыкающей к выработке части длины анкера. Этот факт указывает на сопротивление анкера перемещениям в полость выработки приконтурных пород, находящихся в предельном состоянии и полностью согласуется с существующими исследованиями анкерного упрочнения пород. Величина σ_y далека от предела текучести арматуры анкеров ($\sigma_T = 240$ МПа), что указывает на их устойчивое состояние от действия вертикальных напряжений σ_y .

Таким образом, по результатам сравнения эпюр σ_y для СВП-27 и СВП-19 можно достаточно обоснованно утверждать об их идентичности. Повышенные контактные напряжения на сопряжении торца стойки и подпятника не могут существенно повлиять на несущую способность рамы из СВП-19, а сама локальная пластическая зона самоуравновешивается за счет общеизвестного факта перераспределения нагрузки на упругие области при пластическом течении материала от действия локальных контактных напряжений.

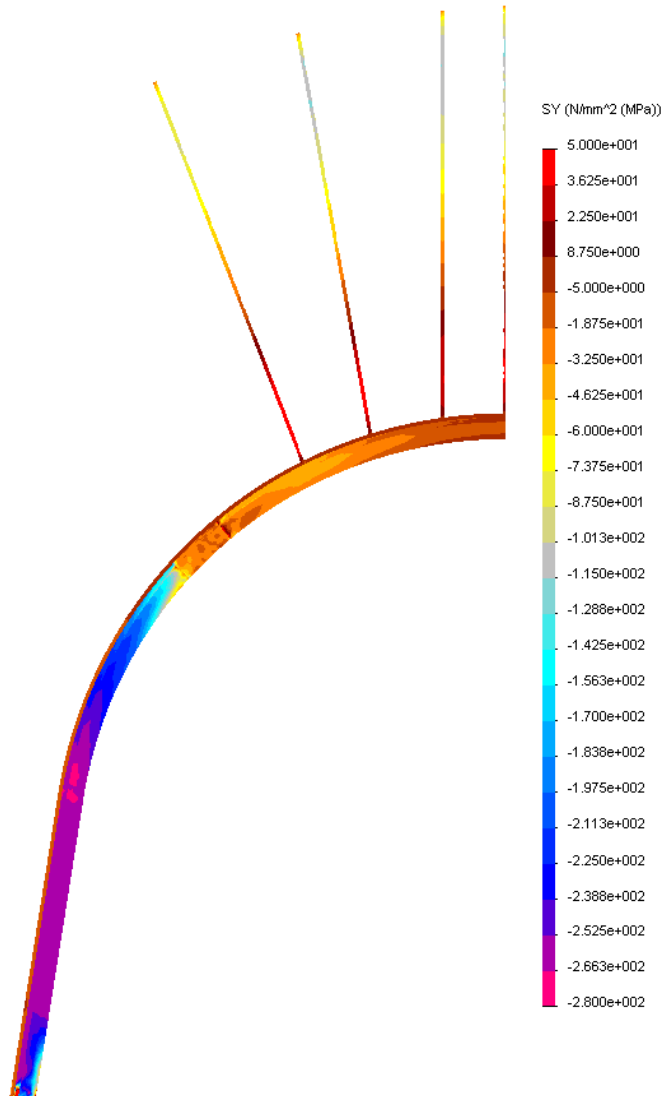


Рис. 6.6. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в рамной и анкерной крепях для варианта применения СВП-27

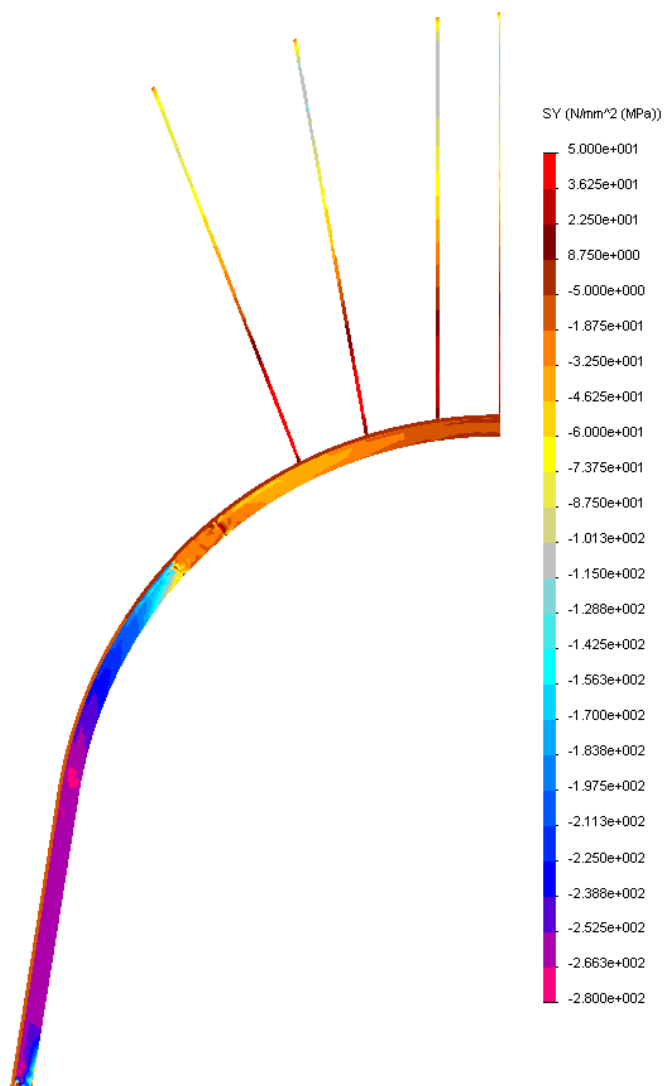


Рис. 6.7. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в рамной и анкерной крепях для варианта применения СВП-19

6.3.2. АНАЛИЗ ПОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ

Сравнительный анализ поля распределения горизонтальных напряжений σ_x в приконтурных породах при установке рам из СВП-27 (рис. 6.8) и СВП-19 (рис. 6.9) дал следующие результаты.

В кровле выработки образуется область повышенных сжимающих напряжений σ_x (с коэффициентом концентрации 1,3...1,9) по высоте на длину анкеров и ширине, немного превышающей расстояние между замками податливости. Но, величина σ_x гораздо ниже сопротивления сжатию пород непосредственной кровли, которые в целом находятся в устойчивом состоянии по фактору действия σ_x . Обращает внимание локальная концентрация σ_x в районе замка податливости, которая может быть объяснена процессом его срабатывания.

В боках выработки (преимущественно в угольном пласте C_6) по высоте до 2 м и шириной до 1 м располагается область разгрузки с диапазоном изменения σ_x от сжимающей величины 1 МПа до растягивающей величины 1 МПа. Растягивающие σ_x интенсифицируют область предельного состояния; однако из-за небольшой глубины этой области (до 1 м) не следует ожидать существенного развития пучения.

Все отмеченные особенности распределения σ_x в приконтурных породах практически одинаковы в качественном и количественном плане для рам из СВП-27 и СВП-19.

Особенности поля напряжений σ_x в рамной крепи сводятся к следующему. В верхняке действуют сжимающие σ_x от 90 МПа в районе замка податливости до 145...160 МПа в районе замка свода крепи (рис. 6.10). Для спецпрофиля СВП-19 (рис. 6.11) в центральной части свода в верхних волокнах сечения действуют повышенные $\sigma_x = 180...200$ МПа, что указывает на более интенсивное нагружение облегченного спецпрофиля со стороны кровли; однако уровень σ_x еще далек от предела текучести Ст.5 и верхняк находится в упругом состоянии. Наиболее разгруженным является замок податливости ($\sigma_x = 20...35$ МПа), как это и должно быть при его срабатывании. Верхняя (криволинейная) часть стойки находится под действием относительно небольших ($\sigma_x = 40...75$ МПа) сжимающих напряжений, а ее прямолинейный участок практически полностью разгружен с переходом небольших сжимающих σ_x в растягивающие до 20 МПа. Данное сочетание высоких σ_y и малых σ_x (противоположного знака) приводит к росту величины приведенных напряжений σ (или интенсивности напряжений σ), что способствует появле-

нию области пластического состояния материала в прямолинейной части стойки. В районе опоры формируется весьма ограниченная область действия контактных растягивающих $\sigma_x = 30...50$ МПа, которые также увеличивают приведенные напряжения σ и генерируют появление пластической зоны. Буквально точечный контакт торца стойки с подпятником вызывает появление максимума растягивающих напряжений $\sigma_x = 335,3$ МПа (СВП-27) и $\sigma_x = 252,2$ МПа (СВП-19). Здесь сталь Ст.5 находится на участке упрочнения и вполне может сопротивляться данным напряжениям; однако исключительно малый объем действия контактных максимумов способствует перераспределению нагрузки на упругие участки и существенно не сказывается на несущей способности рамы. В целом, за исключением увеличенных напряжений в центральной части верхняка в верхних волокнах поперечного сечения (СВП-19), поле σ_x имеет практически одинаковые качественные и количественные показатели для СВП-27 и СВП-19.

Анкера испытывают небольшие горизонтальные напряжения σ_x : в заглубленной части – преимущественно сжимающие до 20...35 МПа, в приконтурной – растягивающие до 15...20 МПа, что объясняется более интенсивным перемещением в полость выработки именно приконтурной части массива, а анкера сопротивляются этому процессу.

Таким образом, анализ распределения поля горизонтальных напряжений σ_x в системе «слоистый массив-крепь выработки» не выявил (за исключением некоторых весьма ограниченных областей) существенных различий для рам из спецпрофиля СВП-27 и СВП-19.

6.3.3. АНАЛИЗ ПОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ

Интегральной характеристикой НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» являются так называемые приведенные напряжения σ (для стали – интенсивность напряжений σ), по которым производится прочностной расчет в породе (в области действия сжимающих напряжений) и в крепи (в области как сжимающих, так и растягивающих напряжений). Поэтому представляется важным анализ различий в полях σ для СВП-27 (рис. 6.12) и СВП-19 (рис. 6.13).

В непосредственной кровле создается разгруженная зона с уровнем действия $\sigma = 2,5...7$ МПа, величина которых гораздо меньше предела прочности на сжатие аргиллита (13 МПа), что обуславливает достаточно устойчивое состояние кровли.

В боках выработки образуется зона повышенных напряжений ($\sigma = 12,5...16$ МПа) высотой до 3,2 м и шириной до 1,2 м. Эта зона по высоте

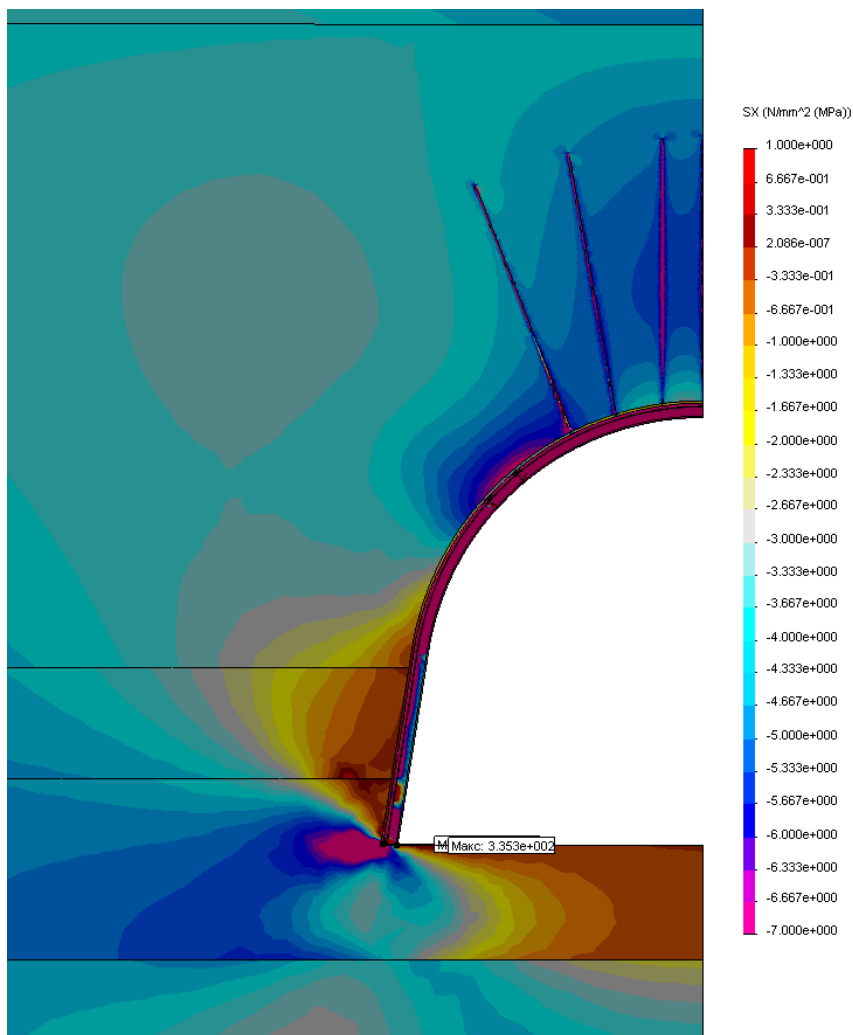


Рис. 6.8. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в системе «слоистый массив-крепь выработки» для варианта применения СВП-27

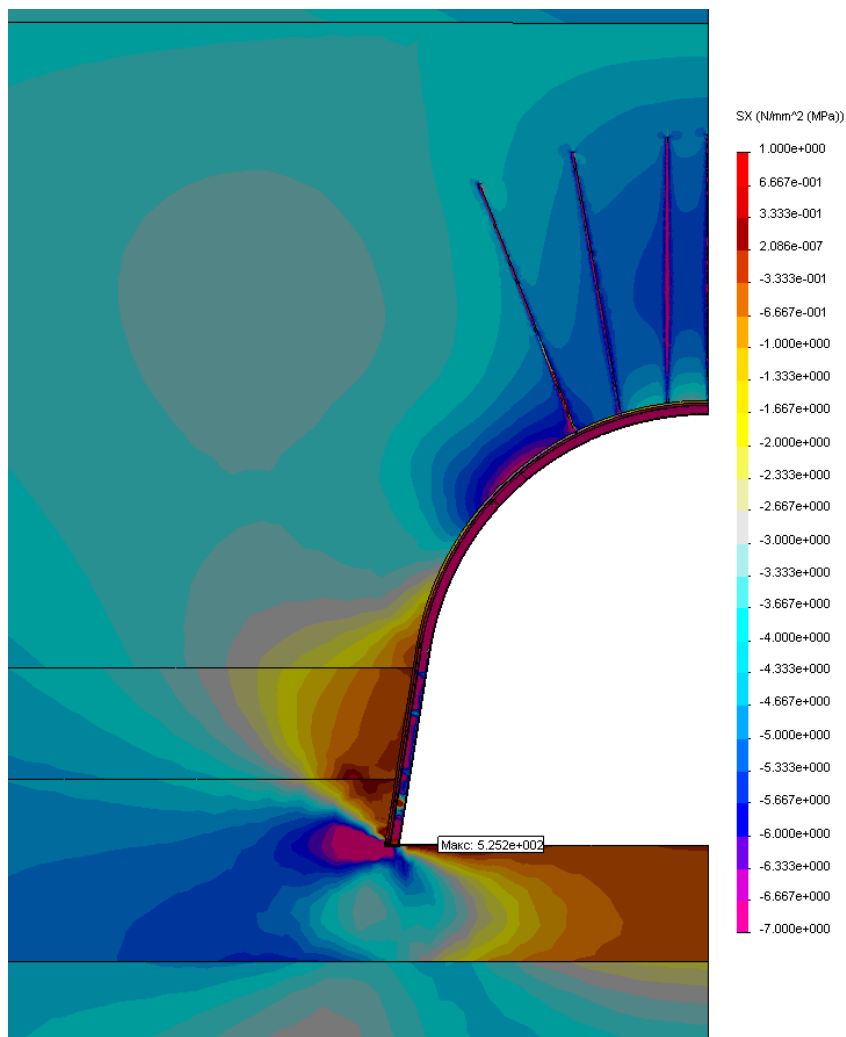


Рис. 6.9. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в системе «слоистый массив-крепь выработки» для варианта применения СВП-19

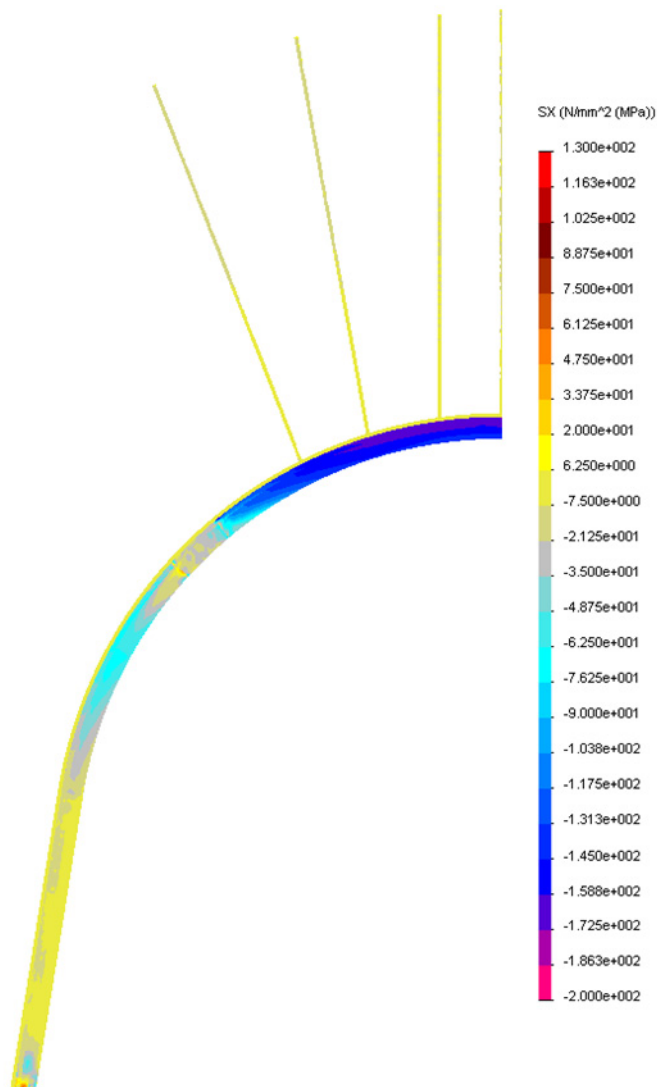


Рис. 6.10. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в рамной и анкерной крепях для варианта применения СВП-27

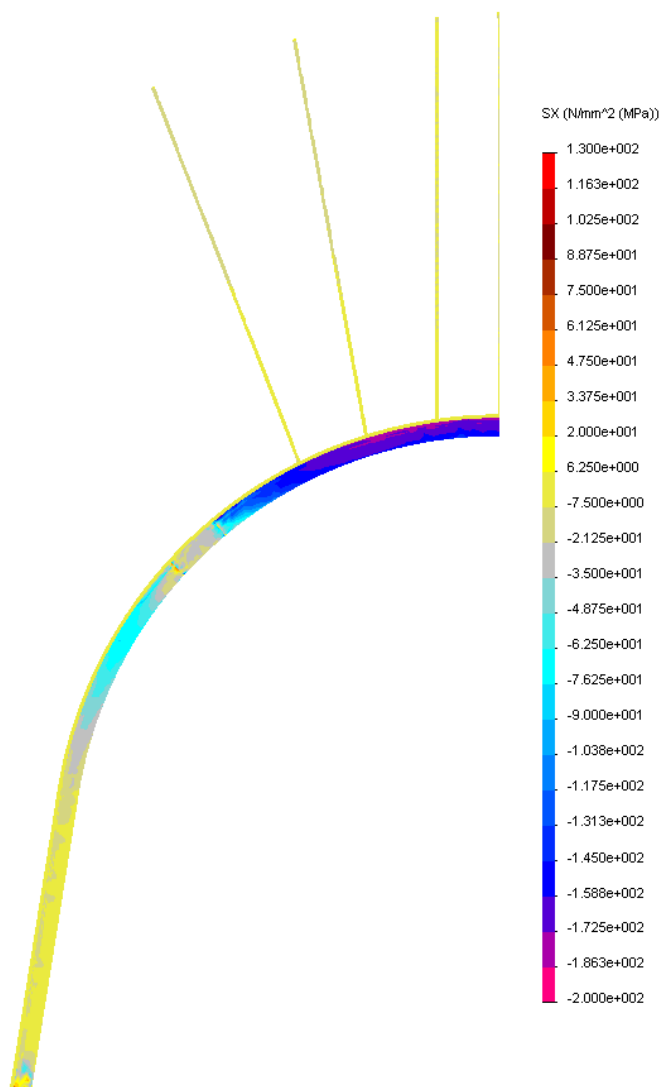


Рис. 6.11. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в рамной и анкерной крепях для варианта применения СВП-19

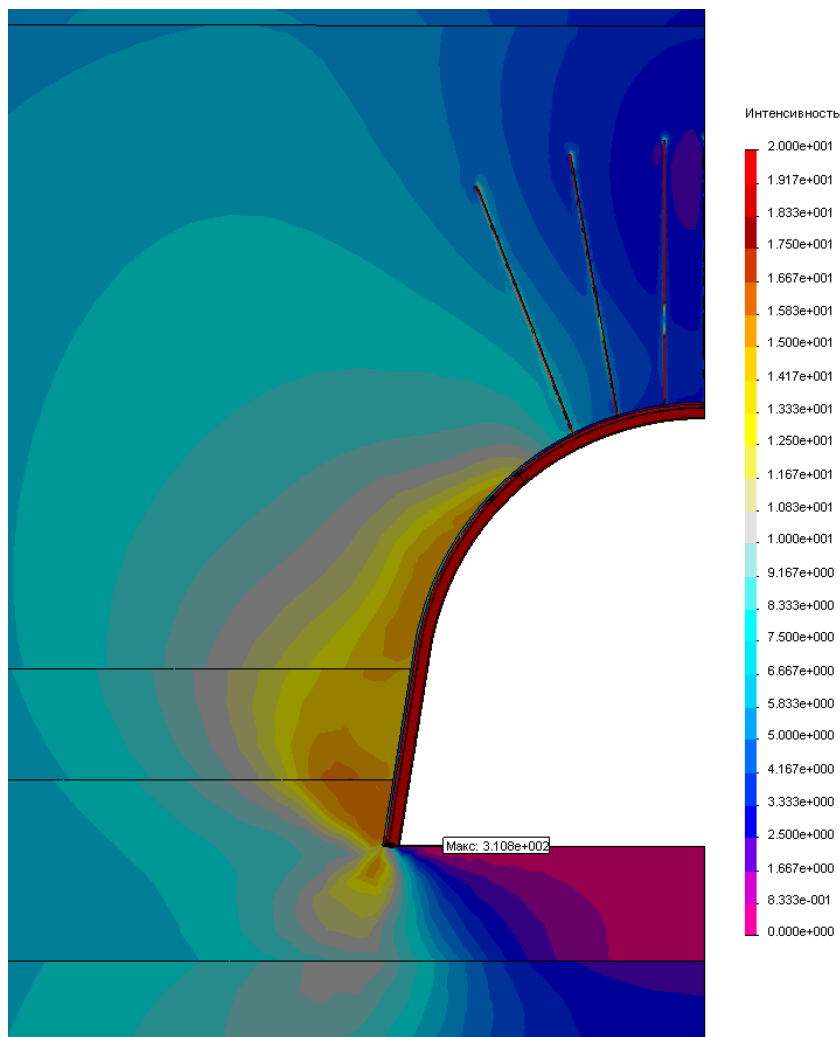


Рис. 6.12. Эпюра приведенных напряжений σ в системе «слоистый массив-крепь выработки» для варианта применения СВП-27

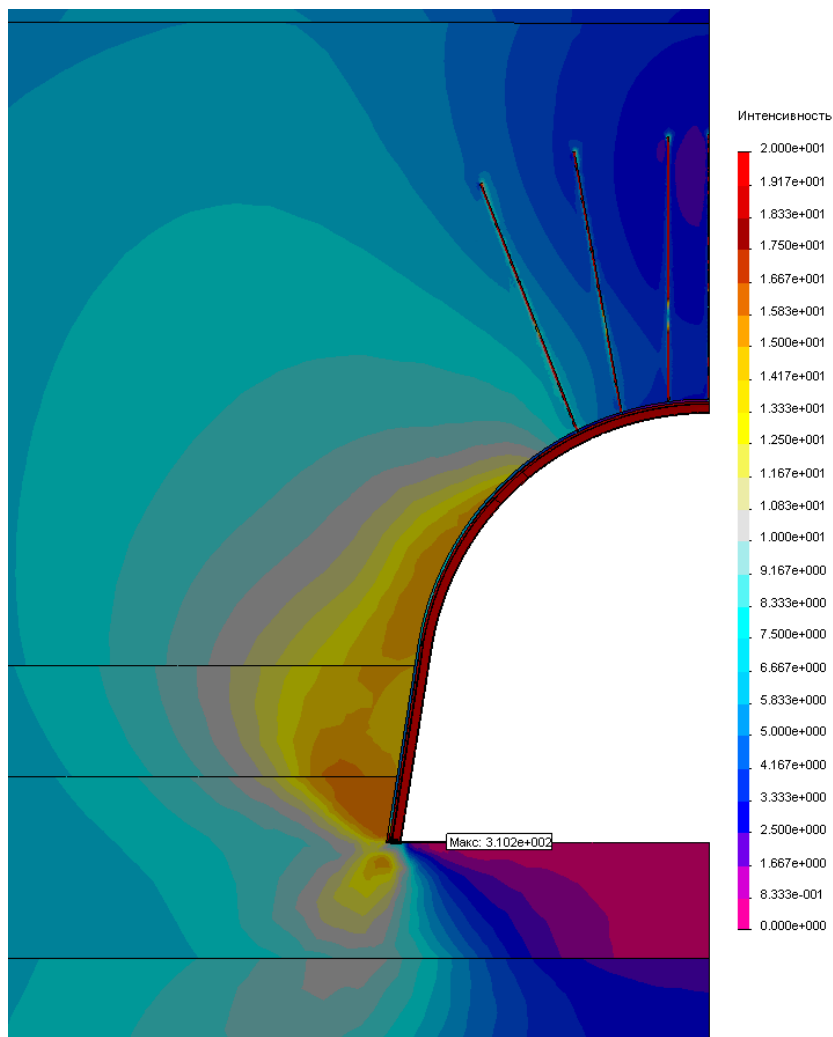


Рис. 6.13. Эпюра приведенных напряжений σ в системе «слоистый массив-крепь выработки» для варианта применения СВР-19

захватывает аргиллит непосредственной кровли ($\sigma_{сж} = 31,5$ МПа) и алевролит непосредственной почвы угольного пласта ($\sigma_{сж} = 13,5$ МПа). С учетом действия ослабляющих породу факторов можно однозначно утверждать, что в непосредственной кровле и почве (в боках выработки) будет происходить разупрочнение породы с формированием повышенной боковой нагрузки на стойки рамы, что и наблюдается отчасти в шахтных условиях. Отсюда следует вывод о целесообразности анкерного упрочнения боков выработки.

Непосредственная почва подвержена разупрочнению на всю мощность слоя алевролита, а залегающий ниже песчаник ограничивает проявление пучения почвы выработки, находясь в целостном допредельном состоянии.

Отличая в эпюрах σ приконтурных пород для рам из СВП-27 и СВП-19 практически не заметны: в непосредственной кровле и почве распределение σ одинаково, а размеры зоны повышенного горного давления в боках выработки увеличиваются по высоте на 1,1%, а по ширине – на 1,6%, что может быть признано несущественной разницей.

Поля напряжений σ в рамной крепи из спецпрофиля СВП-27 (рис. 6.14) и СВП-19 (рис. 6.15) весьма схожи друг с другом. В верхняке действуют напряжения в интервале $\sigma = 155...205$ МПа с появлением областей разгрузки в районе замка податливости ($\sigma = 90...130$ МПа) и нижних волокнах сечения рамы в районе замка свода ($\sigma = 140...155$ МПа); причем длина последнего участка несколько выше для СВП-27, что указывает на повышенное нагружение замка свода СВП-19, хотя уровень напряжений σ все равно остается ниже предела текучести Ст.5 в 1,5...1,9 раза. Замок податливости срабатывает на уровне $\sigma = 30...50$ МПа и выполняет свои функции регулятора нагрузки со стороны породного массива. Стойки рамы более нагружены $\sigma = 245...285$ МПа и на двух участках (пяты свода и опора стойки) материал находится в пластическом состоянии. Для более четкого выявления этих участков на рис. 6.16 (СВП-27) и рис. 6.17 (СВП-19) приведены только зоны пластического состояния стойки рамы. Примечательно, что размеры областей пластического состояния несколько больше в СВП-27, чем в СВП-19, что может быть объяснено повышенной жесткостью более тяжелого профиля. Этот факт также подтверждает абсолютный максимум σ_{max} в опоре стойки: $\sigma_{max} = 310,8$ МПа для СВП-27 и $\sigma_{max} = 310,2$ МПа для СВП-19 (снижение на 0,2%).

Полученные результаты говорят о необходимости усиления стоек рамы анкерной крепью с целью снижения σ в областях пластического состояния и их перехода в упругое состояние. Причем данное мероприятие более актуально для СВП-27, чем для СВП-19.

Арматура анкеров находится в упругом состоянии ($\sigma = 55...100$ МПа) за исключением небольшого участка, разделяющего заглубленную и приконтурную части длины анкеров; здесь возможно появление локальных пластических областей, так как $\sigma = 230...255$ МПа при пределе текучести арматуры $\sigma_T = 240$ МПа. Однако при пластическом удлинении арматуры анкера нагрузка на него падает, и анкер переходит в упругое состояние.

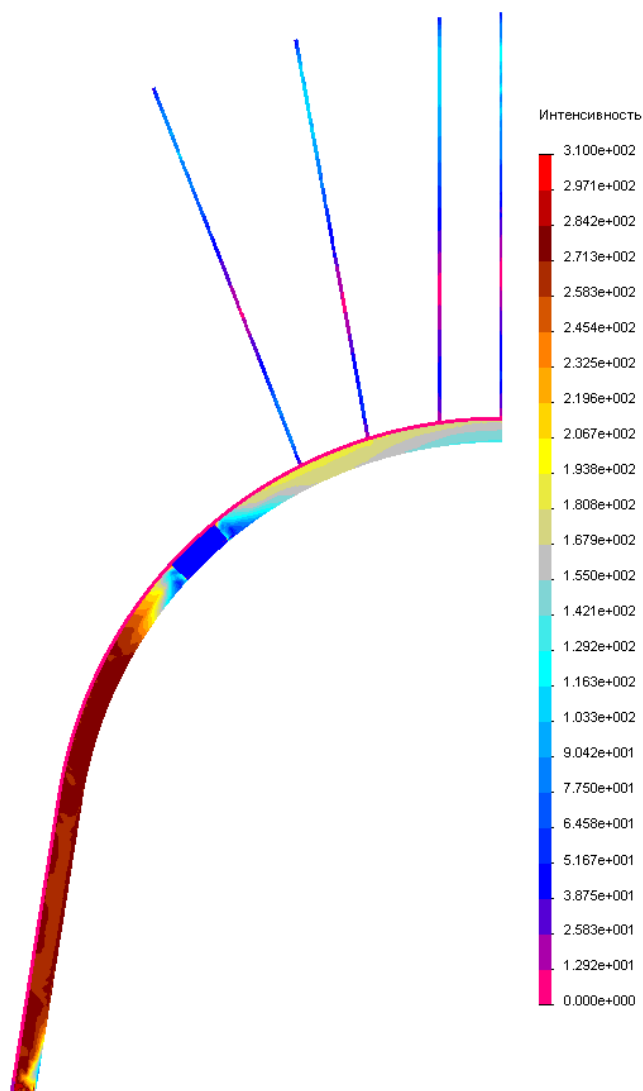


Рис. 6.14. Эпюры приведенных напряжений σ в рамной и анкерной креплениях для варианта применения СВП-27

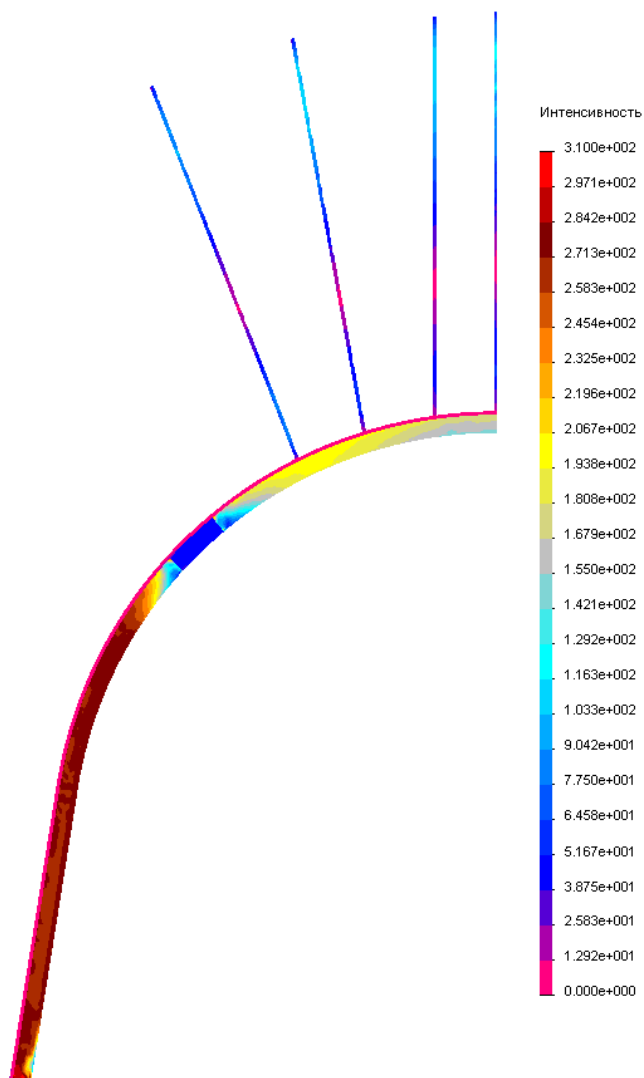


Рис. 6.15. Эпюры приведенных напряжений σ в рамной и анкерной крепях для варианта применения СВП-19

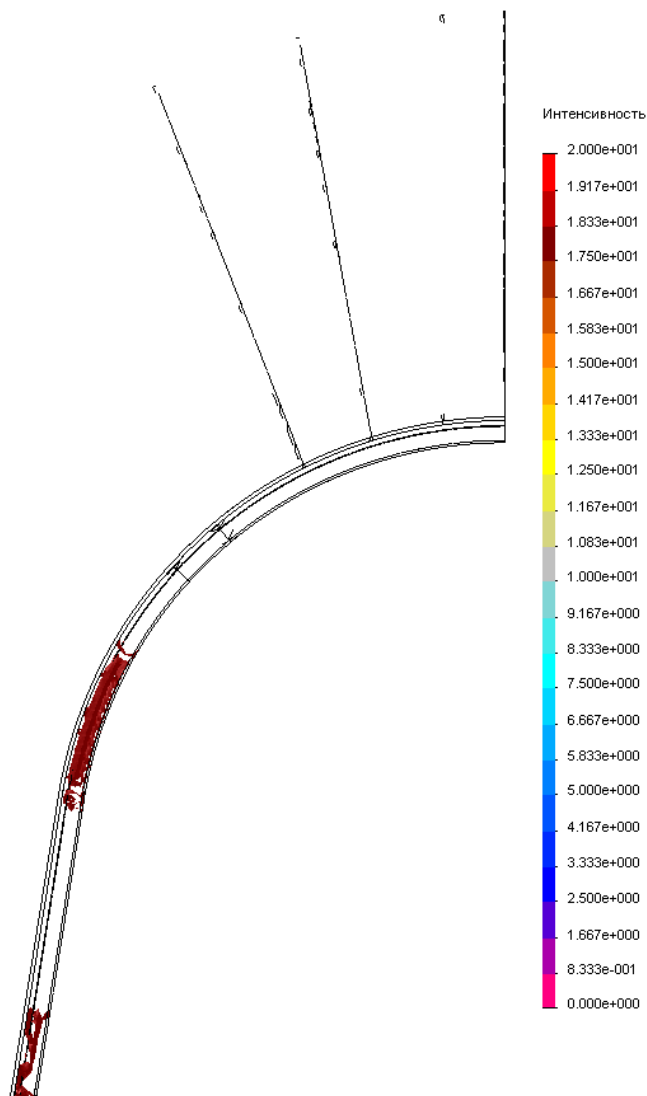


Рис. 6.16. Зоны пластических деформаций в рамной крепи из СВП-27

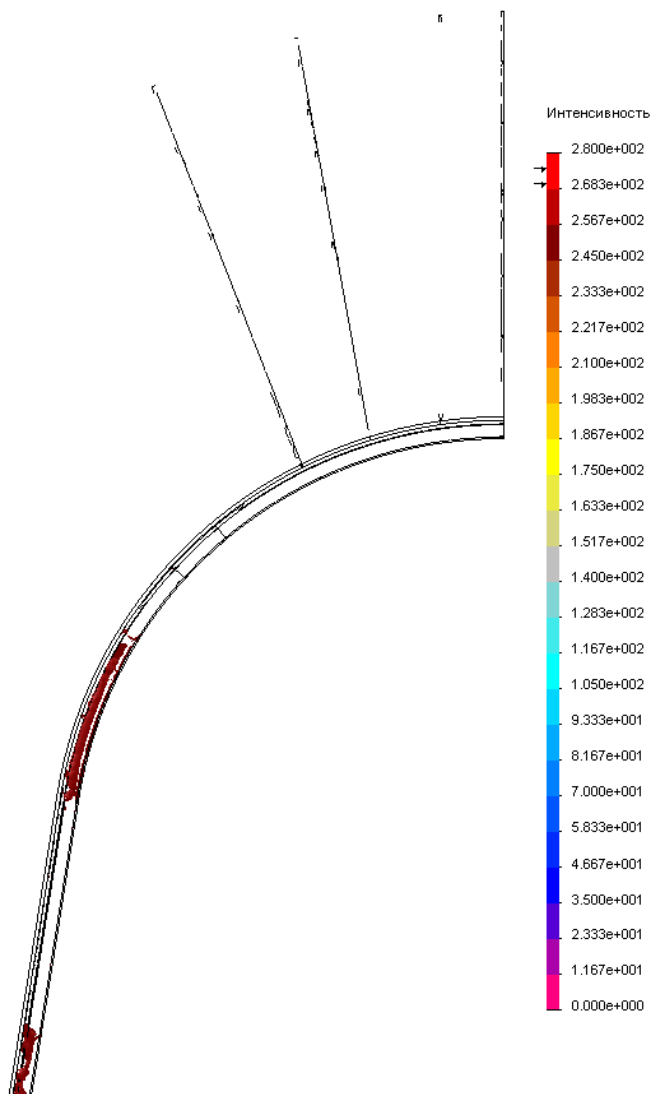


Рис. 6.17. Зоны пластических деформаций в рамной крепи из СВП-19

Металлическая сетка межрамного ограждения из-за прогиба породы между соседними рамами также находится в состоянии, близком к предельному.

В целом НДС в крепи (рама, анкера в кровле, межрамное ограждение) для спецпрофилей СВП-27 и СВП-19 отличается на относительно небольшую величину, что обосновывает возможность принятия технического решения по замене СВП-27 на СВП-22 и СВП-19 на экспериментальном участке пластовой выработки по пласту C_6 шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь».

Что касается перемещений рамы в полость выработки, то в кровле оно составляет до 25 мм для СВП-27 и до 27 мм для СВП-19 (увеличение на 8,0%), в боках перемещение до 14 мм для СВП-27 и до 16 мм для СВП-19 (увеличение на 14,3%). Таким образом, происходит незначительное увеличение перемещений рамы из СВП-19 по сравнению с СВП-27.

В целом по итогам анализа НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» можно считать целесообразным замену СВП-27 на СВП-22 и СВП-19 в рамной крепи в сочетании с анкерной при проектировании экспериментальных участков пластовых подготовительных выработок вне зоны влияния очистных работ на шахте «Юбилейная», проводимых по пласту C_6 .

ВЫВОДЫ

1. На базе существующих представлений о взаимодействии податливой крепи с приконтурным массивом обосновано ресурсосберегающее направление применения более легких типов СВП рамной крепи в сочетании с анкерами для крепления экспериментальных участков пластовых выработок блока №3 пласта C_6 на шахте «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь».

2. Анализ НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» установил малые различия (как правило, до нескольких процентов) в величинах компонент напряжений, особенно приведенных σ (по которым производится прочностной расчет), при установке рам из СВП-27 и СВП-19 в сочетании с анкерной крепью. Установка более легкого профиля позволяет сократить до 30% металлоемкость рам и в определенной степени трудоемкость их возведения.

3. В стойках рам образуются две области (в районах пяты свода и опоры стойки) пластического состояния металла независимо от номера СВП, для устранения которых необходимо предусматривать анкерное упрочнение боков выработки.

4. Размеры области разупрочнения пород в боках выработки, генерирующей боковое давление на крепь, указывают на необходимость применения анкеров длиной не менее 1,8 м. Для определения рациональной длины анкеров необходимо провести дополнительные исследования; то же касается выбора рационального количества анкеров, координат их установки в боках и кровле выработки и конструктивных схем взаимодействия элементов рамной и анкерной крепей, что предопределяет содержание последующих исследований.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ БОКОВЫХ АНКЕРОВ НА НДС СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ» ПРИ ОТСУТСТВИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ С РАМАМИ

Результаты предыдущих исследований однозначно указывают на целесообразность шахтных испытаний СВП-22 и СВП-19 в рамной крепи КШПУ-15,0 в сочетании с анкерным упрочнением пород кровли выработки. Однако по контуру рамы формируются два опасных участка пластического состояния стали Ст.5, располагающихся в стойках в районе пяты свода и их опоры. Поэтому для поддержания выработки в устойчивом состоянии на весь период ее эксплуатации необходимо произвести упрочнение боков выработки анкерами и усиление стоек рам. Таким образом, основная задача дальнейших исследований – обеспечение в данных горно-геологических условиях максимально возможного повышения устойчивости пластовой выработки на основе определения рациональных параметров установки анкерной крепи.

Основной критерий рациональности параметров установки анкерной крепи – предельно возможное снижение максимумов приведенных напряжений σ и (желательно) полное исключение образования зон пластического состояния отдельных участков в раме.

В первую очередь следует оценить эффективность паспорта проведения и крепления выработки [38], в котором предусмотрена установка в каждом боку выработки по два анкера длиной 1,5 м: верхний – на высоте 1,8 м от почвы, с углом наклона 10° в сторону кровли; нижний – на высоте 0,6 м, с углом наклона 10° в сторону почвы. Приведенный вариант установки боковых анкерной крепи (схема установки анкерной крепи в кровле остается неизменной) будем считать нулевым приближением в поиске рациональных параметров рамной и анкерной крепи. Дело в том, что решение поставленной задачи возможно только методом последовательных приближений параметров анкерного упрочнения к оптимальному варианту и здесь нулевое приближение является базой, отталкиваясь от которой осуществляется поиск более устойчивого состояния рамной крепи. Таким образом, последовательно шаг за шагом анализируется НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» и оценивается степень снижения (увеличения) приведенных напряжений σ в раме и, отталкиваясь от полученных результатов, планируется следующий вариант параметров установки анкерной крепи и опять производится расчет НДС системы. Такая методика, несмотря на ее громоздкость, основывается на ряде расчетов НДС системы с привлечением существующего опыта поддержания

выработок рамной и анкерной крепями с учетом конструктивно-технологических схем силовой взаимосвязи анкеров и рам, рекомендуемых на основе позитивного опыта их применения. Конечным результатом исследований (для разработки соответствующих рекомендаций) будет такой вариант параметров установки анкеров, при котором последующий расчет НДС уже не дает сколь-нибудь существенного снижения максимумов приведенных напряжений в раме.

В соответствии с «Паспортом проведения и крепления...» построена модель системы «слоистый массив-крепь выработки» с анкерным упрочнением боков выработки. При оценке эффективности данного технического решения производился попарный анализ каждой компоненты напряжений (рамная крепь изготовлена из СВП-19) и отыскивались отличия НДС системы по сравнению с вариантом отсутствия анкеров в боках выработки (см. главу 6).

Эпюра вертикальных напряжений σ_y при анкерном упрочнении боковых пород приведена на рис. 7.1 и сравнивалась с эпюрой σ_y для варианта отсутствия анкеров в боках выработки (см. рис. 6.5). Анализ σ_y в приконтурных породах кровли показал практически полное соответствие двух указанных эпюр: высота и ширина зоны предельного состояния породы ($\sigma_y \approx 0$) имеют одинаковые значения – 0,44 и 2,09 м соответственно.

В боках выработки в зоне опорного давления область предельного состояния ($\sigma_y \geq \sigma_{сж}$) распространилась на высоту 2,54 м от почвы выработки, а при установке боковых анкеров она снизилась до 2,46 м (уменьшение всего на 3,3%); ширина области предельного состояния уменьшилась от 2,08 до 2,07 м (при установке боковых анкеров), то есть всего на 0,5%. Аналогичная картина практически полного отсутствия влияния боковых анкеров на НДС системы наблюдается и в непосредственной почве пластовой выработки.

Единственная область, где прослеживается влияние боковых анкеров – приконтурные породы в районе опоры стойки и участок контакта стойки с подпятником. Здесь в приконтурных породах область концентрации $\sigma_y = 20...25$ МПа увеличивается по ширине с 0,53 до 0,71 м, то есть на 34%; максимум контактных напряжений σ_y в опорах стоек снизился с 333,4 до 303,6 МПа или на 9,8%.

В рамной крепи, установка боковых анкеров (рис. 7.2) практически не влияет на поле σ_y , что наглядно иллюстрируется сравнением с вариантом отсутствия боковых анкеров (см. рис. 6.7). Что касается самих боковых анкеров, то арматура нижнего анкера наименее нагружена сжимающими σ_y в интервале 20...35 МПа, а верхний анкер находится под действием растягивающих σ_y до 20 МПа с переходом в небольшие сжимающие до 5 МПа. В свете того, что анкер призван сопротивляться перемещению приконтурных

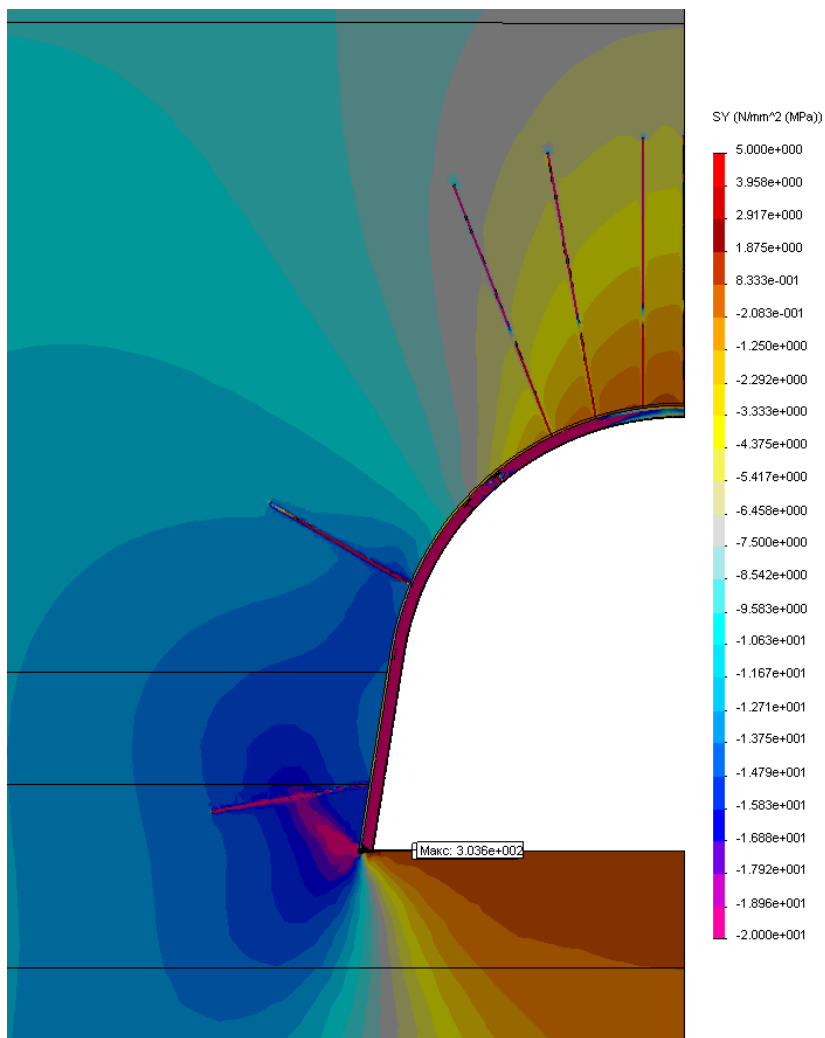


Рис. 7.1. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в приконтурном породном массиве выработки при установке анкеров в боках выработки по базовому варианту

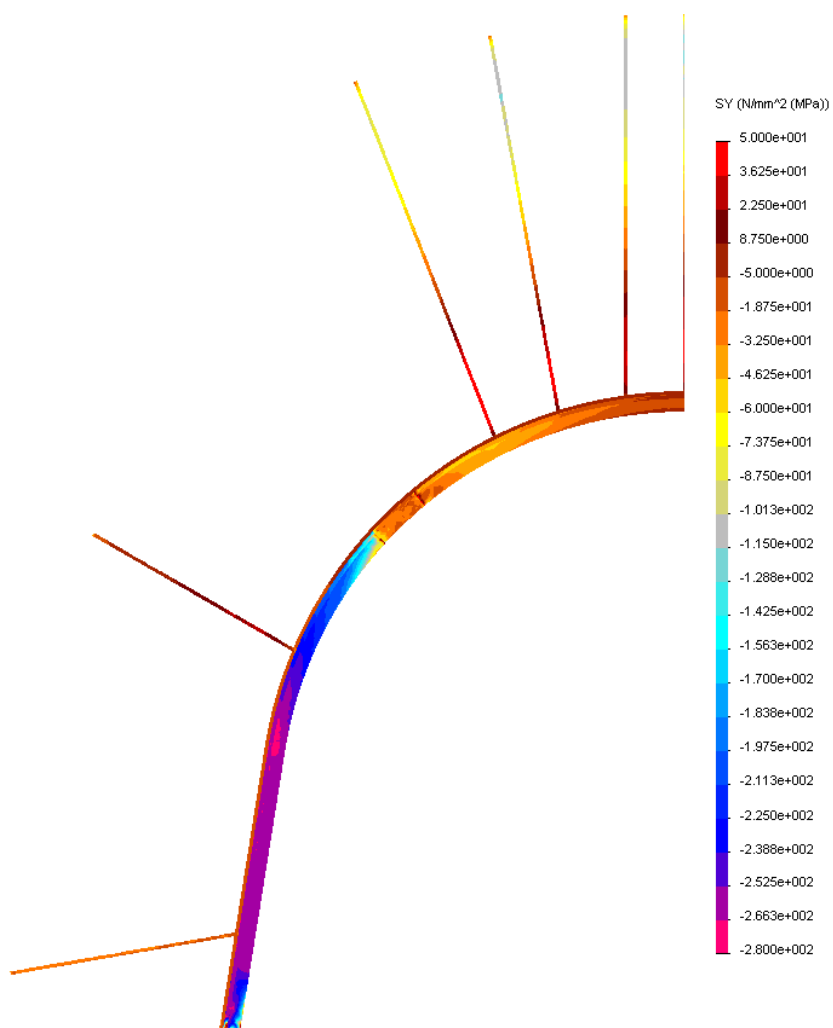


Рис. 7.2. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в крепи при установке анкеров в боках выработки по базовому варианту

пород в полость выработки, его арматура подвержена растяжению и воздействию сжимающих σ_y , снижает несущую способность анкера, так как интенсифицирует рост приведенных напряжений σ .

Сравнение эпюр горизонтальных напряжений σ_x в приконтурных породах (рис. 7.3) и крепи (рис. 7.4) при установке боковых анкеров с вариантом отсутствия последних (см. рис. 6.9 и рис. 6.11) показало их практическую идентичность при наличии некоторых исключений. Наиболее существенные отличия наблюдаются на сопряжении торца стойки с подпятником, где максимум σ_x снижается с 525,2 до 372,8 МПа, то есть на 41%. Область распространения сжимающих $\sigma_x = 40...75$ МПа в криволинейной части стойки увеличилась на 12%. Арматура боковых анкеров находится под действием растягивающих σ_x (значит, анкера сопротивляются боковым перемещениям приконтурных пород); однако их величина от 10 МПа на заглубленном конце до 90 МПа на остальной части длины указывает на недостаточную реакцию сопротивления (предел текучести арматуры $\sigma_T = 240$ МПа) и, соответственно, пониженный эффект упрочняющего действия анкеров.

Анализ приведенных напряжений σ в системе «слоистый массив-крепь выработки» подтверждает практически полное соответствие друг другу эпюр σ в приконтурных породах кровли, боков и почвы для вариантов установки (рис. 7.5) и отсутствия (см. рис. 6.13) боковых анкеров. В самой рамной крепи (рис. 7.6) и (см. рис. 6.15) отличия поля σ также несущественны: максимум σ_{max} на контакте опоры стойки с подпятником даже увеличивается на 0,3% – с 310,2 до 311,2 МПа.

В арматуре боковых анкеров $\sigma = 25...155$ МПа действует в заглубленной части их длины, а $\sigma = 50...140$ МПа – в приконтурной части. Максимум σ располагается в срединной части длины анкеров, но верхний анкер находится в упругом состоянии (σ_{max} до 210 МПа), а в центральной части нижнего анкера появляется область пластического состояния, так как $\sigma_{max} = 200...260$ МПа и в отдельных локальных областях превышают предел текучести арматуры. Таким образом, по фактору приведенных напряжений σ , нижний анкер работает по максимуму своих возможностей, а верхний несколько недогружен. Тем не менее, основное назначение боковых анкеров (в рассматриваемой конструктивной схеме крепи) – сопротивление боковым перемещениям приконтурных пород реализуется далеко не полностью: $(\sigma_x)_{max} \leq 90$ МПа.

Установленные факты подтверждаются и стабильностью размеров пластической зоны в стойках рамы (рис. 7.7 и см. рис. 6.17), составляющих в пяте свода 0,93 м и районе опоры стойки 0,41 м независимо от наличия боковых анкеров.

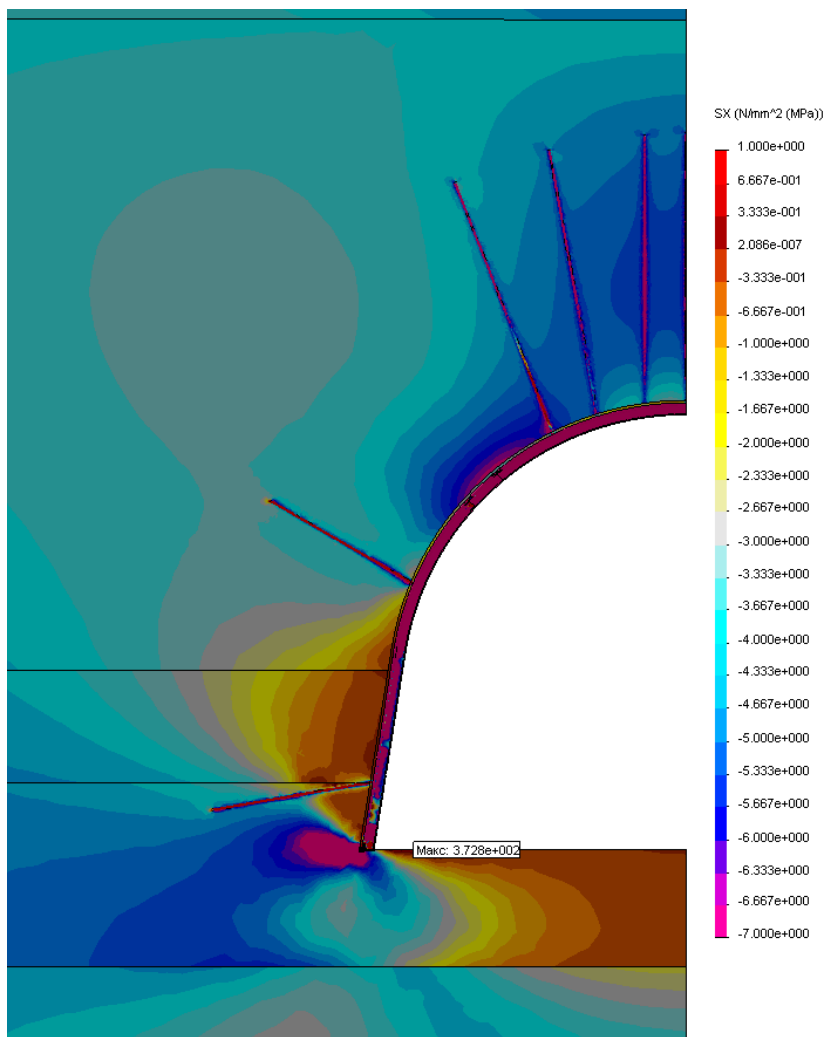


Рис. 7.3. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в приконтурном породном массиве выработки при установке анкеров в боках выработки по базовому варианту

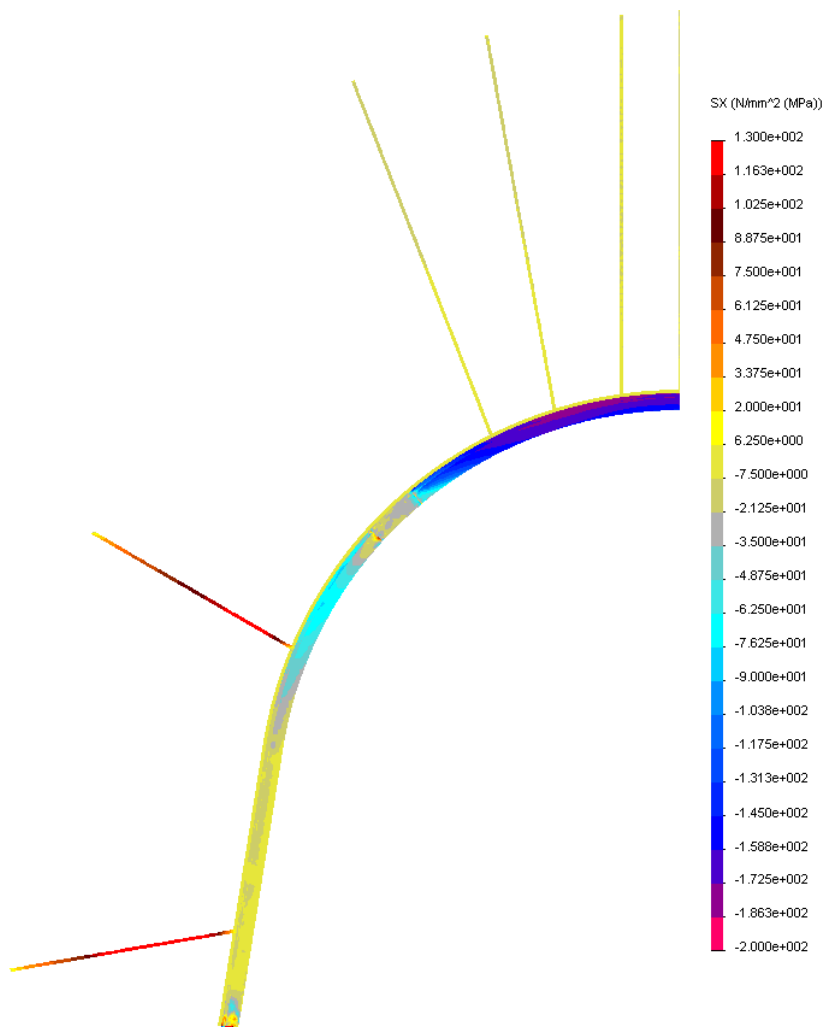


Рис. 7.4. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в крепи при установке анкеров в боках выработки по базовому варианту

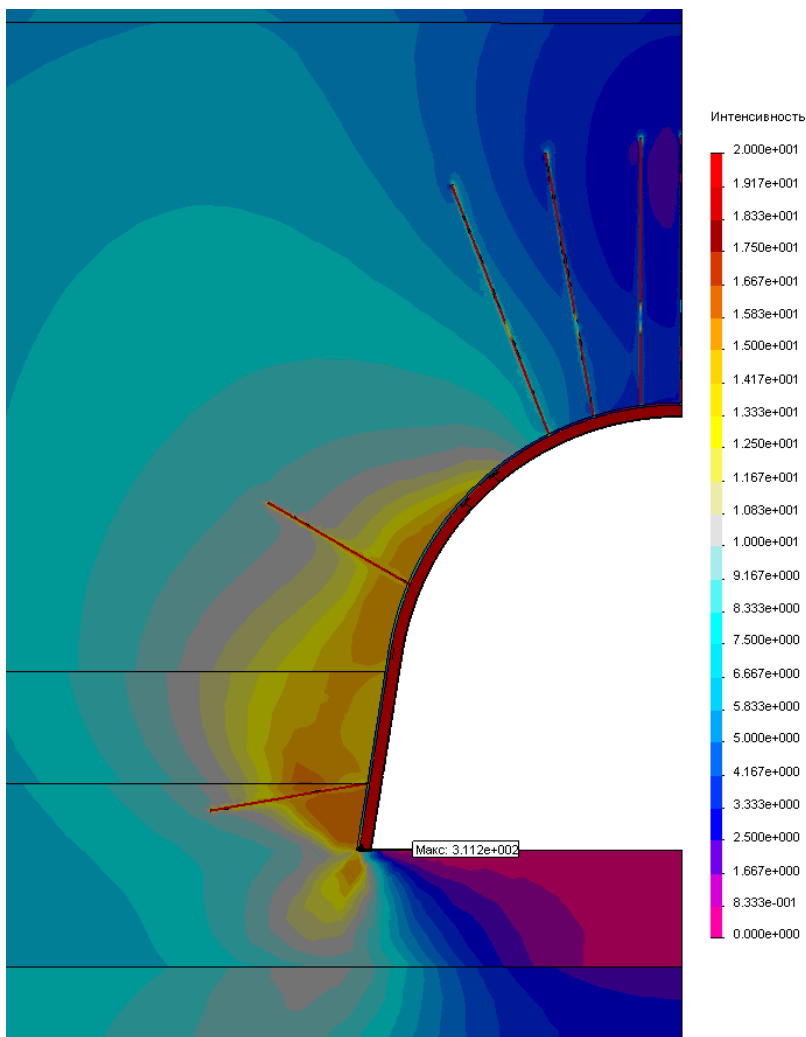


Рис. 7.5. Эпюра приведенных напряжений σ в приконтурном породном массиве выработки при установке анкеров в боках выработки по базовому варианту

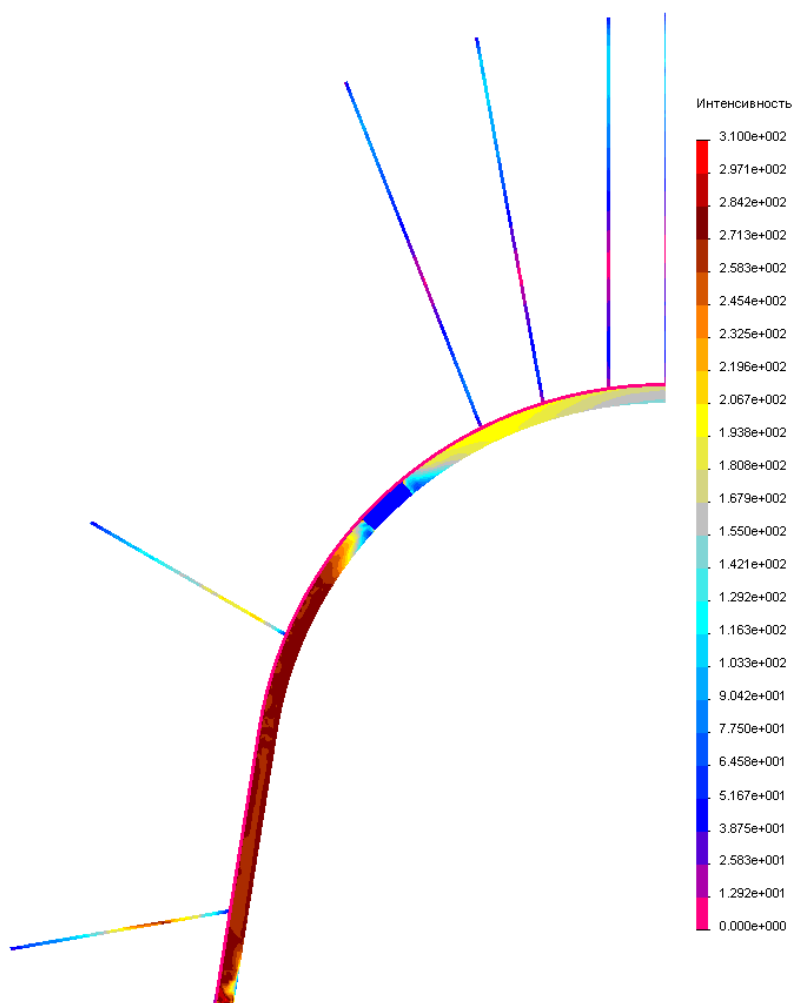


Рис. 7.6. Эпюра приведенных напряжений σ крепи при установке анкеров в боках выработки по базовому варианту

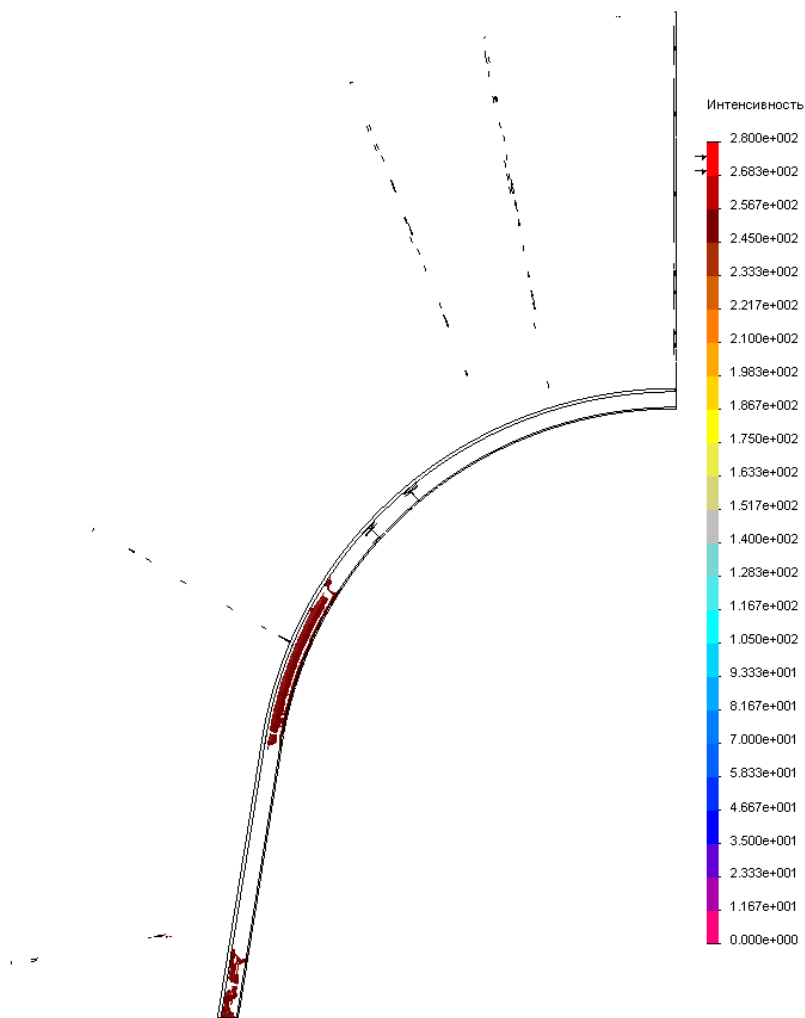


Рис. 7.7. Области пластического состояния в рамной крепи при установке анкеров в боках выработки по базовому варианту

Подытоживая результаты анализа НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» при схеме установки анкеров по [38] следует сделать неутешительный вывод о том, что установка боковых анкеров не способствует в рассмотренных горно-геологических условиях существенному ограничению областей пластического состояния материала в стойках рамы.

ВЫВОДЫ

1. Выработанная методология поиска рациональных параметров рамно-анкерной крепи пластовых выработок предусматривает последовательное приближение вариантов расчета НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» к условию минимальных значений максимумов приведенных напряжений σ в раме и минимальных размеров областей пластического состояния ее материала (сталь Ст.5). Поскольку на предыдущих этапах исследований выявлены значительные зоны пластического состояния материала в стойках рамы, то первым приближением был расчет НДС системы при установке двух анкеров в боках выработки. Анализ результатов расчета НДС показал несущественное влияние анкерного упрочнения пород в боках выработки на размеры области пластического состояния в стойках рамы.

2. Последующие варианты расчетов НДС системы, касающиеся изменения параметров установки анкеров в боках выработки, не привели к позитивным результатам относительно существенного ограничения размеров области пластического состояния в стойках рамы. Установлена основная причина такого явления – раздельная работа анкеров и рамы по сопротивлению проявлениям горного давления в выработке, то есть отсутствие механических связей между боковыми анкерами и стойками рамы, которые объединили бы их в единую грузонесущую конструкцию (рамно-анкерную крепь) и с обязательным обеспечением конструктивной податливости как в основных элементах крепи (рама, анкер, механические связи), так и в узлах их взаимодействия.

8. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ» С МЕХАНИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ БОКОВЫХ АНКЕРОВ И РАМЫ

Вариант установки анкеров в боках выработки по паспорту проведения и крепления откаточного квершлага блока №3 шахты «Юбилейная» (базовая схема) не дал существенных положительных результатов по снижению приведенных напряжений σ в стойках рамы. Поэтому в соответствии с выработанной методологией поиска рациональных параметров рамной крепи в сочетании с анкерной был проведен ряд расчетов НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» при вариации параметров установки анкеров. Анализ результатов исследований привел к следующим основным выводам:

– анкерное упрочнение боков выработки дает безусловный позитивный эффект повышения их устойчивости – горизонтальные перемещения породного контура боков снижаются до 30...40%;

– тем не менее, боковые перемещения породного контура по высоте стойки рамы (порядка 30...50 мм) в сочетании с вертикальной нагрузкой производят ее нагружение до такой степени, что появляются обширные зоны пластического деформирования стоек, что обусловлено (не в последнюю очередь) значительной высотой стоек крепи КШПУ и преобладающей части прямолинейной формы, обладающей, как известно, пониженной несущей способностью в сравнении с арочной;

– основная причина такого положения заключается в том, что упрочненные породы и рамная крепь работают раздельно, так как конструктивно анкера и стойки рамы не связаны друг с другом в единую грузонесущую систему.

Оценивая полученные результаты моделирования, предложено конструктивно объединить боковые анкера и рамы посредством гибких стяжек, например, из стального троса в единую грузонесущую конструкцию. Такое техническое решение далеко не новое, оно было частично исследовано в работе [55]: положительные результаты данного предложения обусловлены тем, что гибкие стяжки, охватывая раму в местах, соответствующих высоте установки анкеров, воздействуют на стойки с определенной реакцией, направленной в сторону массива. Таким образом, создается подобие промежуточных податливых опор по высоте удлиненной стойки, которые резко снижают напряжения изгиба и ограничивают область появления пластических деформаций в раме. Реакция гибкой стяжки на стойку возникает за счет предварительного натяжения анкеров после их установки, а в процессе сдвижения приконтурных пород реакция гибкой стяжки повышается и выравнивается по длине выработки, поддерживается за счет проскальзывания в местах соединения с анкерами и рамами.

Поэтому была смоделирована рамно-анкерная крепь, отличающаяся от паспорта проведения и крепления выработки только наличием гибких стяжек между рамой и хвостовиками анкеров.

Анализ НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» выполнен начиная с вертикальных напряжений σ_y , сравнивая попарно схему крепления выработки по паспорту и такую же схему рамно-анкерной крепи, но при наличии гибких стяжек между боковыми анкерами и рамой. В приконтурных породах эпюры σ_y по предложенной (рис. 8.1) и базовой (см. рис. 7.1) схемам крепления практически идентичны, поскольку параметры анкерного упрочнения не изменяются. Иная картина наблюдается в самой рамной крепи (рис. 8.2 и см. рис. 7.2): в предлагаемом варианте верхняк более равномерно нагружен растягивающими σ_y до 25 МПа, которые (в сравнении с базовой схемой) меньше σ_y в замке свода, но больше в районе замка податливости.

Повышенный интерес представляют стойки рамы, где наблюдаются относительно ограниченные области воздействия реакции гибких стяжек, в которых четко прослеживаются изгибные σ_y с деформацией стойки в сторону массива – следовательно, гибкие стяжки ограничивают перемещения стойки в полость выработки. Величина сжимающих $\sigma_y = 250...270$ МПа, близкая к расчетному пределу текучести стали Ст.5 ($\sigma_T = 270$ МПа), действует только в локальных областях: до 20...25 см по высоте и до 3,5...4,0 см по глубине сечения профиля в районе контакта с гибкой стяжкой, в то время, как в базовом варианте $\sigma_y = 250...270$ МПа действует практически по всей прямолинейной части стойки. Таким образом, происходит некоторая разгрузка стоек от вертикальных напряжений σ_y .

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в приконтурных породах (рис. 8.3 и см. рис. 7.3) несущественно отличаются друг от друга, что вполне объяснимо неизменными параметрами установки анкеров. В самой рамной крепи (рис. 8.4 и см. рис. 7.4) отличия σ_x базового и предлагаемого вариантов весьма значительны. В верхняке вместо сжимающих $\sigma_x = 150...200$ МПа действуют знакопеременные (в поперечном сечении СВП) σ_x от -90 МПа до $+100$ МПа, что обусловлено ограничением бокового перемещения стоек за счет гибких стяжек. Что касается стоек рамы, то в базовом варианте они в основном разгружены от сжимающих σ_x , а в предлагаемом варианте действует относительно равномерное сжатие $\sigma_x = 50...120$ МПа, что также обусловлено реакцией стяжек, близкой к горизонтальному направлению. Присутствуют только весьма ограниченные (до 15 см по контуру) возмущения σ_x с появлением растяжения в наружных волокнах профиля рамы до 80...100 МПа в местах контакта гибких стяжек со стойками.

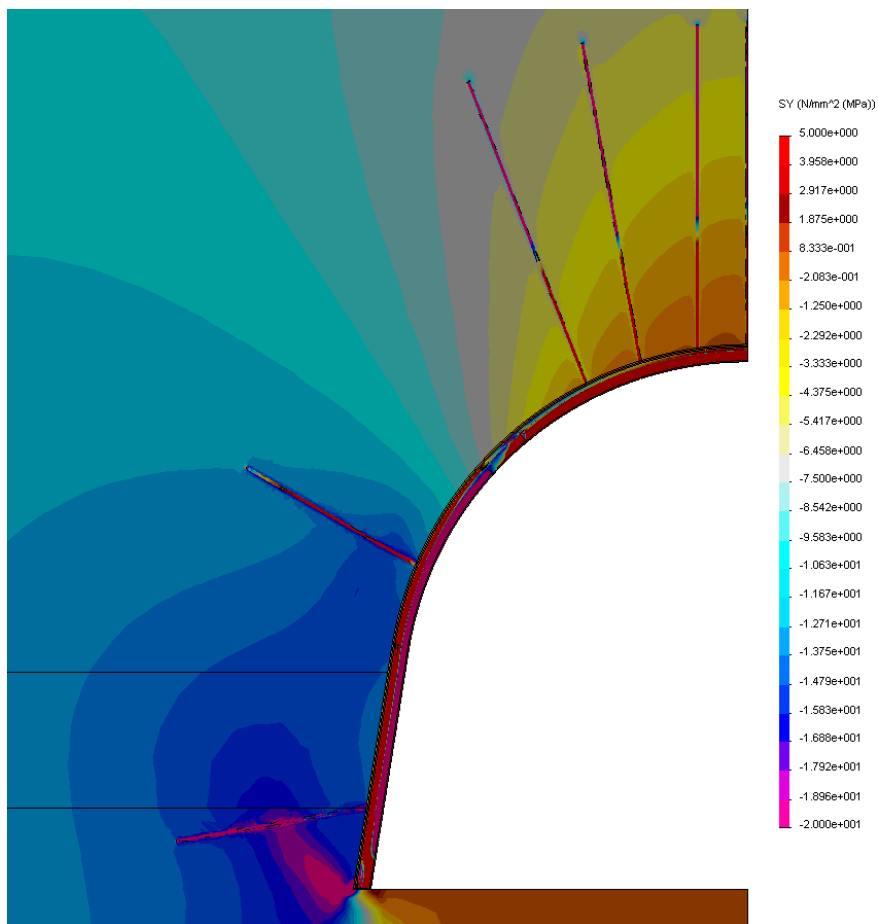


Рис. 8.1. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в приконтурном породном массиве выработки при установке рамно-анкерной крепи по предлагаемому варианту

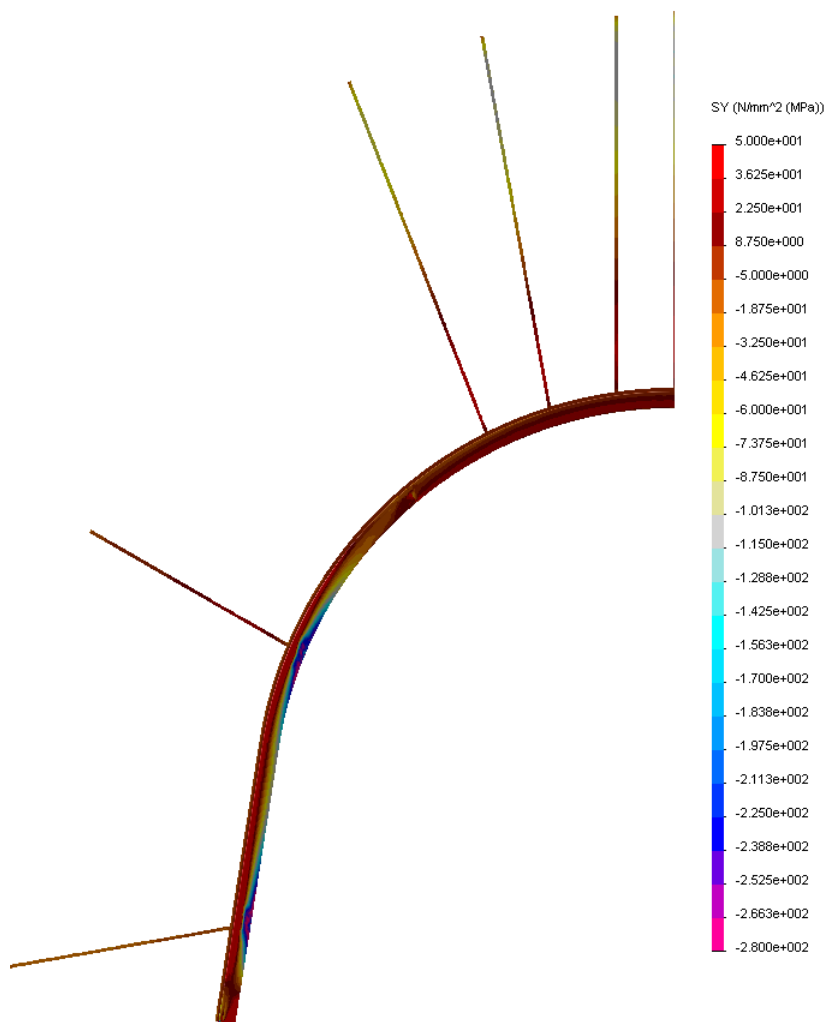


Рис. 8.2. Эпюра вертикальных напряжений σ_y
в рамно-анкерной крепи по предлагаемому варианту

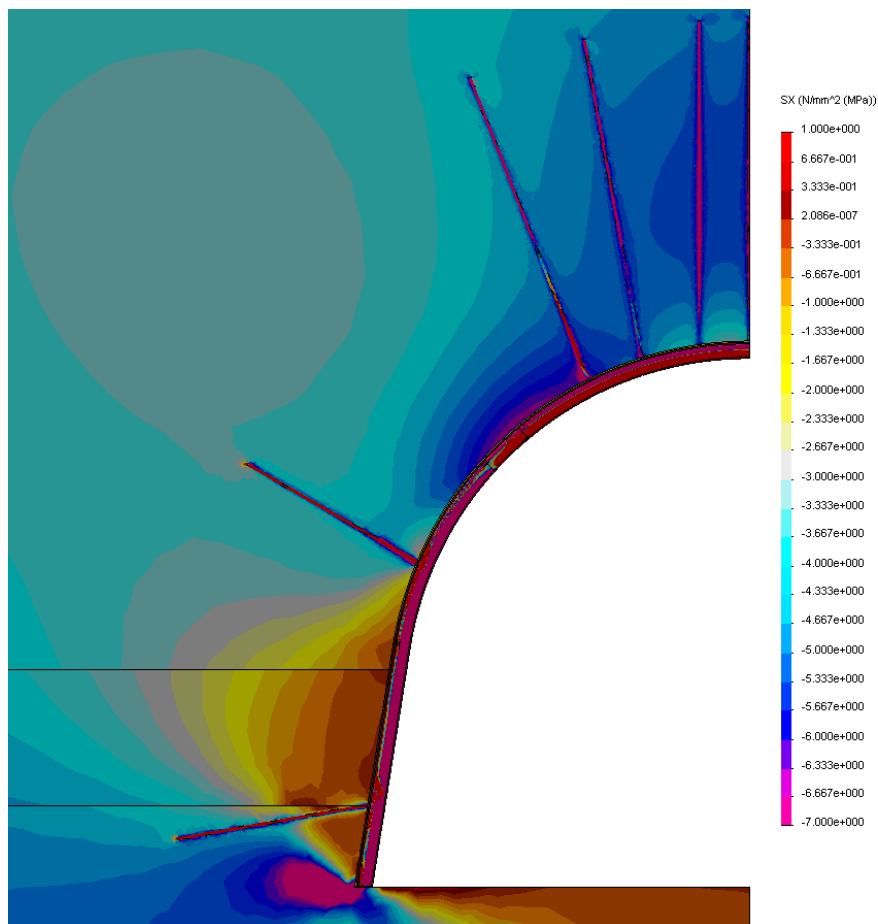


Рис. 8.3. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в приконтурном породном массиве выработки при установке рамно-анкерной крепи по предлагаемому варианту

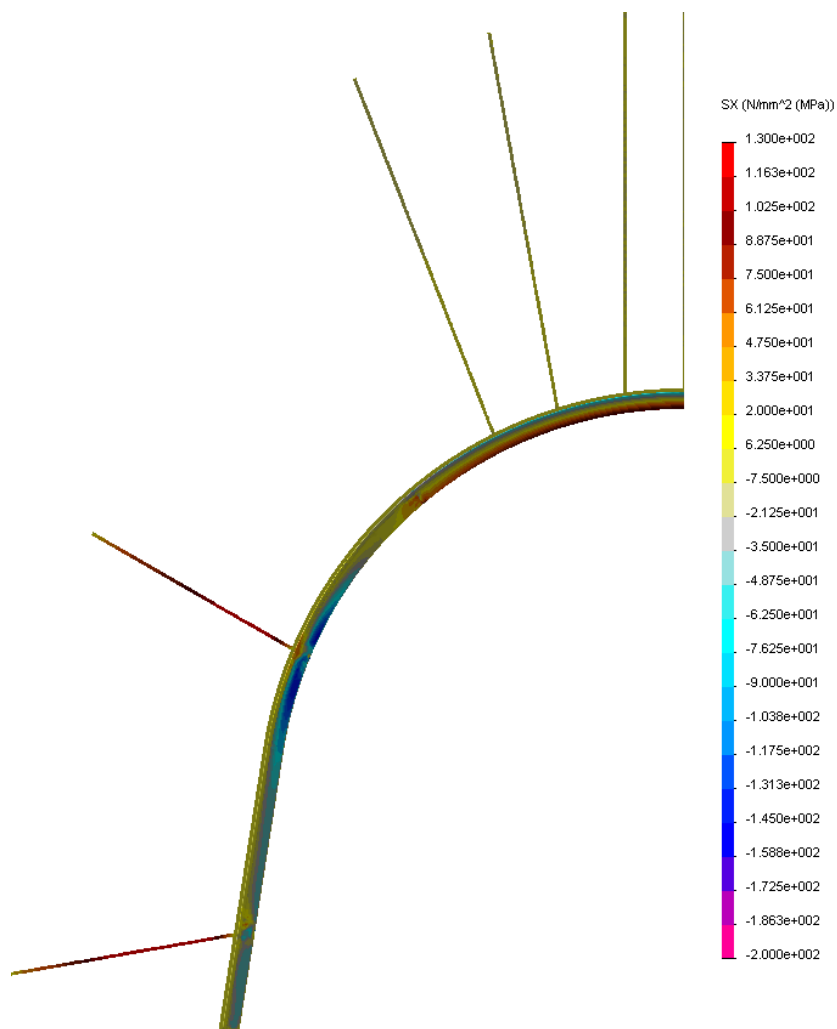


Рис. 8.4. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x
в рамно-анкерной крепи по предлагаемому варианту

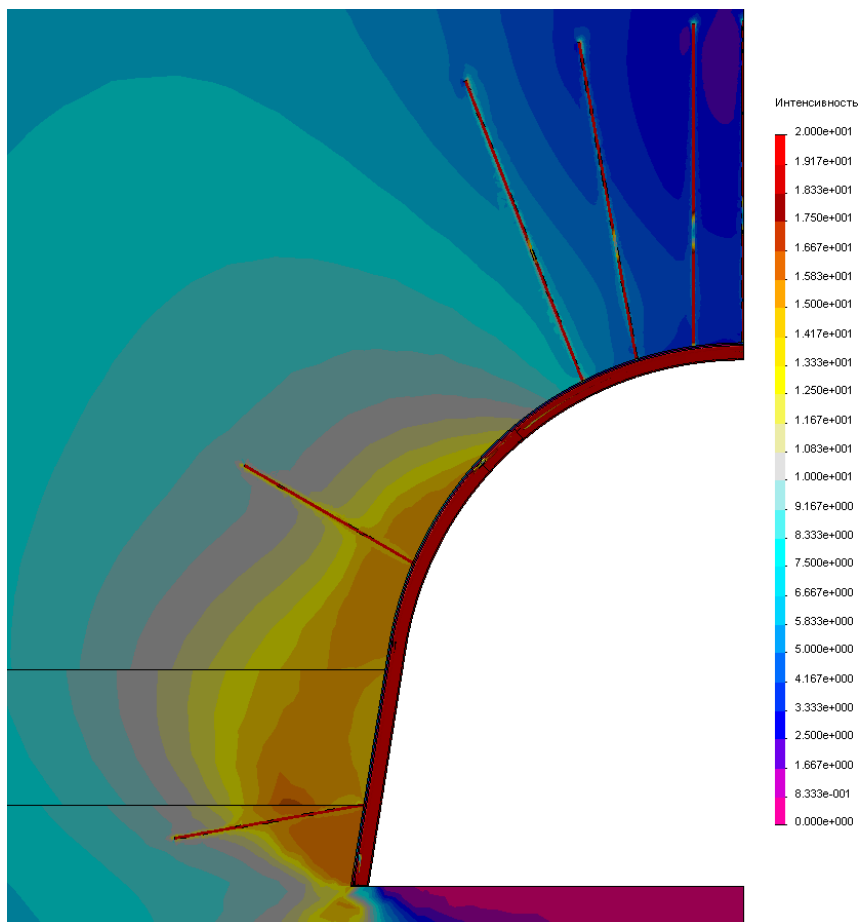


Рис. 8.5. Эпюра приведенных напряжений σ в приконтурном породном массиве выработки при установке рамно-анкерной крепи по предлагаемому варианту

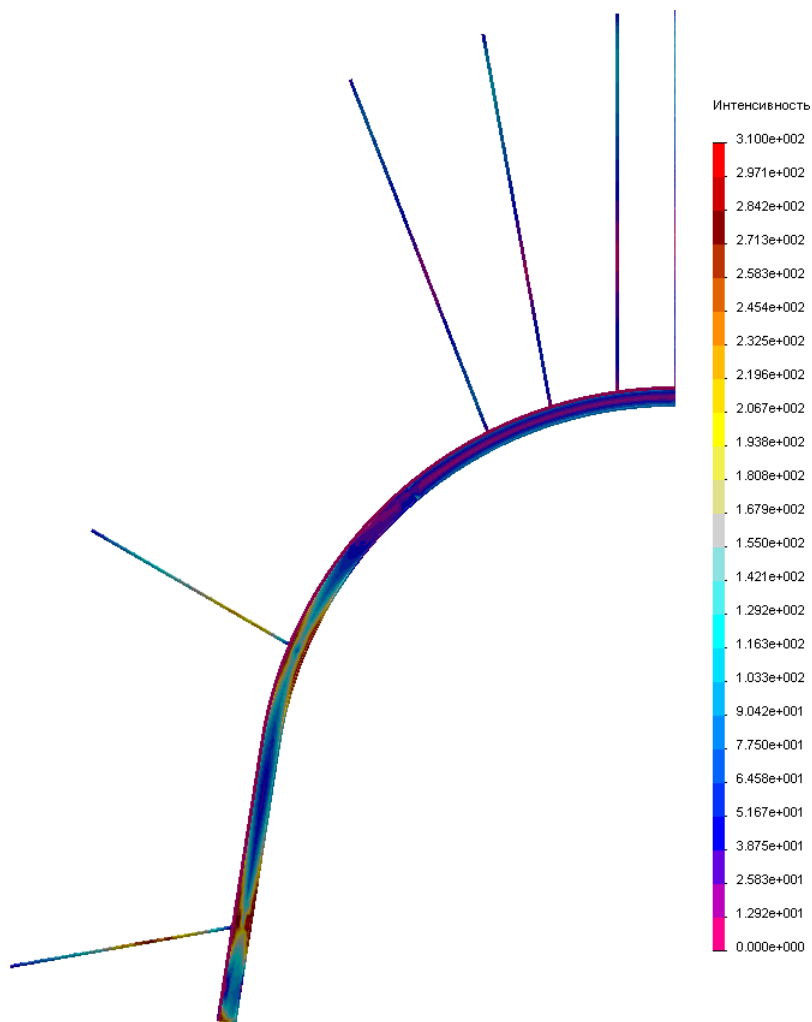


Рис. 8.6. Эпюры приведенных напряжений σ
в рамно-анкерной крепи по предлагаемому варианту

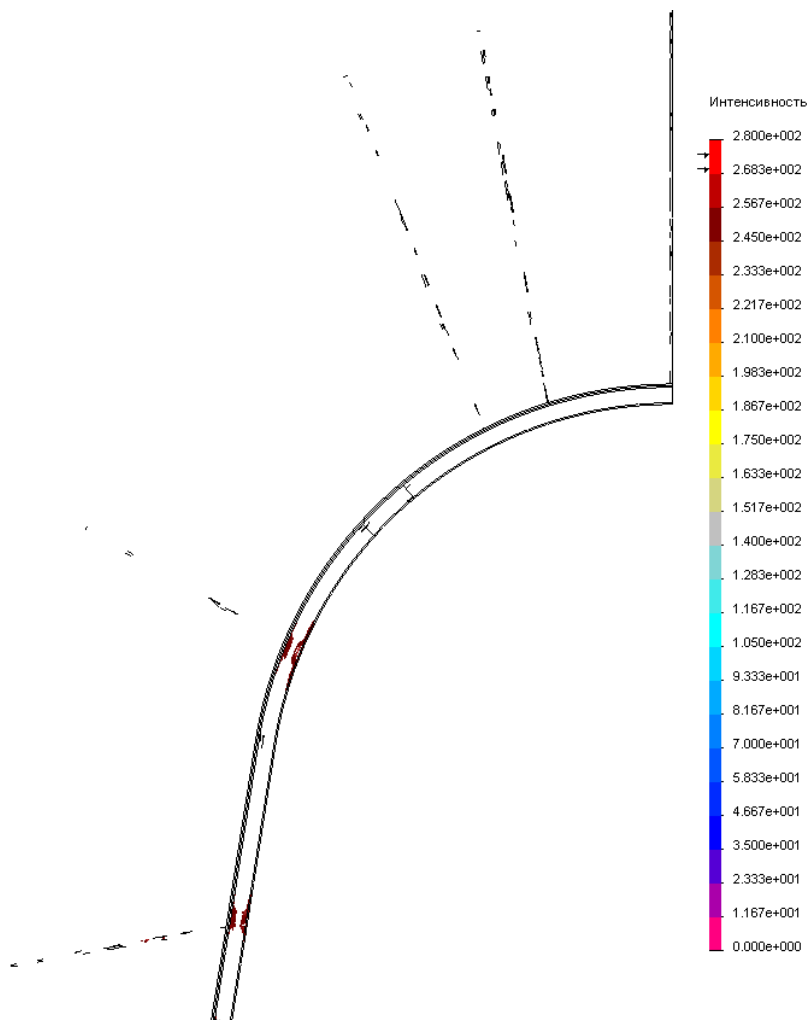


Рис. 8.7. Области пластического состояния в рамной крепи по предлагаемому варианту ее связи гибкими стяжками с анкерами

Эпюры приведенных напряжений σ в приконтурных породах (рис. 8.5 и см. рис. 7.5) по предлагаемому и базовому вариантам мало чем отличаются друг от друга. Наблюдается несколько уменьшенная (до 20% по ширине) область разупрочненного аргиллита в непосредственной кровле и почве пласта, что обусловлено действием сжимающих σ_x от стяжек через раму на приконтурные породы и некоторым выравниванием неравнокомпонентного объемного НДС, повышающим сопротивление породы по теории прочности Кулона-Мора.

В рамной крепи происходят весомые изменения поля приведенных напряжений σ (рис. 8.6 и см. рис. 7.6):

- верхняя рама относительно равномерно мало нагружена $\sigma = 20...50$ МПа против $\sigma = 160...210$ МПа в базовом варианте; эта разгрузка верхняка происходит по причине снижения горного давления в кровле за счет повышения устойчивости приконтурных пород в боках;

- в стойках рамы σ опасной величины весьма ограничены и располагаются в районе контакта с гибкими стяжками в основном по поверхностям профиля СВП, что объясняется наличием дополнительных опор у стойки в виде гибких стяжек, резко снижающих изгибные напряжения.

Данный позитивный эффект действия гибких стяжек наглядно проиллюстрирован на рис. 8.7, где показаны области пластического состояния стали Ст.5 в стойках: размеры областей снижены многократно по сравнению с базовым вариантом (см. рис. 7.7) и имеют сугубо локальный характер контактных напряжений стяжки с рамой.

Таким образом, предложенное техническое решение (соединение рамы и боковых анкеров гибкими стяжками) по результатам компьютерного моделирования может быть признано наиболее рациональным в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях поддержания пластовой выработки. Предложенная конструктивная связь анкеров и стоек рамы гибкими стяжками при неизменной схеме установки двух анкеров в каждом боку выработки по паспорту проведения и крепления резко снижает интенсивность напряжений σ по контуру всей рамы, но особенно в ее стойках – размеры областей пластического состояния уменьшаются многократно и локализируются в местах обхвата гибкой стяжкой рамы, где контактные напряжения σ немногим превосходят расчетный предел текучести Ст.5 и практически не влияют на несущую способность рамы в целом.

9. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАМНО-АНКЕРНОЙ КРЕПИ

Шахтные испытания рамно-анкерной крепи были проведены на шахте «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь» в 553 бортовом штреке горизонта 225 м.

Бортовой штрек проходил по пласту C_6 со смешенной подрывкой ком-

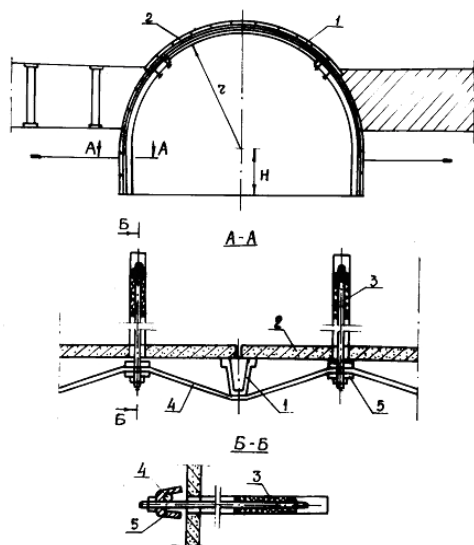


Рис. 9.1. Конструкция рамно-анкерной крепи: 1 – рамная крепь; 2 – затяжка; 3 – анкер; 4 – канат; 5 – накладка для крепления каната

байновым способом, крепь АПЗ сечением в свету $11,2 \text{ м}^2$. Плотность установки рам – $1,25 \text{ р/м}$, вмещающие породы – перемежающиеся слои глинистого и песчанистого сланцев с коэффициентом крепости $f = 2 - 4$. Позади 551 лавы штрек охранялся по схеме «угольный массив-угольные целики $2 \times 3 \text{ м}$, выработанное пространство». Для усиления рамной крепи в зоне влияния очистных работ и обеспечения возможности повторного использования штрека для отработки смежного столба устанавливались анкера с опережением очистных работ на $50-60 \text{ м}$ по схеме, приведенной на рисунках 9.1-9.3.

Анкера соединяли с рамой с помощью каната (бывшего в употреблении) и при создании натяжения анкер через канат воздействовал на раму, повышая ее устойчивость.

Диаметр несущего стержня анкера – $d = 20 \text{ мм}$; длина распорной резиновой втулки (замка анкера) – $h = 0,1 \text{ м}$; наружный радиус втулки – $b = 20 \text{ мм}$; внутренний – $a = 14 \text{ мм}$.

Критерием эффективности работы исследуемых конструкций рамно-анкерной крепи являлась величина смещения породного контура выработки. Длина каждого из экспериментальных участков составляла 32 м , где было установлено по 40 комплектов двух видов крепей отличающихся друг от друга высотой установки анкеров от почвы штрека (рис. 9.3). Для измерения смещений породного контура было установлено по три реперные станции для каждого из вариантов крепления выемочного штрека. Схема расположения реперов приведена на рис. 9.3: в своде выработки установлены три репера (№2-4), в боках – два репера (№1, 5) и в почве – три репера (№6-8). При этом репера в почве (№6-8) устанавливались по отвесам, опущенным от реперов №2-4.

Измерялась общая величина сближения пород кровли и почвы, а также сближение боков выработки. Величина сближений измерялась через каждые 4 м подвигания лавы (5 комплектов рамной крепи) на расстоянии от 80 м впереди лавы до 80 м позади лавы между реперами №2-8, №3-7, №4-6 (сближение между кровлей и почвой) и реперами №1-5 (сближение между боками выработки).

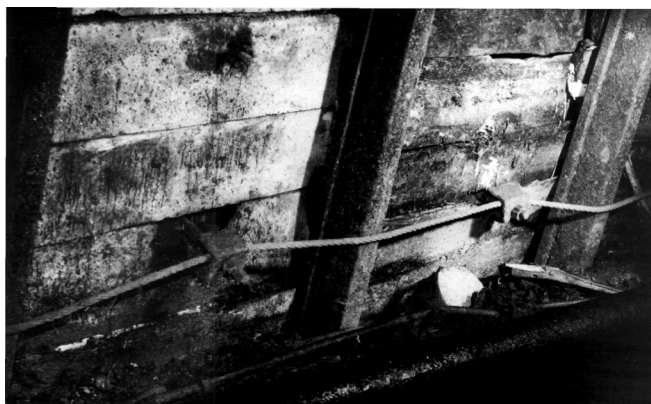


Рис. 9.2. Общий вид податливой рамно-анкерной крепи на экспериментальном участке 553 бортового штрека впереди 50-60 м очистного забоя 551 лавы шахты «Юбилейная», в которой анкера и рамы соединены в единую грузонесущую конструкцию гибкими стяжками с возможностью проскальзывания, что обеспечивает стойкам дополнительные опоры и возможность автоматического выравнивания на раму боковых нагрузок вдоль выработки (гибкие стяжки выполнены из канатов, бывших в употреблении)

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать следующие выводы. При установке только рамной крепи в выемочном штреке развиваются довольно значительные смещения породного контура выработки, которые в несколько раз превышают величины податливости трехзвенной рамной крепи АП-3 (рис. 9.4-9.6). Наиболее интенсивно прирост смещений происходит на участке от 10 м впереди лавы до 8 м позади лавы. Далее интенсивность роста смещений уменьшается и с увеличением расстояния до 60 м позади лавы смещения в определенной степени стабилизируются.

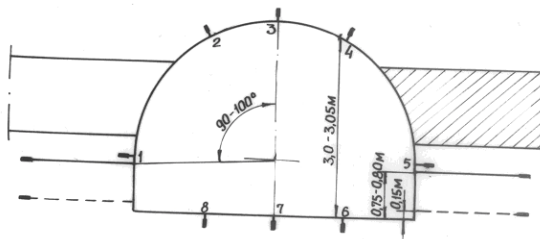


Рис. 9.3. Схема расположения анкеров и реперов в поперечном сечении выработки:
— предлагаемый вариант;
- - - второй базовый вариант

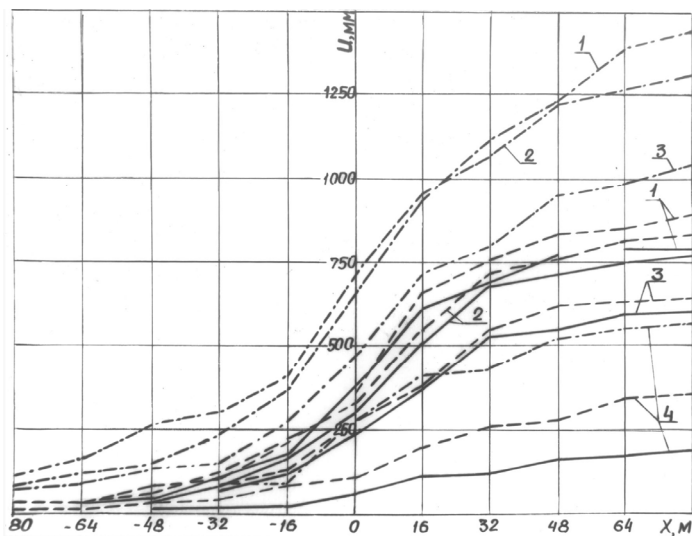


Рис. 9.4. Смещение U породного контура выемочного штрека, закрепленного рамной крепью (— · —), рамно-анкерной крепью по базовому варианту (— — —) и рамно-анкерной крепью по предлагаемому варианту (—) в зависимости от расстояния до лавы: 1 – репера №2-8; 2 – репера №3-7; 3 – репера №4-6; 4 – репера №1-5

Следует также отметить, что величина сближения кровли и почвы штрека со стороны выработанного пространства (например, при установке только рамной крепи $U = 1440$ мм) больше, чем по центру выработки (1310 мм) и тем более выше, чем со стороны угольного массива (1040 мм). Это в первую очередь объясняется неравномерным характером пучения почвы выработки по ее ширине. Даже визуально четко прослеживается значительно большая величина пучения почвы со стороны выработанного пространства (рис. 9.7). При установке только рамной крепи имело место также значительное смещение боков выработки, величина которого достигала 570 мм. При этом стойки рамы, пластически деформируясь, смещались в сторону вертикальной оси выработки (см. рис. 9.5-9.7), форма рамы становилась неустойчивой и ее несущая способность резко падала.

При установке рамно-анкерной крепи по предлагаемому варианту (см. рис. 9.1-9.3) величина сближения кровли и почвы, а также боков выработки существенно уменьшалась, в среднем в 1,6-1,7 раза (см. рис. 9.4).

Изменение координат расположения нижних анкеров в соответствии с предлагаемым вариантом (см. рис. 9.3) незначительно сказывалось на величине сближения кровли и почвы выработки.

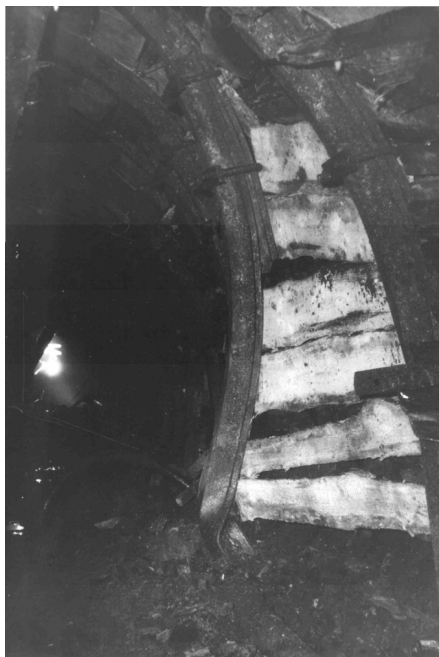


Рис. 9.5. Общий вид 553 бортового штрека на сопряжении с 551 лавы, закреплен рамной крепью АП-3



Рис. 9.6. Общий вид 553 бортового штрека позади 551 лавы на расстоянии 30-50 м, закреплен рамной крепью АП-3



Рис. 9.7. Общий вид 553 бортового штрека позади 553 лавы на расстоянии до 200 м, закреплен рамной крепью АП-3, участок перекрепления у места «завала»



Рис. 9.8. Общий вид 553 бортового штрека вблизи сопряжения с 551 лавой, закреплен рамно-анкерной крепью, анкера с гибкими стяжками перекрыты породами почвы



Рис. 9.9. Общий вид 553 бортового штрека в 30-50 м позади 551 лавы, закреплен рамно-анкерной крепью, анкера с гибкими стяжками перекрыты «вспученными» породами почвы

Так, величина сближения кровли и почвы по предлагаемому варианту установки анкеров оказалась меньше в среднем на 8-10%, чем по базовому варианту. Однако наблюдалось значительное снижение величины сближения боков выработки (при ее креплении по предлагаемому варианту установки анкеров), которое уменьшалось в среднем в 1,8-1,9 раза. При этом смещения стоек рамы находились в пределах величины их боковой податливости, что привело к снижению до минимума вероятность пластических деформаций и разрушения рамной крепи от боковых нагрузок. Стойки рамной крепи находились в устойчивом состоянии (рис. 9.8 и 9.9).

Таким образом, результаты опытно-промышленных испытаний показали, что предлагаемый вариант установки боковых анкеров в конструкции рамно-анкерной крепи, в которой рамы и анкера объединены механическими связями в единую грузонесущую конструкцию, является наиболее эффективным и способствует повышению несущей способности рамы и устойчивости выработки в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наиболее развитым и широко применяемым в геомеханических исследованиях численным методом является метод конечных элементов, который и принят к использованию в виде пакета современных прикладных компьютерных программ.

2. Для повышения адекватности моделирования процесса сдвижения углевмещающей толщи в окрестности пластовой выработки осуществлено одновременное выполнение трех условий:

- пространственное моделирование пространственных объектов;
- отражение реальной структуры углевмещающей толщи с описанием ее механических свойств по полной диаграмме деформирования материала каждого элемента;
- максимально достоверное моделирование всех конструктивных особенностей крепи и свойств ее материалов.

3. Применительно к поставленной задаче разработан алгоритм проведения вычислительного эксперимента, обеспечивающий получение наиболее достоверного результата.

4. В соответствии с принятой методологией компьютерного моделирования пространственной системы «слоистый массив-крепь выработки» обоснованы структура и свойства углевмещающей толщи пласта C_6 по полной диаграмме ее деформирования, наиболее объективно описывающей реальное состояние массива.

5. Компьютерная модель рамной и анкерной крепей создана по условию максимально возможного отражения ее конструктивных особенностей. Обоснована модель замка податливости, позволяющая обеспечить стабильность вычислительного процесса при сформированной обширной базе учитываемых параметров геомеханической системы.

6. Тестирование разработанной модели доказало ее адекватность реальному объекту и позволила сделать ряд выводов:

– перспектива развития пучения пород почвы пластовой выработки весьма ограничена по причине залегания в почве достаточно мощного слоя песчаника с повышенными прочностными и деформационными характеристиками; основной вклад в процесс пучения вносит аргиллит малой мощности, залегающий в непосредственной почве;

– анкера в кровле сформировали подобие породной грузонесущей балки, находящейся в устойчивом состоянии и разгружающей верхняк рамы;

– в боках выработки в слабых породах непосредственной кровли и почвы (аргиллит) образуются ограниченные зоны предельного состояния, формирующие повышенную боковую нагрузку на стойки рамы, которые испытывают изгиб при горизонтальном перемещении в полость выработки;

– по этой причине в стойках рамной крепи (в районе опоры и на высоте 1,8...2,0 м) образуются пластические области;

– в перспективе устойчивость выработки оценивается как удовлетворительная, что подтверждается небольшими перемещениями рамной крепи; однако рекомендуется предусмотреть анкерное упрочнение боков на отдельных участках выработки, где возможно интенсивное проявление разупрочняющих аргиллит факторов.

7. Результаты компьютерного моделирования НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» позволили раскрыть механизм работы рамной крепи и анкеров при существующей схеме поддержания пластовой выработки, сущность которого сводится к формированию армопородной плитой в кровле повышенного горного давления в боках выработки, приводящего к появлению областей пластического состояния стоек рамы. В этой связи сформулировано ресурсосберегающее направление соединения гибкими связями рамной крепи и анкеров в боках выработки в единую грузонесущую систему, позволяющую повысить устойчивость выработки. При этом, исходя из геомеханики деформирования системы «слоистый массив-крепь выработки», обоснована эффективность создания пространственной податливости между элементами рамно-анкерной крепи.

8. Раскрыт принцип увеличения несущей способности рамной крепи за счет создания дополнительных податливых опор по высоте стоек рамы и разработана методология поиска рациональных параметров рамно-анкерной крепи по результатам компьютерного моделирования изменения НДС рамы по ее контуру.

9. Обосновано технологически простое конструктивное решение по созданию между рамами и анкерами механических связей, обладающих податливостью по всем трем измерениям пространства, которые также характеризуются минимальными затратами материальных и трудовых ресурсов.

10. Создан метод расчета гибких связей и осуществлен выбор стяжек для условий поддержания подготовительных выработок, например, блока №3 шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь». Приведенный конкретный пример расчета гибких связей анкеров с рамами наглядно показывает, что из материалов, бывших в употреблении, и отходов (при изготовлении крепежных изделий) можно создать высокоэффективную податливую конструкцию рамно-анкерной крепи с довольно низкими дополнительными затратами, которые существенно окупаются снижением металлоемкости непосредственно рамы.

11. По итогам анализа двух форм породных обнажений под крепи КШПУ и КВТ-2 можно сделать следующие выводы:

– в кровле выработки за счет снижения интенсивности действия растягивающих вертикальных напряжений σ_y высота зоны предельного состояния уменьшается на 0,33 м для формы крепи КВТ-2-14,5;

– в почве выработки разупрочняется только аргиллит небольшой мощности в сравниваемых формах породного обнажения под указанные крепи можно оценить как несущественную;

– в боках выработки разупрочняются как угольный пласт от действия из-

гибных растягивающих σ_x , так и аргиллит непосредственной кровли и почвы пласта от действия сжимающих напряжений σ_y ; здесь ширина зоны разупрочнения меньше (порядка 20%) для формы крепи КВТ-2-14,5.

12. На базе существующих представлений о взаимодействии податливой крепи с приконтурным массивом обосновано ресурсосберегающее направление применения более легких типов СВП рамной крепи в сочетании с анкерами для крепления пластовых выработок блока №3 пласта C_6 на шахте «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь».

13. Анализ НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» установил малые различия (как правило, до нескольких процентов) в величинах компонент напряжений, особенно приведенных σ (по которым производится прочностной расчет), при установке рам из СВП-27 и СВП-19 в сочетании с анкерной крепью в кровле выработки. Установка более легкого профиля позволяет сократить до 30% металлоемкость рам и в определенной степени трудоемкость их возведения.

14. В стойках рам образуются две области (в районах пяты свода и опоры стойки) пластического состояния независимо от номера СВП.

15. Выработанная методология поиска рациональных параметров рамно-анкерной крепи пластовых выработок предусматривает последовательное приближение вариантов расчета НДС системы «слоистый массив-крепь выработки» к условию минимальных значений максимумов приведенных напряжений σ в раме и минимальных размеров областей пластического состояния ее материала (сталь Ст.5). Поскольку на предыдущих этапах исследований выявлены значительные зоны пластического состояния материала в стойках рамы, то первым приближением был расчет НДС системы при установке двух анкеров в боках выработки [38]. Анализ результатов расчета НДС показал несущественное влияние анкерного упрочнения пород в боках выработки на размеры области пластического состояния в стойках рамы.

16. Последующие варианты расчетов НДС системы, касающиеся изменения параметров установки анкеров в боках выработки, не привели к позитивным результатам относительно существенного ограничения размеров области пластического состояния в стойках рамы. Установлена основная причина такого явления – раздельная работа анкеров и рамы по сопротивлению проявлениям горного давления в выработке, то есть отсутствие механических связей между боковыми анкерами и стойками рамы, которые объединили бы их в единую грузонесущую конструкцию (рамно-анкерную крепь) и с обязательным обеспечением конструктивной податливости как в основных элементах крепи (рама, анкер, механические связи), так и в узлах их взаимодействия.

17. Оценивая полученные результаты моделирования, предложено конструктивно объединить боковые анкера и стойки рам посредством гибких стяжек, например, из стального троса, бывшего в употреблении. Положительные результаты данного предложения обусловлены тем, что гибкие

стяжки, охватывая стойки рамы в местах, соответствующих высоте установки анкеров, воздействуют на стойки с определенной реакцией, направленной в сторону массива. Таким образом, создается подобие промежуточных податливых опор по высоте удлинненной стойки, которые резко снижают напряжения изгиба и ограничивают область появления пластических деформаций. Реакция гибкой стяжки на стойку возникает за счет предварительного натяжения анкеров после их установки, а в процессе сдвижения приконтурных пород реакция гибкой стяжки поддерживается за счет разницы перемещений приконтурных пород в соседних сечениях выработки.

18. Соединение анкеров и стоек рамы в единую грузонесущую конструкцию посредством гибких стяжек привело к весьма существенному позитивному результату:

- приведенные напряжения в верхняке рамы снизились до 4 раз и составили 20-50 МПа против 160-210 МПа в базовом варианте и наблюдается равномерное распределение по контуру верхняка рамы;

- в стойках рамы приведенные напряжения опасной величины весьма ограничены и располагаются только на поверхности СВП в местах контакта с гибкими стяжками, где σ немногим превосходят σ_T Ст.5 и практически не снижают несущую способность рамы в целом.

- результаты опытно-промышленных испытаний предложенного варианта рамно-анкерной крепи (соединение боковых анкеров и стоек рамы гибкими стяжками в единую грузонесущую конструкцию) дал высокий положительный эффект.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Феннер Р. Исследование горного давления // Вопросы теории горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 5-58.
2. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах // Вопросы горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 59-164.
3. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.
4. Глушко В.Т., Ваганов И.М., Криничанский Г.Т. Определение механических характеристик разрушенных горных пород в лабораторных условиях // Уголь Украины. – 1974. – №5. – С. 22-24.
5. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г., Певзнер Е.Д. Влияние скорости деформирования на запредельные характеристики горных пород // ФТПРПИ. – 1982. – №5. – С.8-15.
6. Немчин Н.П. Об учете неупругого разрыхления в теории горного давления // ФТПРПИ. – 1971. – №3. – С.13-18.
7. Линьков А.М. Об учете запредельных деформаций при решении задач геомеханики // Труды ВНИМИ. – 1977. – Вып.103. – С. 71-76.
8. Протосеня А.Г. К учету ниспадающей ветви при расчете напряженно-деформированного состояния пород вокруг горных выработок // Разработка соляных месторождений. – Пермь, 1980. – С. 99-106.
9. Сажин В.С. Определение области неупругих деформаций с учетом изменения сцепления пород // ФТПРПИ. – 1967. – №6. – С. 93-95.
10. Бондаренко В.И. Научные основы физико-химического закрепления слабых водонасыщенных пород вокруг горных выработок. – Дис. ... д-ра техн. наук. – Д.: ДГИ, 1989. – 392 с.
11. Рыков А.С. Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация. – М.: МИСИС, 2005. – 246 с.
12. Файерабенд П. Избранные труды по методологии науки. – М.: Прогресс, 1986. – 388 с.
13. Штофф В.А. Введение в методологию научного познания. – Л.: ЛГУ, 1972. – 432 с.
14. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. – М.: СИНТЕГ, 2007. – 668 с.
15. Ланге К.А. Организация управления научным исследованием. – Л.: Наука, 1971. – 212 с.
16. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. – М.: СИНТЕГ, 1997. – 344 с.
17. Кедров Б.М. Классификация наук. – М.: Мысль, 1985. – 268 с.
18. Копнин П.В. Гносеологические и логические основы науки. – М.: Мысль, 1974. – 540 с.
19. Майданов А.С. Искусство открытия: Методология и логика научного творчества. – М., 1993. – 342 с.
20. Новиков Д.А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. – М.: Фонд «Проблемы управления», 1999. – 402 с.
21. Поппер К. Логика и рост научного знания. – М., 1983. – 668 с.

22. Кайдаков С.В. Проблема деятельности ученых и научных коллективов. – М., 1981. – 232 с.
23. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М.: Недра, 1975. – 143 с.
24. Методы и средства решения задач горной геомеханики / Г.Н. Кузнецов, К.А. Ардашев, Н.А. Филатов и др. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
25. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
26. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1982. – 272 с.
27. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах. – М.: Недра, 1986. – 415 с.
28. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.
29. Сопротивление материалов / Под редакцией Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1979. – 696 с.
30. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
31. Усаченко Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок. – К.: Наукова думка, 1979. – 136 с.
32. Усаченко Б.М., Чередниченко В.П., Головчанский Н.Е. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизированных породах. – К.: Наукова думка, 1990. – 144 с.
33. Гелескул М.Н., Каретников В.Н. Справочник по креплению капитальных и подготовительных горных выработок. – М.: Недра, 1982. – 479 с.
34. Мельников Н.И. Анкерная крепь. – М.: Недра, 1980. – 252 с.
35. Ковалевская И.А. Взаимодействие анкерной и комбинированной крепей с породным массивом и разработка метода расчета их рациональных параметров. – Дис. ... канд. техн. наук. – Д.: ГГАУ, 1995. – 200 с.
36. Симанович Г.А. Устойчивость подземных горных выработок. – Д.: Системные технологии, 2005. – 164 с.
37. Ковалевская И.А. Геомеханика взаимодействия элементов системы «горный массив-упрочненные породы-крепь подземных выработок». – Д.: РИК НГАУ, 2003. – 234 с.
38. Паспорт проведения и крепления откаточного квершлага блока №3 шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь».
39. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт. – Д.: ИГТМ НАН Украины. – 2002. – 372 с.
40. Обоснование ресурсосберегающих параметров крепи подготовительных выработок методом компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «горный массив-крепь». Отчет АД-346/09-0/845-У. Фонды НИИГП. – Д., 2009. – 118 с.
41. Баклашов И.В., Тимофеев О.В. Конструкции и расчет крепей и обделок. – М.: Недра, 1979. – 263 с.

42. Выгодин М.А., Евтушенко И.В. Облегченные металлоанкерные крепи горных выработок шахт Западного Донбасса // Шахтное строительство. – 1987. – №7. – С. 23-25.

43. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга 2. Предельное и запредельное состояние системы «порода-крепь» /В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев. – Д.: Системные технологии, 2007. – 198 с.

44. Прогноз перемещений контура пластовой выработки в слоистом массиве слабых пород /В.И. Бондаренко, М.А. Ильяшов, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев. – Д.: Системные технологии, 2008. – 193 с.

45. Ковалевская И.А. Расчет параметров управления устойчивостью подсистемы «упрочненные породы-крепь подземных выработок». – Д.: Системные технологии, 2005. – 113 с.

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

47. Ковалевская И.А. Геомеханика управления устойчивостью пространственной системы «массив-упрочненные породы-крепь подземных выработок». – Дис. ... д-ра техн. наук. – Д.: НГУ, 2004. – 349 с.

48. А.С. 1216356 СССР. Крепь сопряжения выемочных штреков / Г.А. Симанович, А.М. Симанович. – Опулб. в Б.И., 1986. – №9.

49. Самохвалов Я.А., Левицкий М.Я., Григораш В.Д. Справочник техника-конструктора. – К.: Техника, 1978. – 592 с.

50. Заславский Ю.З. Исследование проявлений горного давления капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна. – М.: Недра, 1966. – 180 с.

51. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1980. – 728 с.

52. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. – М.: Стройиздат, 1983. – 273 с.

53. Руководство по поддержанию горных выработок на шахтах Западного Донбасса. – Спб.: ВНИМИ, 1992. – 51 с.

54. Руководящий нормативный документ Министерства угольной промышленности КД 12.01.01.201-98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания. – К.: УкрНИМИ, 1998. – 149 с.

55. Ковалевская И.А. Геомеханика управления устойчивостью пространственной системы «массив-упрочненные породы-крепь подземных выработок». – Дис. ... д-ра техн. наук. – Д.: НГУ, 2004. – 349 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	3
1	МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИТИКО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСЛЕДОВАНИЙ	6
1.1	Методология – философия научных исследований	6
1.2	Элементы и методы научного исследования	9
1.3	Организация процесса проведения научного исследования	18
1.4	Технологическая фаза научного исследования	25
2	ГЕОМЕХАНИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТОВЫХ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК	34
2.1	Основные принципы компьютерного моделирования геомеханических процессов в окрестности подготовительных выработок	34
2.2	Обоснование выбора метода математического моделирования геомеханических процессов	36
2.3	Особенности решения задач геомеханики методом конечных элементов	40
2.4	Анализ технологии вычислительного эксперимента	44
2.5	Алгоритм проведения вычислительного эксперимента	51
3	РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ»	60
3.1	Обоснование структуры углевмещающей толщи в окрестности базового участка пластовой подготовительной выработки	61
3.2	Обоснование механических характеристик породных слоев и угольных пластов по полной диаграмме их деформирования	62
3.3	Обоснование размеров геомеханической модели системы «слоистый массив-крепь выработки»	64
3.4	Построение модели крепи базовой пластовой выработки	67

3.4.1	Конструкция рамной крепи КШПУ-15,0	67
3.4.2	Разработка и обоснование модели замка податливости рамной крепи	68
3.4.3	Обоснование модели анкеров и схемы их расположения	76
3.5	Тестирование модели на адекватность реальному объекту	77
	Выводы	82
4	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ АНКЕРОВ И РАМ В ЕДИНОЙ ГРУЗОНЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ РАМНО-АНКЕРНОЙ КРЕПИ С САМОРЕГУЛИРУЕМЫМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАГРУЗКИ НА НЕСУЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ	83
4.1	Эффективность пространственной податливой связи анкеров с рамой	83
4.2	Обоснование принципа увеличения несущей способности рамной крепи с помощью анкеров	88
4.3	Обоснование конструкции механических связей анкеров и рам в единой грузонесущей системе крепи	92
4.4	Расчет податливого соединения рамы с анкером	95
	Выводы	99
5	ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ ПОРОДНОГО КОНТУРА ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ	100
6	ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ТИПА СВП РАМНОЙ КРЕПИ НА НДС СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ»	110
6.1	Обоснование направления ресурсосбережения при креплении пластовой выработки	110
6.2	Корректировка геомеханических моделей пластовой выработки	113
6.3	Анализ НДС элементов системы «слоистый массив-крепь выработки»	114
6.3.1	Анализ поля распределения вертикальных напряжений в элементах системы	114

6.3.2	Анализ поля распределения горизонтальных напряжений в элементах системы	121
6.3.3	Анализ поля распределения приведенных напряжений и перемещений в системе	122
	Выводы	134
7	ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ БОКОВЫХ АНКЕРОВ НА НДС СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ» ПРИ ОТСУТСТВИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ С РАМАМИ	135
	Выводы	145
8	ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ ВЫРАБОТКИ» С МЕХАНИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ БОКОВЫХ АНКЕРОВ И РАМЫ	146
9	ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАМНО-АНКЕРНОЙ КРЕПИ	156
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	161
	ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	165
	СОДЕРЖАНИЕ	168

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Наукове видання

**Бондаренко В.І., Чередниченко Ю.Я., Ковалевська І.А.,
Симанович Г.А., Вівчаренко О.В., Фомичов В.В.**

**ГЕОМЕХАНІКА ВЗАЄМОДІЇ АНКЕРНОГО
ТА РАМНОГО КРІПЛЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК
В ЄДИНІЙ ВАНТАЖОНЕСУЧІЙ СИСТЕМІ**

Монографія

Російською мовою

Підписано до друку 12.08.10. Формат 701/290 1/16.
Папір офсет. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12,61.
Обл.-вид. арк. 14,28. Тираж 300 прим. Замовлення №120810.

Видавництво ТОВ «ЛізуновПрес»
49127, м. Дніпропетровськ, вул. Н. Данченка, 30/166
Свідоцтво ДК №3597 від 06.10.2009 р.



БОНДАРЕНКО Владимир Ильич
заведующий кафедрой подземной разработки месторождений Национального горного университета, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины



ЧЕРЕДНИЧЕНКО Юрий Яковлевич
первый заместитель Министра угольной промышленности Украины, кавалер знаков «Шахтерская слава» и «Шахтерская доблесть»



КОВАЛЕВСКАЯ Ирина Анатольевна
профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета, доктор технических наук



ВИВЧАРЕНКО Александр Васильевич
технический директор ОАО «Павлоградуголь», Заслуженный шахтер Украины, кавалер знака «Шахтерская доблесть»



СИМАНОВИЧ Геннадий Анатольевич
профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета, доктор технических наук



ФОМИЧЕВ Вадим Владимирович
доцент кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета, кандидат технических наук