

Канд. техн. наук С.А. Курносов,  
инж. И.Н. Слащёв (ИГТМ НАН Украины),  
канд. техн. наук И.А. Ефремов,  
инж. А.А. Цикра  
(АП "Шахта им. А.Ф. Засядько"),  
канд. техн. наук В.В. Радченко  
(Минуглепром Украины)

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ПОДДЕРЖАНИЯ ГАЗОСБОРНЫХ ВЫРАБОТОК С УГЛЕВМЕЩАЮЩИМ МАССИВОМ**

Наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень взаємодії елементів комбінованого способу підтримки виробок на глибоких горизонтах з газонасиченим вуглевміщуючим масивом при поетапному залученні його окремих ділянок в охоронну конструкцію.

### **INTERPLAY OF MEMBERS OF A COMBINED MODE OF KEEPING UP WITH A GAS-SATURATED ROCK MASS**

The outcomes experimental and analytical investigations of interplay of members of a combined mode of a roadway maintenance on deep levels with a gas-saturated rock mass are reduced at installment drawing of his separate leases in a guarding construction.

Реализация эффективной технологии комплексной дегазации углепородного массива в сложных горно-геологических условиях глубоких шахт, как показал опыт, требует использования дополнительных газосборных выработок [1]. Поэтому при проектировании новой дегазационной системы важным является решение задачи определения необходимой и достаточной устойчивости этих выработок на весь период отработки выемочного столба с выбором рациональных направлений бурения дегазационных скважин на источники накопления газа метана, а также с учётом их максимальной производительности и продолжительности работы. Вместе с тем практика показывает, что при проектировании заложения таких выработок далеко не всегда представляется возможность расположения газосборных выработок в разгруженных от горного давления зонах, и зачастую приходится проводить и поддерживать их в обстановке высокого горного и газового давления. Обеспечить их устойчивость и работоспособность в таких условиях традиционными способами неэффективно и весьма проблематично и требует принципиально нового подхода к решению поставленной задачи. Одним из таких подходов может быть применение комбинированного способа поддержания, включающего средства рамно-анкерного крепления, литые полосы из быстротвердеющих материалов, крепи усиления, костры, охранные бутовые полосы и другие, обладающие различной несущей способностью, режимами работы при нагружении и степенью деформирования.

Характерной особенностью применения комбинированного способа

поддержания является то, что снижение разрушающего действия горного давления на крепь выработки достигается за счёт использования эффекта локального поэтапного вовлечения углепородного массива в охранную конструкцию, несущая способность и режим работы которой, благодаря применению элементов крепления с различными параметрами нагружения и деформирования, должны соответствовать ожидаемым смещениям и нагрузкам на различных этапах взаимодействия системы «крепь-вмещающие породы».

Объективное решение такой задачи стало возможным при использовании экспериментально-аналитического метода [2], основанного на совмещении шахтных экспериментальных исследований с моделированием геомеханического состояния углепородного массива комплексом программного обеспечения, разработанного ИГТМ НАН Украины.

В качестве объекта исследований принят вентиляционный ходок 16 западной лавы пласта  $m_3$  шахты им. А. Ф. Засядько. Комплексный мониторинг газонасыщенного углепородного массива проведен в окрестности ходка, расположенного на границе отработанной лавы, который, на данном участке в процессе проходки и эксплуатации по технологическим причинам, поддерживался различными способами. Вентиляционный ходок пройден после остановки очистного забоя 16 западной лавы вприсечку к линии установленных секций механизированной крепи и закреплён рамной и анкерной крепью. Извлечение секций механизированной крепи осуществлено на разных участках выработки; и на их место устанавливалась литая полоса различных типов: с комбинацией отдельных блоков  $1,5 \times 1,5$  м и клетей из отходов спецпрофиля через 3 м по длине выработки, заливкой вяжущим раствором пространства по ширине извлечённых секций механизированной крепи и полной заливкой вяжущим раствором свободных полостей до рам податливой крепи.

Исследования состояния выработки и окружающего массива проведены шахтными инструментальными, лабораторными и аналитическими методами. В состав шахтных экспериментов включены: визуальные обследования выработки с выявлением участков повышенных деформаций, определение смещений кровли - почвы контурными реперами и засечками на рамах арочной крепи по длине выработки, исследования трещиноватости массива глубинными реперными станциями, виброакустический контроль пучения пород почвы выработки и нагрузок на крепь. Лабораторными методами определены упругие, прочностные и реологические свойства углевмещающих пород.

Особенностями массива осадочных горных пород в условиях заложения исследуемой выработки следует считать послойное литологическое строение, анизотропию прочностных и деформационных свойств, послойное изменение деформационных характеристик, разупрочнение за пределом прочности, различное исходное напряжённое состояние. Поэтому для обобщения полученных данных и определения параметров напряжённо-деформированного состояния массива использованы возможности комплекса имитационного моделирования «ГЕО-РС (v.5.0)», разработанного ИГТМ НАН Украины для численного анализа геометрически и физически сложных нелинейных

геомеханических систем методом конечных элементов. Проведена серия аналитических расчётов, направленных на изучение процесса деформирования горных пород в кровле и почве выработки в различных горно-технологических ситуациях, и определены параметры зон неупругого деформирования и концентраций напряжений. На всех этапах имитационного моделирования использована многоуровневая дискретизация структурных элементов массива, деформационного и технологического процессов.

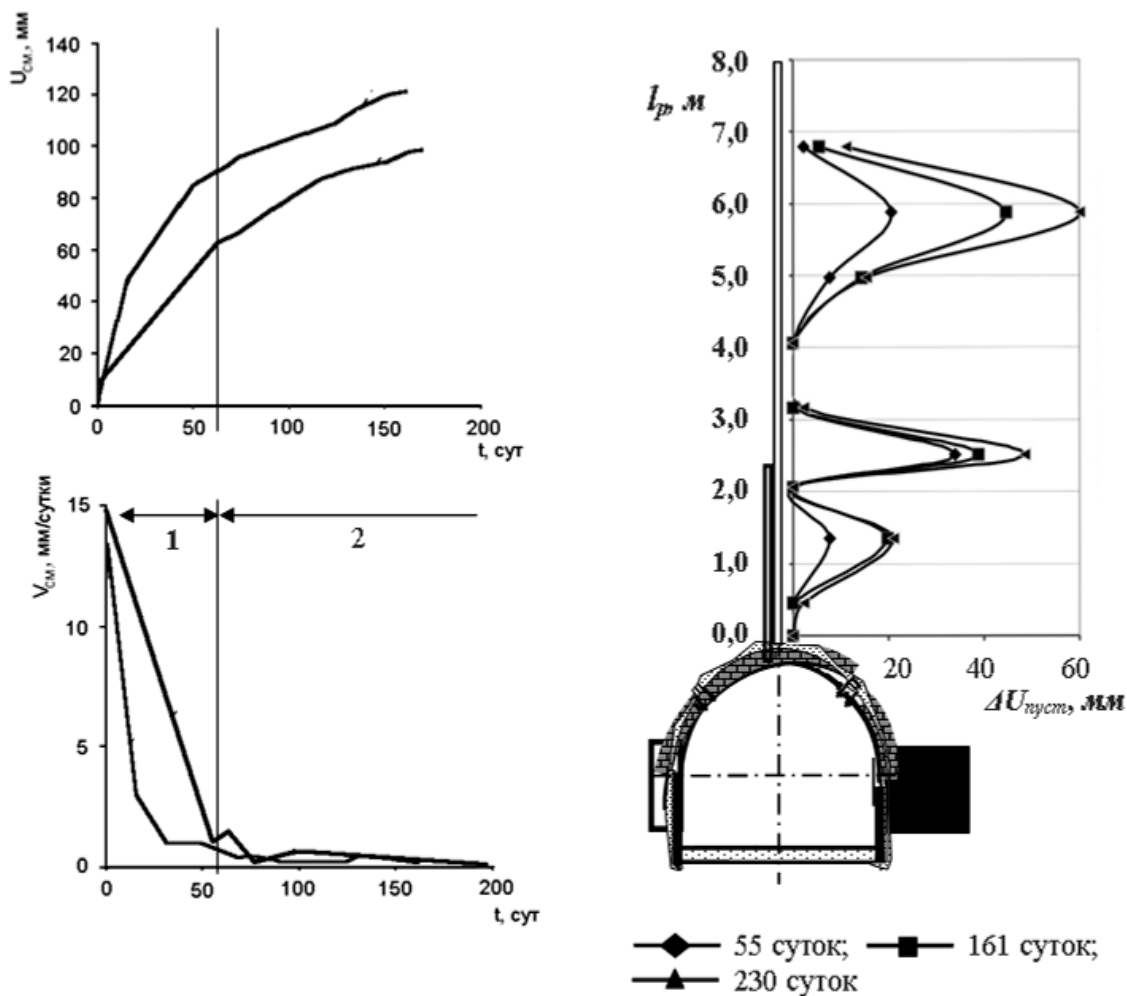
Постановка геомеханической задачи достаточно сложна и выполнена с использованием удобной схемы формирования исходных данных [3], которые полностью соответствуют процедуре метода конечных элементов, с определением конечного количества параметров, имеющих простой физический смысл и удовлетворяющих соответствующей системе алгебраических уравнений при замене континуальной задачи на дискретную, что позволило избежать многих возможных ошибок и правильно оценить получаемые результаты. Свойства пород в зонах разрушения автоматически корректировались, то есть приводились в соответствие с реализовавшимися проявлениями горного давления. Для получения наиболее достоверных результатов в расчётную схему введено максимальное количество известных точечных экспериментальных замеров, проведенных на шахте в определённые отрезки времени. В результате расчётов определены и использованы в качестве интегральных параметров, характеризующих интенсивность проявлений горного давления, площади зон разрыва (раскрытой трещиноватости) и неупругих деформаций, локализация и интенсивность главных сжимающих напряжений, смещения контура выработок.

Для решения данного типа задачи расчётная схема разбита на 1050 симплекс-элементов треугольной формы. В местах предполагаемых высоких градиентов напряжений и в зонах детальных исследований применена неравномерная разбивка со сгущением сети элементов. Значения параметров для каждого литологического слоя устанавливались на основании данных геологической службы шахты и данных ультразвукового определения физико-механических свойств образцов. Упругие динамические параметры образцов определены по предварительно преобразованным и продифференцированным волновым уравнениям и уравнениям теории упругости [4].

Деформирование массива после проведения выработки происходит в течение длительного времени и характеризуется двумя основными периодами активных и установившихся сдвижений (рис. 1а, 1б). В период активных сдвижений средняя скорость расширения трещин в кровле составляет 5-9 мм/сут., тогда как в период установившихся сдвижений 0,01-0,03 мм/сут.

а)

в)



б)

а, б – характер изменения соответственно величины и скорости расслоений пород кровли (1 – в активный период сдвижений; 2 – в установившийся период сдвижений);  
в – расположение и интенсивность расширения участков повышенной трещиноватости

Рис. 1 – Деформационные процессы в кровле газосборной выработки

То есть за 50-60 суток происходит качественное изменение работы системы «крепь-массив». Этот процесс хорошо прослеживается по результатам измерений относительных расширений участков повышенной трещиноватости на глубинной реперной станции ПК 29+7 м., показанных на рис. 1в. Зоны повышенной трещиноватости в кровле имеют выраженный блочный характер с изменяющейся величиной участков дезинтеграции, связанный со сложными структурными изменениями приконтурной заанкерванной (до 2,5м) и удалённой от выработки части массива. При удалении от контура ширина ненарушенных участков увеличивается с 0,5-1,2 м до 2,8-3,5 м. На глубине 4,5-6,3 м происходит расширение участков повышенной трещиноватости. Эффективность работы анкерного крепления определяется по величине расширения трещин в зоне анкерования, которая в три раза ниже, чем в вышележащих породах кровли. Следует отметить основное отличие деформаций в зоне анкерования от вышележащего массива, которое заключается в том, что активный рост трещиноватости в прилегающем к

выработке массиве приостанавливается через 2,5 – 3,0 месяца и активизируется по границе закрепления анкеров. Рост трещин в вышележащем массиве замедляется. Такой эффект характерен при восприятии анкерами полной нагрузки с созданием породной балки без жёсткого закрепления донной части в ненарушенном массиве.

В связи с тем, что выработка представляет собой нагруженную систему, которая постоянно изменяется во времени за счет тесно связанных между собой технологических процессов сооружения, поддержания и эксплуатации, зоны неупругих деформаций в геомеханической модели совмещены с результирующими данными реперных станций на 161 и 230 день наблюдений. Общая ширина зоны повышенной трещиноватости по экспериментальным графикам хорошо согласуется с результатами моделирования. Такой подход позволяет использовать данные о величине относительных расширений участков массива для корректировки расчётных смещений контура выработки.

Важным компонентом обеспечения функциональной надежности способа поддержания является соответствие силовых воздействий и деформационных характеристик элементов охранной конструкции в определённый временной интервал текущей стадии деформирования углепородного массива. Поэтому следует отдельно остановиться на основных этапах промежуточных сравнений результатов численного анализа и реальных деформационных процессов в углепородном массиве, которые заключаются в схематизации и внедрении в геомеханическую модель особенностей и отдельных параметров, определяемых экспериментальными исследованиями и присущими конкретному массиву. Определение текущей стадии деформирования выполнено путём сопоставления аналогичных параметров напряжённо-деформированного состояния породного массива и модели. Взаимосвязь между значениями, полученными с помощью шахтных наблюдений и численным моделированием установлена на основании экспериментальных данных расширения трещин и расположения зон дезинтеграции массива, смещениям и конвергенции кровли-почвы выработки, виброакустическому контролю границы зоны неупругих деформаций в почве вентиляционного ходка.

Границы зон трещинообразования в почве выработки определены виброакустическим профилированием по критическим значениям резонансных частот однородных нормальных волн, возникающих при ударном воздействии на массив, с использованием прибора ИСК-1Ш (разработан ИГТМ НАН Украины). В связи с тем, что массив осадочных горных пород, в том числе однородный трещиноватый массив, является плоскопараллельной или блочной структурой для определения наличия расслоений и их параметров использовано явление резонанса в виброакустических методах контроля. Акустическое поле для первого низкочастотного резонанса сдвиговых волн имеет вид [5]:

$$u_1 = A_1 \exp \left[ i w \left( t - \frac{x}{v_s} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2} \right) \right] \sin \left( \frac{\pi}{a} y \right), \quad \lambda < 2a,$$

где  $u$  – смещение, функция координат и времени;  $A_n$  – амплитуда;  $w$  – циклическая частота;  $t$  – время;  $x, y$  – координаты;  $v_s$  – скорость сдвиговых волн;  $\lambda$  – длина волны;  $a$  – ширина волновода.

Глубина расположения структурных дефектов определена по формуле:

$$a = v_s / 2 f_{кр},$$

где  $a$  – в данном случае глубина отслоения;  $v_s$  – скорость сдвиговых волн;  $f_{кр}$  – критическая резонансная частота.

Виброакустическим контролем установлено, что глубина границы повышенной трещиноватости в почве вентиляционного ходка находится в пределах 0,3-1,4 м, реже – до 2,5 м (рис. 2), что хорошо соответствует параметрам зоны неупругих деформаций определённых по данным моделирования.

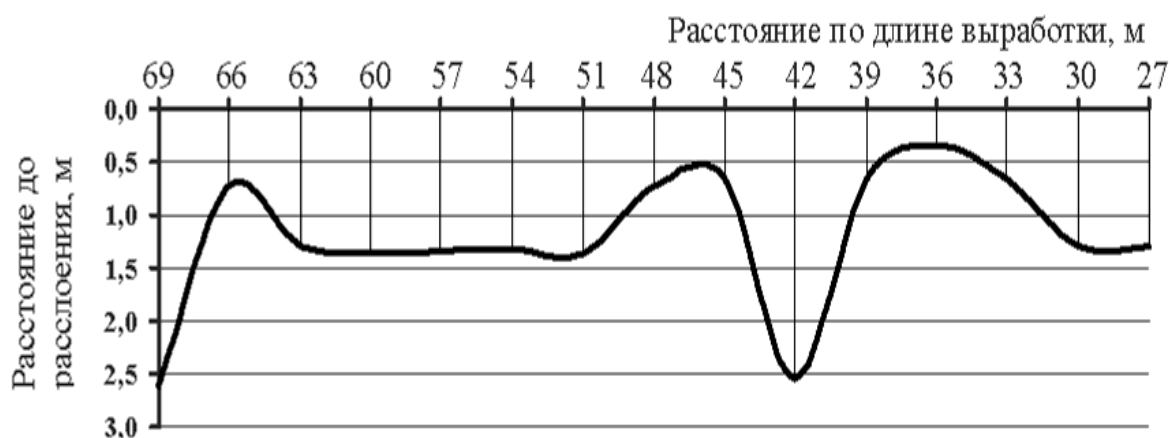
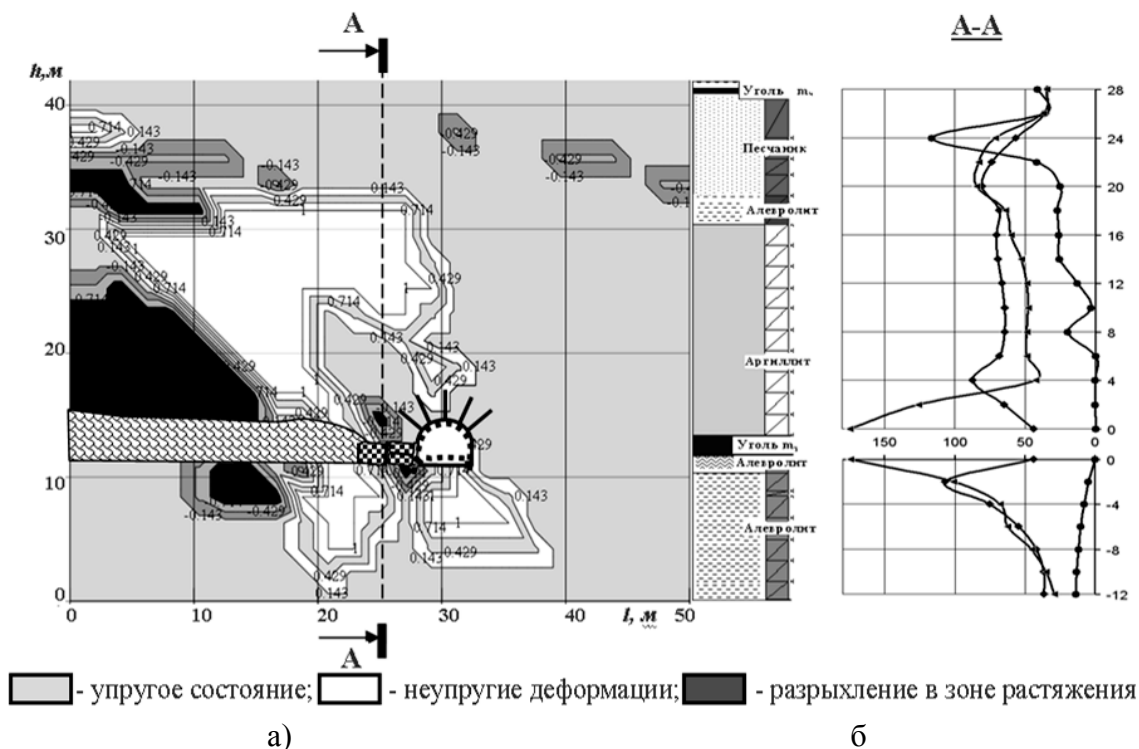


Рис. 2 – Расстояния до границы зоны трещинообразования в почве выработки по результатам виброакустического контроля

Локализация зон разрушения и зон неупругих деформаций на 230 день наблюдений показаны на рисунке 3 а. Установлено, что зона разупрочнения распространилась на высоту до 16-30 м над выработанным пространством от уровня пласта, активизируясь от задней консоли секций механизированной крепи и частично нарушая слой песчаника в кровле.



а – расположение зон неупругих деформаций и разрывных нарушений; б – значения главных сжимающих напряжений по вертикальному сечению

Рис. 3 – Исследование нарушенных зон в окрестности ранее отработанных лав

Одновременно нагрузка, передаваемая через секции на почву пласта, вызывает разрушение слоя почвы на глубину до 2-2,5 м со стороны отработанной лавы до середины вентиляционного ходка. Результаты виброакустического контроля почвы ходка подтверждают данные численного эксперимента. Лучше всего согласуются параметры в боках и почве выработки, где формируется зона разрушения от сжимающих напряжений, а технологические факторы сказываются в меньшей степени. Передача нагрузки через секции установленной механизированной крепи отрицательно сказывается на устойчивости почвы, которая даже при незначительной потере прочности, например при увлажнении, может интенсивно деформироваться в выработку.

Максимальные концентрации главных сжимающих напряжений наблюдаются в кровле над секциями механизированной крепи, в боку и кровле выработки со стороны угольного пласта, в зоне песчаника основной кровли, подработанного очистными работами (рис. 3 б). Максимумы горного давления со стороны угольного пласта расположены на расстоянии от 6 м до 12 м с неравномерными локализациями по контуру выработки. Зоны разгрузки расположены в кровле и почве на различных расстояниях. Сдвигения основной кровли над выработанным пространством происходят от края консоли механизированной крепи. Интенсивность проявлений горного давления оценена по площади зон разрывных нарушений (10,9 %) и зон разупрочнения (21,7 %), а также смещениям контура выработки.

Таким образом, вокруг вентиляционного ходка складывается сложная геомеханическая ситуация, заключающаяся в значительном распространении разрушенных зон в кровле и почве, увеличении напряжений и интенсивном росте деформаций выработки.

Применение жёстких охранных конструкций приводит к увеличению максимальных напряжений в кровле над ними и для глубины разработки 1250 м достигают 130-176 МПа. Происходит разрушение почвы под жёсткими конструкциями и частичные деформации пород в выработку с преобладанием пучения со стороны отработанной лавы.

Процесс извлечения секций механизированной крепи разгружает предельно напряжённую часть массива над механизированной крепью и под ней с максимума до нуля (рис. 3б). В ближней зоне происходит динамическое воздействие на массив, разгрузка от напряжений, разуплотнение пород и увеличение смещений контура газосборной выработки. Это приводит к резкому развитию зоны неупругих деформаций в месте установки литой полосы и дополнительному расслоению пород кровли. Зона разрушения перемещается к контуру выработки. Происходит зависание консоли основной кровли на высоту до 16 м. В почве пласта дополнительные зоны разупрочнения расширяются и углубляются до 4 м, что связано с увеличением нагрузки на угольный пласт и вовлечением дополнительного объёма пород в процесс пучения. Положение осложняется ещё и тем, что весь столб разгруженных отработанной лавой пород «опирается» на секции мехкрепи. Кровля выработки в месте анкерования испытывает динамическую нагрузку, и при недостаточной длине анкеров или некачественной их установке существует опасность отрыва блока кровли по границе зоны анкерования.

При сооружении литой полосы из быстротвердеющих материалов и наборе прочности до 30 МПа, действующие в материале полосы напряжения возрастают до 44 МПа, что приводит к частичному разрушению её краевой части, прилегающей к выработке. Технологический процесс возведения литой полосы активизирует дополнительные нагрузки на участки массива в кровле на расстоянии 4-16 м от обнажения. Напряжения сначала снижаются с 176 МПа до нуля, а затем постепенно восстанавливаются до 82 МПа, а в почве – до 110 МПа. В этих условиях технология возведения литой полосы имеет большое значение и должна предусматривать создание предварительного распора перед извлечением секций, соответствующего распору разгружаемых секций, исключение динамических воздействий при разгрузке секций, обязательного контакта литой полосы с кровлей демонтажной камеры, контроля анкерного крепления. Другими словами, участок монтажа литой полосы требует дополнительных мероприятий по снижению динамики воздействия на массив и проверки качества установки анкеров.

Изменение напряжённого состояния пород основной кровли при возведении литой полосы по горизонтальному сечению показаны на рис. 4. Моделирование проведено для условий установки литой полосы с максимально допустимыми (но не более 100 мм) смещениями кровли. После возведения литой полосы

нагрузки в массиве постепенно восстанавливаются. Зона опорного давления перемещается в направлении газосборной выработки с заметным увеличением величины напряжений до 140 МПа. Поэтому демонтаж секций и возведение литой полосы следует проводить с минимальным интервалом времени. Интенсификация деформационного процесса вызывает увеличение смещений кровли на 14-21 % и почвы на 3,4-19,2 %. Суммарные смещения кровли и почвы хорошо согласуются с величиной измеренной конвергенции.

Из анализа результатов исследований следует, что деформации в почве выработки претерпевают качественные изменения.

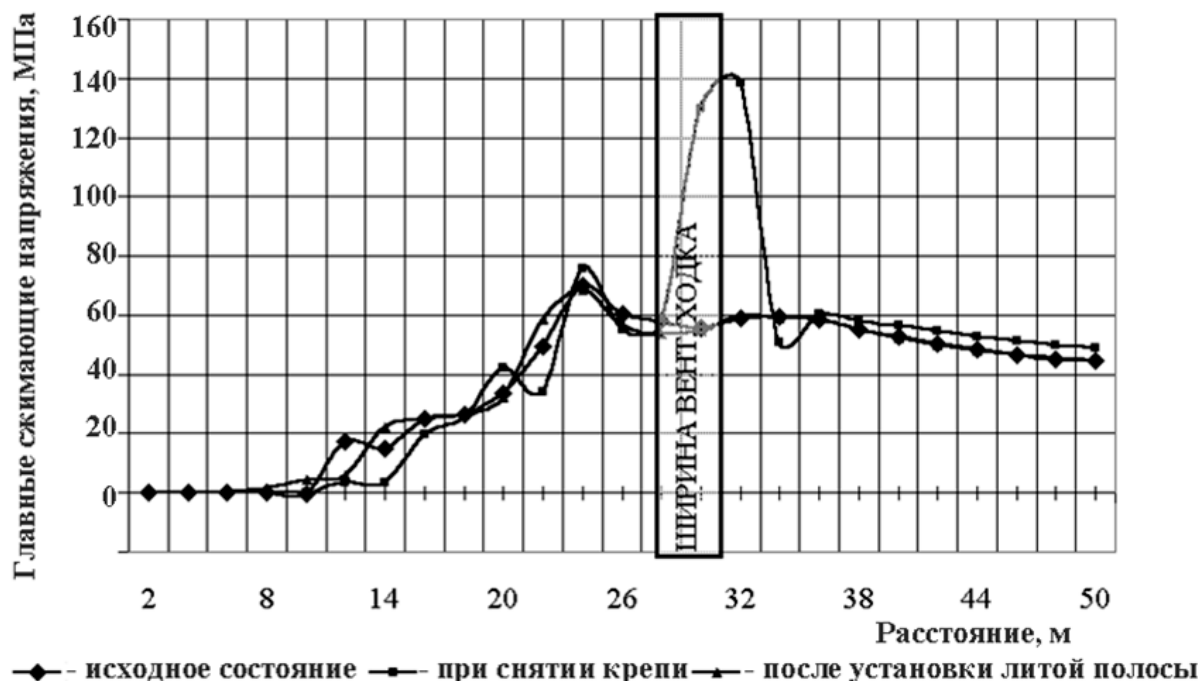
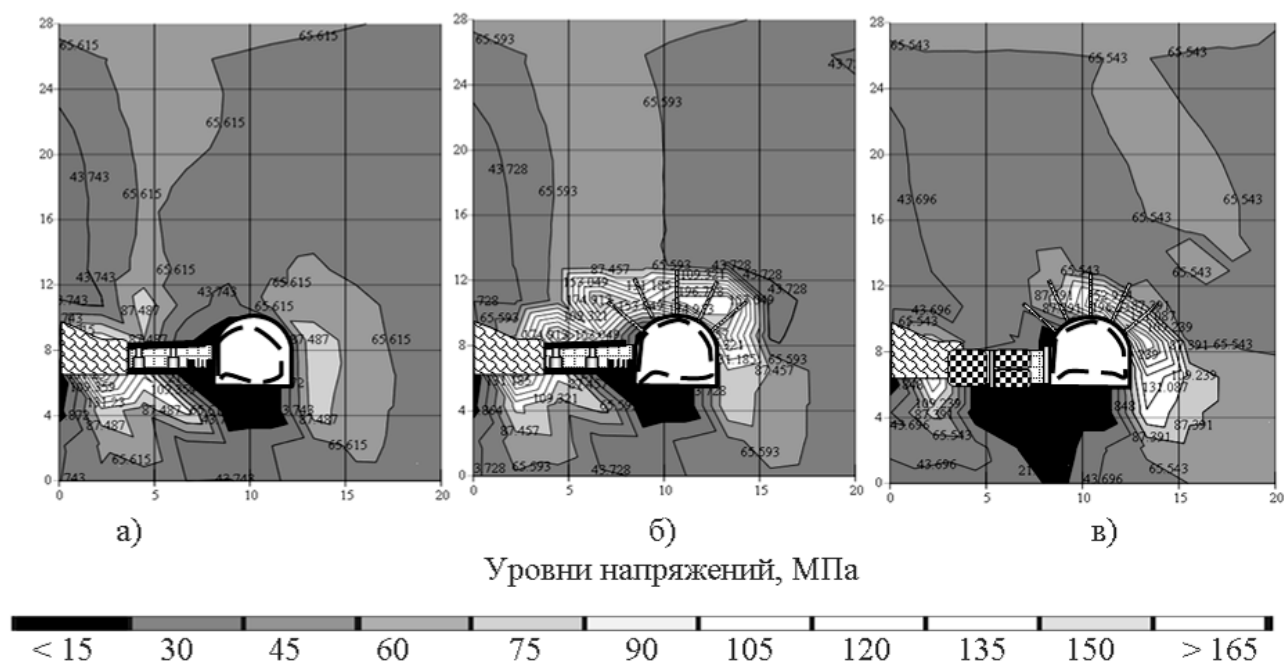


Рис. 4 – Нагруженность основной кровли в поперечном сечении выработки на расстоянии 3 м от верхняка арочной крепи

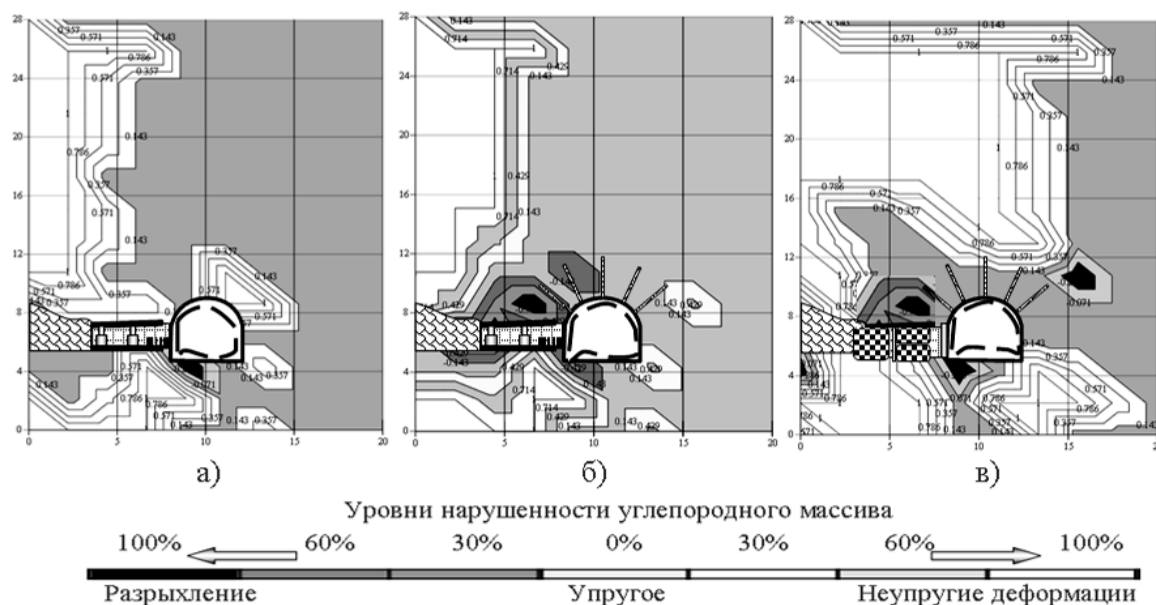
Если до демонтажа крепи пучение преобладало со стороны отработанной лавы, то после демонтажа и установки литой полосы разрушения охватывают и противоположную часть хода с углублением зон повышенной трещиноватости (рис. 5, 6). После проведения выработки, до анкерования, концентрации напряжений сосредоточены на уровне кровли и почвы секций механизированной крепи и в угольном пласте. Зона неупругих деформаций распространена на расстояние 3-5 м от контура выработки (рис. 6 а). Образуется участок разрыхления в почве со стороны выработанного пространства. В случае установки анкеров непосредственно в подготовительном забое зона неупругих деформаций в кровле образуется только локально, разрушения кровли выработки не происходит. Это связано с тем, что заанкерованная породная плита воспринимает на себя часть нагрузки. Состояние почвы хода незначительно улучшается. Возведение литой полосы вызывает оседание породной консоли и развитие зоны неупругих деформаций

(на 10-12 м) в кровле выработки над анкерами.



а – до анкерования с жёстким отпором секций механизированной крепи; б – после установки анкеров; в – после возведения литой полосы и анкерования кровли

Рис. 5 – Влияние элементов комбинированного способа поддержания на распределение главных сжимающих напряжений в массиве



а – без анкерования кровли и жёстким отпором (30-60 суток); б – после установки анкеров непосредственно в подготовительном забое (30-60 суток); в – с возведением литой полосы и анкерованием кровли (прогноз на 200-300 суток)

Рис. 6 – Влияние элементов комбинированного способа поддержания на развитие зон неупругих деформаций

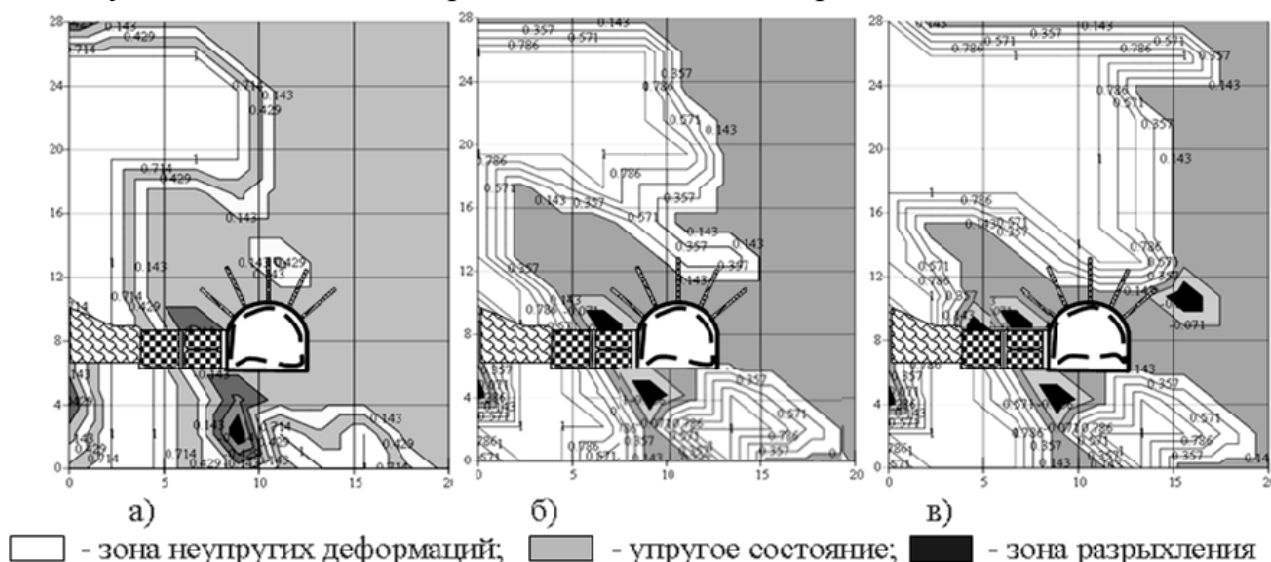
Инструментальные замеры показывают, что проявления горного давления

неравномерны по длине выработки и характеризуются незначительной зональностью. Нагрузка на литую полосу неравномерна как по ширине, так и по длине выработки. Общая тенденция увеличения конвергенции прослеживается по мере удаления от начала вентиляционного ходка.

В связи с тем, что деформационный процесс происходит в течение длительного времени и разделяется на активную и установившуюся стадии, с целью исследования влияния параметров литой полосы на устойчивость газосборной выработки дополнительно проведен анализ напряжённно-деформированного состояния массива для промежуточных этапов деформирования после установки литой полосы и её постепенного нагружения. На рисунках 7 и 8 показаны положение зон неупругих деформаций и концентраций главных сжимающих напряжений при длительном установившемся деформационном процессе.

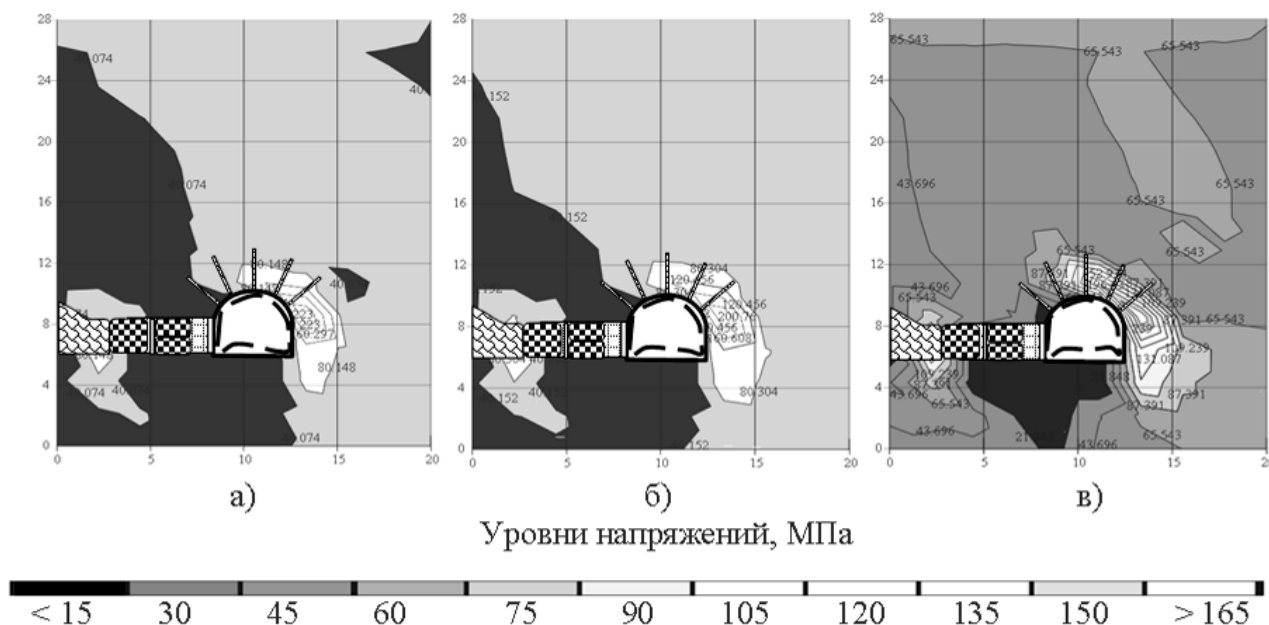
После сооружения литой полосы происходит разгрузка почвы и кровли ходка на значительные расстояния со стороны отработанной лавы, что способствует дополнительному разрыхлению пород почвы. В активной стадии деформирования, когда литая полоса воспринимает до 80% нагрузки зона неупругих деформаций развивается в кровле ходка с перемещением в сторону выработки. Распространённость зон неупругих деформаций в кровле ходка зависит от степени смещения кровли на участке установленной литой полосы.

Перераспределение напряжений после возведения литой полосы приводит к передаче нагрузки на арочную крепь на расстоянии 2,5-3,0 м от монтажной ниши и может затухать при параметрах литой полосы, соответствующих действующим в массиве нагрузкам, в результате чего нагрузка на арочную крепь становится более равномерной по длине выработки и имеет максимумы и минимумы только в месте проведения монтажных работ.



а – при возведении литой полосы (30-60 суток); б – при восприятии литой полосой 80% нагрузки (60-200 суток); в – при восприятии литой полосой полной нагрузки (200-300 суток)

Рис. 7 – Развитие зоны неупругих деформаций после возведения литой полосы



а – при монтаже литой полосы; б – при восприятии 80 % нагрузки;  
в – при восприятии полной нагрузки

Рис. 8 – Перераспределение главных сжимающих напряжений после возведения литой полосы

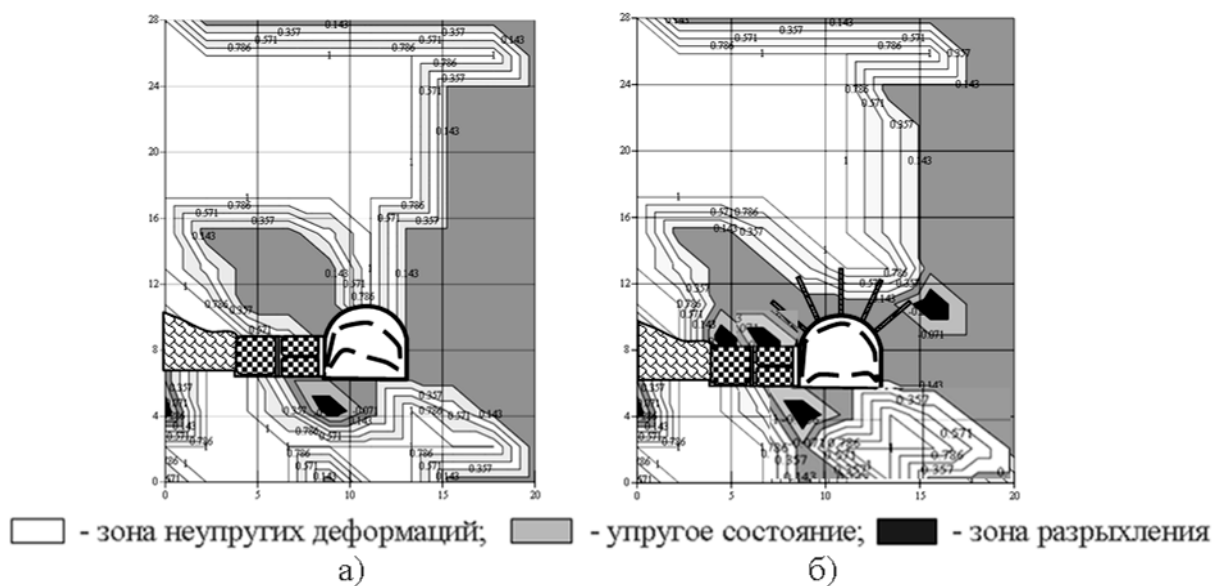
Интенсивность развития и распространённость зоны неупругих деформаций после возведения литой полосы зависит от её способности воспринимать нагрузку зависающей консоли основной кровли в активной стадии деформационного процесса, поэтому устойчивость выработки в значительной мере определяется прочностью и скоростью схватывания материала литой полосы.

Роль анкерования в деформационном процессе вокруг выработки оценена путём сравнения расположения зон неупругих деформаций и смещений контура выработки. Рассмотрена выработка, закреплённая только податливой арочной крепью и та же выработка с дополнительным анкерным креплением (рис. 9). Установлено, что без анкерования зона неупругих деформаций распространяется на контур выработки, вызывая отделение крупных блоков со значительными деформациями выработки.

При установке анкеров в кровле образуется породная плита, препятствующая развитию зоны неупругих деформаций и распространению её на контур выработки. Зоны разрыхления и повышенной трещиноватости отдаляются от выработки и располагаются на некотором расстоянии от её контура (в данных условиях на расстоянии 3-6 м), что способствует, при соблюдении научно обоснованных параметров анкерования, повышению её устойчивости.

Влияние анкерования на устойчивость кровли выработки, подверженной влиянию подработанного массива (выработанного пространства ранее

отработанной лавы) в условиях обширного распространения разрушений, заключается в функции сшивания пород кровли и создании упрочнённого участка углепородного массива.



а – без анкерования кровли; б – при установке анкеров

Рис. 9 – Прогноз распространения зон неупругих деформаций после возведения литой полосы

Таким образом, экспериментальные и аналитические исследования позволили установить влияние каждого из применяемых средств поддержания горной выработки на напряжённо-деформированное состояние газонасыщенного углеводящего массива, обосновать рациональные параметры элементов комбинированного способа поддержания выработок при поэтапном их вовлечении в охранную конструкцию, а также обосновать необходимость осуществления текущего контроля напряжённо-деформированного состояния угленосного массива на всех этапах деформационного процесса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А. Ф., Звягильский Е. Ф. Научно-методические основы и реализация технологии дегазации углепородного массива – «газового горизонта». Материалы Международного энергетического форума «МЭФ-СНГ-2004», г. Ялта, 2004, секция Уголь СНГ, – С. 1-4.
2. Булат А.Ф., Курносое С.А., Слащев И.Н., Ефремов И.А., Бокий Б.В. Экспериментально-аналитический метод прогноза направлений и интенсивности газовых потоков // Геотехническая механика, 2004. – Вып. 59. – С.10-21.
3. Слащева Е.А., Яланский Алекс. А. Автоматизированная статистическая обработка промежуточной и выходной информации программы «Геомеханика» на основе персональной ЭВМ // Геотехническая механика, 2002. – Вып. 40. –С. 102-105.
4. Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах ядра геологоразведочных скважин: РД / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, С.И. Скипочка и др. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 39 с.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука, Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1990. – 432 с.