

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»**

Щербаков Вадим Николаевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ БОРЬБЫ С
ПУЧЕНИЕМ ПОРОД В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
МЕЛЬНИК Владимир Васильевич

Москва - 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Горно-подготовительные работы играют одну из приоритетных ролей в стабильной работе современной угольной шахты.

В настоящее время проблема сохранности подземных выработок в глинистых породах является важнейшей для значительного числа угольных месторождений, в том числе и Кузбасса. Поэтому особое значение при разведке месторождений полезных ископаемых приобретает своевременный и правильный прогноз условий вскрытия и эксплуатации месторождений, и, в частности, прогноз пучения горных пород, что позволит при проектировании предусмотреть необходимые мероприятия для предупреждения этих явлений и тем самым сократить затраты при проведении горных работ.

Особое место в проявлениях горного давления в подготовительных выработках имеет пучение пород почвы. Пучение почвы происходит в незакрепленной части контура выработки, и в некоторых горно-геологических условиях его проявления отличны от проявлений горного давления со стороны кровли и боков. Особенности отличия пучения характерны при залегании в почве угольного пласта пластичных глинистых пород.

Изменение интенсивности пучения почвы в этом случае определяется пластическими свойствами глин, зависящими от ее влажности. При высокой влажности горного массива длительная прочность глин уменьшается, вследствие чего даже при низких напряжениях глины могут деформироваться упруго-вязко-пластически без разрушения. С уменьшением влажности поведение глин приближается по своему характеру к глинистым сланцам и упруго-вязко-пластическое течение может сопровождаться образованием микро- и макротрещин, а также увеличением объема пучащих пород.

Смещения пород почвы подготовительных горных выработок — следствие выдавливания и расширения пород. Высокие коэффициенты разрыхления пород в почве выработки объясняются увеличением объема пород при разрушении и выдавливании глины из-под целиков.

Пучение глинистой почвы горной выработки возникает тогда, когда породы почвы менее прочны, чем порода в боках и кровле выработки. Более прочные породы, находящиеся на основании из менее прочных пород, играют роль штампов и деформируются существенно меньше по сравнению со слабыми породами основания. Выдавливание горной породы из-под штампов вызывает пучение почвы.

Самым распространенным способом борьбы с пучением, применяемым на шахтах Кузбасса, является подрывка почвы. Подрывка почвы позволяет бороться с последствиями пучения, при этом она достаточно трудоемкая операция, и активизирует процесс пучения. После подрывки почвы, спустя некоторое время, пучение почвы проявляется с большей интенсивностью.

В связи с этим, разработка технологических решений для борьбы с пучением пород почвы выработки для обеспечения ее сохранности является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является разработка технологических решений для борьбы с пучением пород в подготовительных выработках, на основе применения податливых межлавных целиков и направленного гидроразрыва тяжелой кровли.

Идея работы заключается в применении податливых межлавных целиков, вместо устойчивых (жестких), в комплексе с направленным гидроразрывом основной кровли по предварительно сформированным трещинам в массиве с помощью удлиненных кумулятивных зарядов.

Задачи исследований:

1. Исследование напряженно-деформированного состояния горного массива и оценка его влияния на пучение пород почвы подготовительных горных выработок.
2. Исследование влияния изменяющихся во времени напряжений в массиве на деформированное состояние и запас прочности угольных целиков.

3. Аналитические исследования разрушения горных пород удлинёнными кумулятивными зарядами (УКЗ). Разработка конструкции УКЗ для формирования «первичной трещины» в массиве горных пород.

4. Исследование процесса и определение параметров направленного гидроразрыва пород кровли по сформированной «первичной трещине».

5. Разработка технологических решений для борьбы с пучением в подготовительных горных выработках, повышающих их сохранность.

Методы исследования. При выполнении научных исследований использовался комплексный метод, включающий в себя анализ литературных источников по теме работы, аналитические исследования кумулятивного эффекта для разрушения пород, а также устойчивости угольных целиков, шахтные экспериментальные исследования по оценке эффективности разработанного способа борьбы с пучением пород с применением новых технических средств контроля горного массива, методы статистической обработки результатов лабораторных и натурных исследований.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Применение податливых целиков, параметры которых определяются по разработанной методике, снижает интенсивность пучения пород почвы подготовительных горных выработок.

2. Направленный гидроразрыв тяжелой кровли, по предварительно сформированным трещинам, вследствие воздействия специальных кумулятивных зарядов, как способ управления состоянием массива горных пород, способствует обрушению зависающей консоли кровли, над податливым целиком, со стороны выработанного пространства очистного забоя, что обеспечивает снижение интенсивности пучения пород почвы и обеспечивает сохранность подготовительных выработок.

3. Выбор способа предотвращения пучения пород почвы подготовительных горных выработок должен производиться с учетом его экономической эффективности для различных систем разработки, определяемой по разработанной методике, при этом затраты на любое мероприятие по предотвращению пучения почвы должны быть меньше затрат на подрывку пород почвы.

Новизна разработанных научных положений заключается в следующем:

– установлена зависимость допустимых напряжений на целики от скорости отработки запасов на выемочном участке, доли первоначальных напряжений в массиве и реологических свойств угля в целике;

– установлена зависимость глубины проникновения кумулятивного ножа в горную породу от параметров УКЗ и свойств применяемого ВВ;

– установлены параметры направленного гидроразрыва тяжелой кровли, после формирования первичной трещины в массиве, вследствие взрыва в скважине УКЗ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, подтверждается:

– значительным объемом шахтных экспериментальных исследований;

– удовлетворительной сходимостью результатов аналитических исследований длительной прочности и, соответственно, допустимых напряжений на целик и шахтных экспериментальных исследований;

– положительным опытом внедрения способа борьбы с пучением пород почвы в горных выработках.

Научное значение работы заключается в исследовании влияния изменяющихся во времени напряжений на деформированное состояние и запас прочности податливых целиков, а также в разработке математической модели функционирования кумулятивных зарядов и исследовании процесса формирования «первичной трещины» в массиве при взрыве УКЗ.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– разработан способ предотвращения пучения пород почвы выработки, что способствует повышению устойчивости горной выработки;

- разработана конструкция удлиненного кумулятивного заряда;
- разработана методика расчета параметров податливых межлавных угольных целиков;
- разработана методика оценки экономической эффективности выработанного способа предотвращения пучения в горной выработке.

Реализация работы. Результаты проведенных исследований использованы при проведении конвейерного штрека 555 в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-УГОЛЬ».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных симпозиумах «Неделя горняка» НИТУ МИСиС (г. Москва, 2019-2021 гг.), на научных семинарах Кемеровского филиала АО «ВНИМИ» (г. Кемерово, 2018-2020 гг.).

Личный вклад автора заключается в постановке задачи исследования, в разработке способа предотвращения пучения пород почвы, разработке методики шахтных исследований, организации и проведении экспериментальных работ на шахте «Чертинская-Коксовая», в обработке материалов экспериментов и получении основных научных результатов исследований.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 статей в трех изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и в четырех изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, содержит 13 таблиц, 45 рисунков, список использованных источников из 86 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Вопросам разработки различных технологических решений для борьбы с пучением пород в подготовительных выработках, при проведении их в сложных горно-геологических условиях, было посвящено большое количество работ ведущих научных организаций ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского, МГИ, МГГУ, Горный институт НИТУ «МИСиС», ВНИМИ, КузНИУИ, ШахтНИУИ, ДонУГИ и др.

В качестве основополагающих следует отметить работы К.А. Ардашева, И.В. Баклашова, А.С. Бурчакова, Ю.И. Черняк И.Л., Борисовца, Н.С. Булычева, В.В. Васильева, В.В. Давыдова, Б.А. Картозия, Г.А. Каткова, О.И. Казанина, М.А. Розенбаума, В.А. Лыткина, А.П. Максимова, А.П. Широкова, Е.И. Шемякина и др. Однако, несмотря на научно-технический прогресс, задача повышения устойчивости выработок, особенно при проведении их по породам, склонным к пучению, полностью не решена.

Опыт работы шахт Кузбасса показывает, что устойчивость подготовительных выработок, когда последние пройдены по породам, склонным к пучению, в сильной степени зависит от того, где по отношению к элементам разрабатываемой части пласта пройдены эти выработки и какими способами они охраняются от горного давления.

Для охраны горных выработок от пучения пород почвы, пройденных по угольным пластам, часто оставляют угольные целики, прилегающие к выработке.

Существующие методы расчета целиков не учитывают изменений прочностных и деформационных свойств угля (пород), происходящих с течением времени, т. е. не учитывают реологического фактора, хотя значение его в большинстве случаев велико. Изменение прочности во времени наглядно иллюстрируется кривой длительного сопротивления, приведенной на рисунке 1. Согласно приведенным данным, при длительном действии нагрузки, которое имеет место в реальных условиях работы целиков, разрушение происходит при нагрузке, меньшей временного сопротивления $\sigma_{вр}$ пород на сжатие. Снижение прочности во времени при длительном действии постоянной нагрузки для большинства материалов составляет 50-70%. В опытах Манасевича, например, образцы каменного угля разрушались на 49-й день под нагрузкой, составляющей 78% $\sigma_{вр}$, а через 174-55% $\sigma_{вр}$, что указывает на значительное влияние фактора времени на прочность материала.

Однако при увеличении времени действия нагрузки сопротивление снижается не безгранично, а стремится к некоторой постоянной величине $\sigma_{д.с.}$, называемой пределом долговременного сопротивления пород сжатию (растяжению). Величина $\sigma_{д.с.}$ равна асимптоте кривой длительного сопротивления (см. рисунок 1).

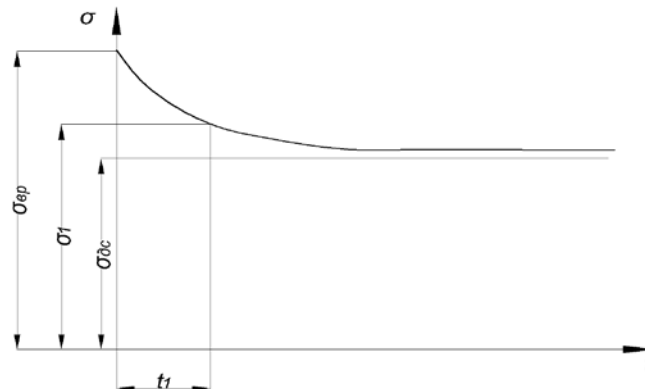


Рисунок 1 – Изменение прочности целика во времени

Весь диапазон изменения нагрузки от нуля до $\sigma_{вр}$ делится асимптотой $\sigma_{д.с.}$ на две различные области - нижнюю ($\sigma < \sigma_{д.с.}$), в которой прочность не снижается, как бы долго ни действовала нагрузка, и верхнюю ($\sigma > \sigma_{д.с.}$), в которой неизбежно разрушение. Это подтверждается экспериментальными данными, полученными при исследовании различных материалов (например, бетона, пластика, текстолита, полимеров, древесины и др.).

Указанные области весьма наглядно различаются и по характеру изменения деформаций во времени под действием постоянной нагрузки. Если нагрузка не превышает определенной величины $\sigma_{д.с.}$, изменение деформаций во времени происходит по асимптотическому закону при уменьшающейся во времени скорости, а сама деформация без разрушения материала достигает постоянного значения, которое зависит от величины приложенной нагрузки. Если величина нагрузки выше значения $\sigma_{д.с.}$, процесс развития деформаций во времени заканчивается разрушением; причем начиная с определенной величины увеличение деформации во времени происходит по линейному закону.

Горные породы имеют дефекты внутреннего строения (пористость, трещиноватость).

При воздействии внешней нагрузки в окрестности дефектов строения возникают концентрации напряжений, которые приводят к локальным нарушениям сплошности материала, что с течением времени ускоряет развитие микротрещиноватости. Как только будет достигнута определенная степень трещиноватости, начинается распад материала на отдельные части - разрушение.

Представление о разрушении горной породы длительной нагрузкой позволяет оценить изменение прочностных свойств материала с помощью закона суммирования усталостных повреждений. Сущность его заключается в следующем:

Под действием нагрузки в материале происходят внутренние изменения структуры, характеризующиеся как повреждение. Величина повреждения до момента действия нагрузки принимается равной нулю. Величина повреждения к периоду разрушения принимается равной единице. Доля повреждения зависит от величины действующей нагрузки и времени ее действия.

Закон суммирования усталостных повреждений у ряда авторов нашел различное математическое отображение. Наиболее общая формула записи закона следующая:

$$D_n = k(\sigma)t^{m(\sigma,t)}, \quad (1)$$

где D_n – доля повреждения; σ - удельная нагрузка; t - время действия нагрузки от момента ее приложения до разрушения; m , k - постоянные величины, характеризующие деформационно-прочностные свойства материала и зависящие от нагрузки, времени и действия.

Предположим, что постоянные m и k зависят только от свойств данного материала, тогда уравнение (1) будет иметь вид

$$D_n = k\sigma t^m. \quad (2)$$

В момент разрушения, когда $D_n = 1$, имеем

$$\sigma = \sigma_0 t^{-m}. \quad (3)$$

Формула (3) характеризует изменение прочности материала во времени.

Ползучесть пород характеризуется уравнением теории наследственности Вольтерра - Работнова:

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma(t) + \int_0^t k(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad (4)$$

где σ - напряжение; $\varphi(\varepsilon)$ - функция мгновенного нагружения; $k(t-\tau)$ - ядро наследственности.

Исследования физических свойств пород показывают, что $\varphi(\varepsilon)$ является ограниченной функцией типа

$$\varphi(\varepsilon) = b - (b-a)e^{-\beta\varepsilon}, \quad (5)$$

где коэффициент b характеризуется разрушающим напряжением R , определяемым экспериментальным путем ($b=R$)

Так как коэффициент a для пород сравнительно мал, уравнение (5) можно представить в виде

$$\varphi(\varepsilon) = R(1 - e^{-\beta\varepsilon}). \quad (6)$$

Введение ограниченной функции мгновенного нагружения $\varphi(\varepsilon)$ оправдано лучшим соответствием аналитической функции эксперименту при быстром нагружении. Кроме того, это позволяет сформулировать феноменологический критерий прочности - условие разрушения. Функция φ асимптотически стремится к величине $b = \text{const}$ и очень быстро возрастает вблизи нуля, уже при сравнительно небольших деформациях ($\varepsilon = 0,1 \div 0,15$, $\varphi(\varepsilon_n) \approx b$). Очевидно, при линейном напряженном состоянии разрушение наступает при $\sigma = b$. Поэтому можно положить, что разрушение наступает при $\varepsilon = \varepsilon_n = \infty$, так как при $\varepsilon = \varepsilon_n$ и $\varepsilon_n = \infty$ результаты практически не отличаются.

Стремление деформации к бесконечности в локальной области имеет ясный физический смысл – разрушение. Примем в качестве условия разрушения

$$\varepsilon = \infty \quad (7)$$

Соответствие теории эксперименту (если теория обладает общностью) достигается правильным подбором коэффициентов $k(t-\tau)$ и $\varphi(\varepsilon)$. Удачный выбор одного из этих коэффициентов позволяет предъявить менее жесткие требования к подбору второго. Вводя $\varphi(\varepsilon)$, тем самым принимаем определенную нелинейность в теорию наследственности. Это позволяет принять в качестве ядра ползучести экспоненту

$$k(t-\tau) = A\alpha e^{-\alpha(t-\tau)}. \quad (8)$$

Как показывает эксперимент, ядро ползучести (8) удовлетворительно описывает деформирование угля.

Рассмотрим расчет целиков в предположении, что вес вышележащей толщи воспринимается целиками мгновенно и полностью. При этом получено время разрушения целиков в зависимости от действующей нагрузки. Введение критерия прочности позволило установить допустимые нагрузки, при которых целики в течение ограниченного или неограниченного срока службы будут устойчивыми.

Из уравнений (5), (6) – (8) следует:

$$\sigma_{\text{дл}} \leq \frac{R}{1+A}, \text{ или } \sigma_{\text{дл}} \leq \frac{R}{1+A(1-e^{-at})}, \quad (9)$$

где коэффициент $(1+A)$ представляет собой запас прочности на фактор времени или коэффициент статической усталости материала.

Предположение о том, что вес вышележащей толщи воспринимается целиками мгновенно и полностью, принимаем в виде первого приближения.

Известно, что по мере подвигания очистных работ формируется зона опорного давления, в результате которого целики у линии фронта очистных работ воспринимают не полностью вес вышележащей толщи. По мере удаления от линии фронта очистных работ нагрузка на целики постепенно возрастает и только на некотором расстоянии от забоя целики воспринимают полный вес вышележащей толщи.

Таким образом, условие длительной прочности, представленное уравнением (8), является первым грубым приближением. Поэтому важно знать насколько изменится это условие в зависимости от изменения нагрузки на целики во времени. Рассмотрим типичный случай, когда целики начинают воспринимать нагрузку от нуля до максимального значения по закону, который устанавливается на основании экспериментальных исследований:

$$\sigma(t) = \sigma_m(1 - e^{-ct}), \quad (10)$$

где σ_m - максимальное напряжение от веса вышележащей толщи; c - коэффициент стабилизации напряжений.

При этом предполагается, что забой, под которым в данном случае подразумевается линия фронта очистных работ, подвигается с определенной, наперед заданной постоянной скоростью. Неравномерность поля напряжений не учитывается. Корректировка результатов в первом приближении возможна с помощью коэффициента концентрации напряжений.

Подставляя соответствующие значения деформаций в уравнение (4) и решая его относительно $\varepsilon(t)$, получаем

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\beta} \ln \frac{1}{1 - \frac{\sigma_m}{R} \left[1 + A(1 - e^{-at}) - e^{-ct} - A \frac{\alpha}{\alpha - c} (e^{-ct} - e^{-at}) \right]}. \quad (11)$$

На основании уравнения (8) запишем условие длительной прочности

$$(\sigma_m)_{\text{дл}} \leq \frac{R}{1 + A(1 - e^{-at}) - e^{-ct} - A \frac{\alpha}{\alpha - c} (e^{-ct} - e^{-at})}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) видим, что коэффициент запаса длительной прочности отличается от мгновенной. Это значит, что при плавном изменении нагрузки по экспоненциальному закону (10) целики способны некоторое время выдержать большую нагрузку, чем при мгновенном возрастании нагрузки.

Рассмотренный выше случай изменения напряжения по закону (10) не является обязательным. Так, К.Х. Хефер считает, что первоначальные напряжения в целиках не равны нулю, как это принято по условию (10), а изменяются по закону

$$\sigma(t) = \sigma_{\text{пол}}(1 - ke^{-ct}), \quad (13)$$

где коэффициент k показывает долю первоначальных напряжений от величины конечных напряжений, k изменяется от нуля до единицы. При $k = 0$ получим исходное положение, при $k = 1$ получим уравнение (10). Таким образом, уравнение (13) выражает более общий закон изменения напряжений в функции времени.

Подставляя соответствующее значение деформаций в уравнение наследственности Вальтера-Работнова (4) и решая его относительно $\varepsilon(t)$, получаем

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\beta} \ln \frac{1}{1 - \frac{\sigma_{\text{пол}}}{R} \left[1 + A(1 - e^{-at}) - ke^{-ct} - A \frac{k\alpha}{\alpha - c} (e^{-ct} - e^{-at}) \right]}. \quad (14)$$

Если $t = 0$,

$$\varepsilon[t(0)] = \frac{1}{\beta} \ln \frac{1}{1 - \frac{\sigma_{\text{пол}}}{R} (1 - k)}. \quad (15)$$

Из уравнения (14) получим условие длительной прочности целиков

$$(\sigma_{\text{пол}})_{\text{дл}} \leq \frac{R}{1 + A(1 - e^{-at}) - ke^{-ct} - A \frac{\alpha k}{\alpha - c} (e^{-ct} - e^{-at})}. \quad (16)$$

Из уравнения (16) следует, что допустимые напряжения на целики зависят от скорости подработки, доли первоначальных напряжений и реологических параметров слагающего целик материала. Таким образом, зная реологические свойства материала целика, параметры ползучести A и α и закон изменения напряжения в функции времени или сознательно, изменяя его (путем изменения скорости выемки), можем рассчитать допускаемые напряжения на целики. Определив значение натуральных разрушающих напряжений R и задавшись скоростью выемки, можно регулировать потери угля в целиках и выбирать в каждом конкретном случае оптимальные параметры системы разработки для конкретных горногеологических условий.

Проведенные исследования изменяющихся во времени напряжений на деформированное состояние и запас прочности угольных целиков позволяют утверждать, что:

- введение функции мгновенного нагружения и критерия разрушаемости в уравнение наследственности Вольтерра - Работнова позволяет решить задачу расчета длительной прочности целиков;
- условия длительной прочности и, соответственно, допускаемые напряжения на целики зависят от характера изменения приложенных нагрузок в функции времени;
- допускаемые напряжения, полученные при $\sigma(t) = \sigma_0 = \text{const}$ меньше напряжений, полученных при условии плавного нарастания от нуля до максимума. Это свидетельствует о возможности регулирования прочности целиков путем изменения скорости выемки;
- методика расчета допускаемых напряжений по условию нагружения сравнительно проста. Хотя имеющиеся экспериментальные данные подтверждают возможность использования предлагаемой методики расчета длительно устойчивых целиков.

При решении задач механики сплошных сред, связанных с выбором эффективных параметров поддержания подготовительных выработок широкое применение приобретают численные способы, среди которых наиболее распространен метод конечных элементов (МКЭ). Благодаря развитию электронно-вычислительной техники МКЭ стал достаточно надежен и прост. Поэтому его использовали при решении задачи определения параметров охраны подготовительных выработок целиками.

Влияние очистной выемки на напряжённо-деформированное состояние вмещающего массива ограничено зоной полных сдвижений пород, формирующейся в кровле извлекаемого пласта. Высота этой зоны

$$h = \frac{m}{k - 1}, \quad (17)$$

где m - мощность извлекаемого пласта, м; k - коэффициент разрыхления обрушенных пород, равный 1,025 для пород средней устойчивости, и 1,03 - для устойчивых пород.

Размер рассматриваемой области в почве пласта принят равным рассчитанному для кровли. Горизонтальные размеры исследуемой области выбирали из условия их превышения шага обрушения кровли, представленной породами средней обрушаемости типа песчано-глинистого и песчанистого сланцев. Шаг обрушения таких пород равен 25-30 м.

В соответствии с основным принципом МКЭ рассматриваемый массив представляется в виде отдельных (конечных) элементов, связанных в узлах между собой.

Подготовительная выработка арочной формы охраняется с одной стороны угольным массивом, а с другой (со стороны лавы) - целиком. Поскольку основной интерес представляло состояние пород в приконтурной зоне выработки, размеры элементов принимали меньше, чем в остальной области, что упрощало решение задачи (уменьшилось время счета на ЭВМ).

Распределенную нагрузку на границах исследуемой области заменяли сосредоточенными силами, приложенными в узлах элементов. Для расчета полученной системы использовали МКЭ в форме перемещений. Решение задачи при этом сводилось к следующим основным этапам: сборка общей матрицы жесткости, формирование векторов нагружений, решение системы линейных уравнений и вычисление внутренних усилий.

Решение производили с помощью программного комплекса NDCGaz 29-05-2020.

В результате решения задачи получены величины перемещений отдельных точек на контуре выработки и ее окрестности, а также внутренние усилия, возникающие в конечных элементах. Напряженно-деформированное состояние массива, вмещающего подготовительную выработку, обусловлено геомеханическими условиями: глубиной заложения, физико-механическими характеристиками боковых пород, мощностью пласта и параметрами средств поддержания выработки (типом и механическими характеристиками крепи, параметрами средств охраны). Ниже приведены основные параметры, варьируемые в численных расчетах, и их значения для условий ш. «Чертинская-Коксовая».

Глубина заложения выработки, м	600
Мощность пласта, м	2,0
Породы кровли пласта	Алевролиты с $E = 4 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,26$; песчаники с $E = 6,4 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,3$
Породы почвы пласта	Алевролиты с $E = 4 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,26$; аргиллиты с $E = 2,3 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,36$
Структурное ослабление	0,5
Боковое давление	0,5
Крепь выработки	Анкерная А20В; $l = 2,8$ м
Ширина податливого целика, м	7,78

Примечание: E - модуль упругости материала; ν - коэффициент Пуассона.

Параметры охраны подготовительной выработки податливым целиком выбирали на основании сравнения величин и характера перемещений узлов конечных элементов на контуре выработки, а также распределения напряжений в массиве горных пород. Критерием при этом являлось условие минимума смещений породного контура выработки.

На рисунке 2 представлена схема к расчету напряженно-деформированного состояния горного массива при проведении конвейерного штрека 555.

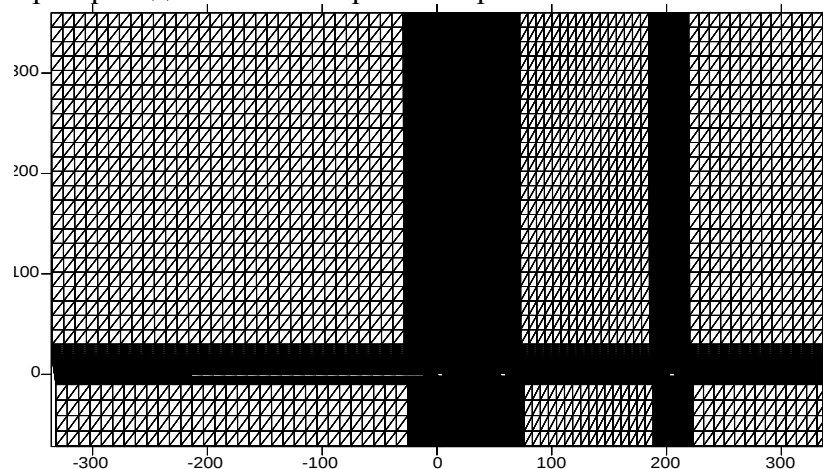


Рисунок 2 – Схема к расчету напряженно-деформированного состояния горного массива (Программа NDCGaz 29-05-2020)

Корректировка исходных деформационных и прочностных характеристик угля и пород проводилась с использованием отношения остаточной прочности угля или пород к их исходной прочности.

Отношение остаточной прочности угля (S_1) к их исходной прочности (S_0) определяется по зависимости:

$$K_{\text{оп}} = \sigma_{\text{экс}} / \sigma_{\text{мкэ}} = S_1 / S_0, \quad (18)$$

где $K_{\text{оп}}$ - отношение остаточной прочности угля или пород к их исходной прочности;

$\sigma_{\text{экс}}$ - нормальные напряжения по диаграмме напряжения-деформации;

$\sigma_{\text{мкэ}}$ - нормальные вертикальные напряжения, вычисленные методом конечных элементов, по модели упругого деформирования угля или пород.

За исходную принимается прочность при однократном нагружении образца на прессе, строится график напряжение-деформация и максимальное напряжение принимается за начальную (исходную) прочность.

Величина исходной прочности S_0 делится на n интервалов, допустим $n = 3$, $n = 5$ или $n = 10$ в зависимости от способа испытаний. Допустим $n = 5$.

Затем изготавливаются $n = 3, 5$ или 10 одинаковых образцов и определяется величина цикла $d_s = S_0 / n$.

Осуществляются испытания каждого образца по схеме:

Первый цикл до величины d_s , сброс давления, потом повторная нагрузка этого же образца до разрушения. Полученная максимальная нагрузка S_1 является остаточной прочностью. Можно сразу вычислить отношение остаточной прочности к исходной $R_1 = S_1 / S_0$.

Второй цикл до величины $2xd_s$, сброс давления, потом повторная нагрузка этого же образца до разрушения. Полученная максимальная нагрузка S_2 является остаточной прочностью. Можно сразу вычислить отношение остаточной прочности к исходной $R_2 = S_2 / S_0$.

Третий цикл до величины $3xd_s$, сброс давления, потом повторная нагрузка этого же образца до разрушения. Полученная максимальная нагрузка S_3 является остаточной прочностью. Можно сразу вычислить отношение остаточной прочности к исходной $R_3 = S_3 / S_0$ и т.д. до всех n образцов.

В итоге получается график(таблица) S_0, R_i .

После решения задачи МКЭ определяются упругие напряжения S_0 и по ним по графику выбираются значения R_i .

Результаты расчетов представлены на следующих рисунках:

- рис. 3 – Отношение остаточной прочности к исходной (упругопластическое решение);
- рис. 4 – Вертикальные смещения (упругопластическое решение);
- рис. 5 – Горизонтальные смещения (упругопластическое решение);

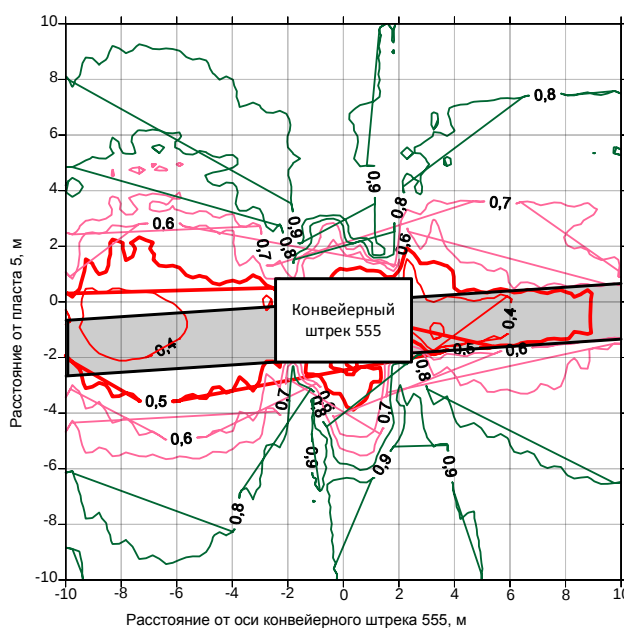


Рисунок 3 – Отношение остаточной прочности к исходной

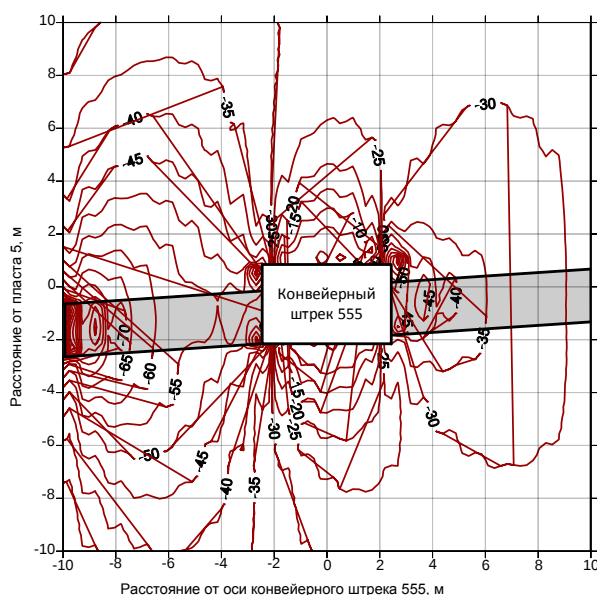


Рисунок 4 - Вертикальные напряжения, МПа

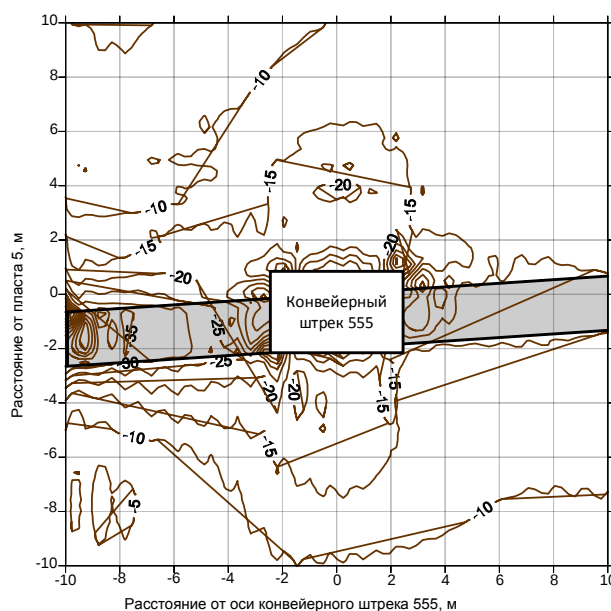


Рисунок 5 – Горизонтальные напряжения, МПа

На шахтах России возникает острая необходимость в изыскании способов сохранения повторно используемых выработок в нормальном эксплуатационном состоянии. Особенно это касается пластов с труднообрушаемыми породами основной кровли, зависание которых в выработанном пространстве на больших площадях приводит к значительным величинам смещений кровли, увеличению нагрузок на крепь выработок и интенсификации пучения почвы. В результате совместного проявления данных отрицательных факторов сохраняемая выработка за очистным забоем часто приходит в аварийное состояние с деформацией крепи и восстановлению в большинстве случаев не подлежит.

Для решения этих вопросов разработан взрывогидравлический способ разрушения прочных пород кровли, в основу которого положено образование начальных трещин взрыванием небольшого по весу удлиненного кумулятивного заряда (УКЗ), размещенного в рабочих скважинах.

После образования начальной трещины производится герметизация данного участка скважины с последующим нагнетанием жидкости по высоконапорному трубопроводу от насоса типа УНГ, т.е. осуществляется гидроразрыв пород основной кровли.

Применение УКЗ позволяет образовывать начальные трещины в горном массиве. Для этой цели требуется разработка соответствующих конструкций кумулятивных зарядов ВВ.

Разгрузка приконтурного массива горных пород от повышенного горного давления предусматривает отсечение зависающей консольной части плиты основной кровли над выработанным пространством движущейся лавы. Это позволяет уменьшить величины опускания кровли, значительно снизить концентрацию напряжений вблизи контура угольного целика, а, следовательно, уменьшить величины пучения почвы.

Отсечение зависающих консолей производится применением взрывогидравлического способа, позволяющего впереди лавы образовать поверхности разрушения, по которым впоследствии происходит в выработанном пространстве обрушение пород основной кровли.

Для образования начальной трещины была разработана конструкция продольного кумулятивного заряда ВВ, приведенная на рисунке 6. Длина УКЗ – 1,2 м. Вес заряда – 1,2 кг в качестве ВВ используется аммонит Т-19, допущенный к применению на шахтах, опасных по взрывам метана и угольной пыли.

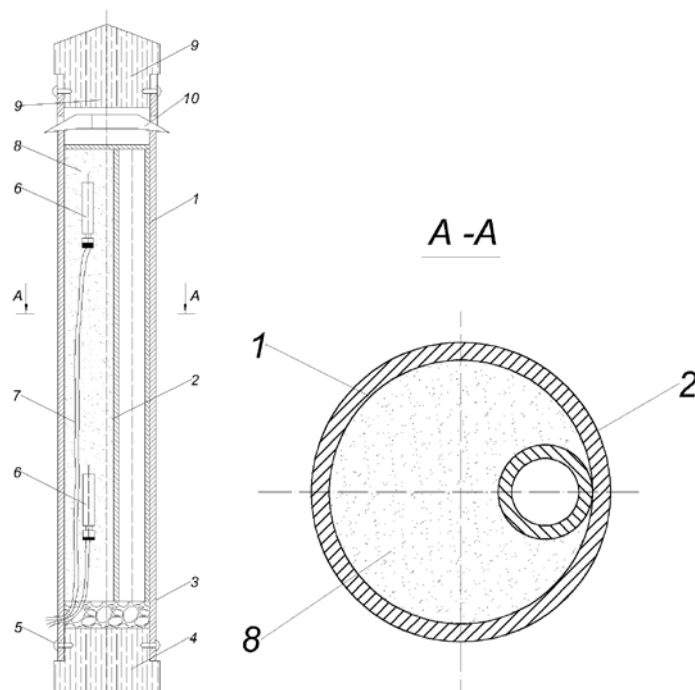


Рисунок 6 – Конструкция кумулятивного заряда:

- 1 - резистосолевой корпус (гильза); 2 - кумулятивная воронка; 3 - забойка ПЗМ или глина;
4 - деревянная пробка; 5 - винт; 6 - электродетонатор;
7 - электропровода; 8 - заряд ВВ; 9 - направляющая головка; 10 - стопор

Корпус 1 изготовлен из негорючей пластиковой (резистосолевой) гильзы, к которой крепится трубка 2 диаметром 18 мм, выполняющая роль кумулятивной выемки. Гильза заполняется ВВ 9 (аммонит Т-19), и в ней располагают два электродетонатора 6 с проводами 7. Для удержания заряда в скважине у верхнего его торца монтируется стопорное устройство 10. В головной части заряда крепится винтами 5 направляющая головка 9, а в хвостовой - деревянная пробка 4, служащая для ориентирования заряда в скважине. Забойка 3, состоящая из глины или ПЗМ, расположена над хвостовой деревянной пробкой.

Кумулятивный заряд доставлялся к забою скважины вручную с помощью составных забойников и ориентировался в скважине таким образом, чтобы кумулятивная воронка была направлена параллельно оси выработки. Взрывание производилось при установке забойников на почву пласта. С целью рационального заложения разгрузочных, скважин была пробурена специальная, разведочная длиной 25 м под углом 75°. По результатам исследования керн, определения положения ослабленных контактов были найдены параметры заложения разгруженных скважин. При этом также учитывались условия изгиба плиты зависающих

пород. Скважина пробуривается в плоскости естественного обрушения пород основной кровли вдоль выработки, а длина ее определяется расположением по высоте слоя начальной трещины, а, следовательно, и кумулятивного заряда ВВ. Развиваемая давлением воды поверхность разрушения от начальной трещины должна располагаться в зоне максимальных растягивающих напряжений, т.е. вблизи верхнего контура изгибающего слоя (рисунок 7).

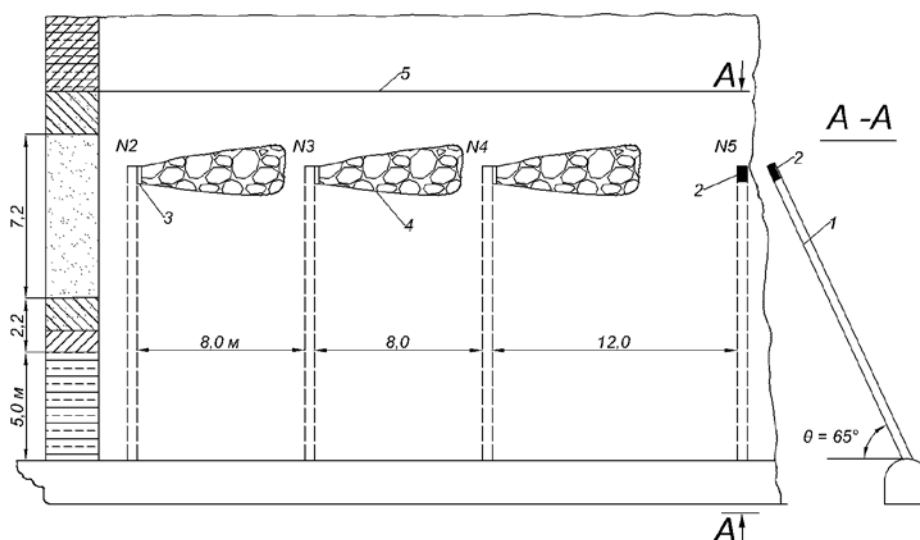


Рисунок 7 – Схема и параметры заложения разгрузочных скважин:
1 - разгрузочные скважины; 2 - кумулятивный заряд; 3 - начальная трещина;
4 - поверхность разрушения; 5 - ослабленный контакт

Расстояние между скважинами принималось 8 м, исходя из опыта ВНИМИ, а затем увеличивалось до 12 м. На экспериментальном участке шахты «Чертинская-Коксовая», при проведении конвейерного штрека 555, было пробурено девять скважин, параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры заложения скважин

Параметры скважин	Номера скважин								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина, м	12,2	13,7	13,7	13,5	13,0	13,2	13,0	14,0	13,0
Диаметр, мм	76	76	76	93	93	93	59	59	59
Угол заложения, °	65	65	65	65	65	70	70	75	75
Расстояние между скважинами, м	-	12	8	8	12	12	8	17	8

Диаграмма изменения давления жидкости при нагнетании до достижения гидроразрыва и при развитии поверхности разрушения приведена на рисунке 8. Из рассмотрения ее видно, что давление в камере высокого давления с начальной трещиной на участке скважины, ограниченной герметизатором, постепенно повышается до давления гидроразрыва, которое составляет 17-18 МПа. При этом следует отметить, что, достигнув данной величины, давление остается постоянным несмотря на нагнетание жидкости. Это объясняется тем, что идет процесс заполнения жидкостью зоны кумулятивного воздействия, фильтрации жидкости в породы, окружающие начальную трещину, заполнения зоны микротрещин, образовавшейся в результате движения кумулятивной струи при взрыве заряда ВВ.

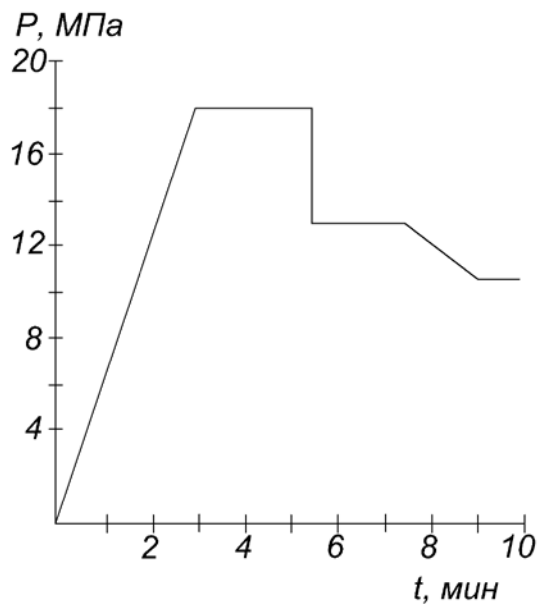


Рисунок 8 – Диаграмма изменения давления жидкости при нагнетании в породы кровли

При гидроразрыве пород кровли происходит резкое падение давления до 10-15 МПа с его последующей стабилизацией на этом уровне в течение 3-4 мин. Дальнейший гидроразрыв происходил при меньшем давлении жидкости в течение 2-3 мин.

Рекомендуемый в диссертационной работе, способ борьбы с пучением пород почвы в подготовительных горных выработках основан на применении податливых межлавных целиков, вместо устойчивых (жестких) целиков, в комплексе с применением направленного гидроразрыва тяжелой кровли по предварительно сформированным трещинам в массиве вследствие взрыва специальных удлиненных кумулятивных зарядов (УКЗ). Разупрочнение тяжелой кровли способствует обрушению зависающей консоли кровли над податливым целиком со стороны выработанного пространства очистного забоя, что значительно снижает напряжение в горном массиве и угольном целике, это способствует снижению интенсивности пучения пород почвы и обеспечивает сохранность горной выработки.

В условиях шахты «Чертинская-Коксовая», рекомендован способ проведения и поддержания подготовительных выработок по пластам 4 и 5 - в присечку к выработанному пространству с оставляемыми податливыми межлавыми целиками не более $0,1l$, где l - ширина зоны опорного давления, зависящая от глубины разработки (H), и погашением их за очистным забоем. В отдельных случаях, где отсутствует техническая и технологическая возможности проведения выработки в присечку к выработанному пространству, рекомендуется повторное использование выработок со сроком службы до 5 лет с применением анкеров глубокого заложения. При данной схеме отработки пластов 4 и 5 исключается формирование зон ПГД на ниже- вышележащие пласты свиты от оставляемых межлавных целиков. Размеры межлавных податливых целиков по пластам 4 и 5 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Размеры межлавных податливых целиков

Глубина горных работ, м	Величины размеров податливых межлавных целиков, м	
	Наименование пласта	
	Пласт 4	Пласт 5
	$m_b = 2,6$ м	$m_b = 2,0$ м
200	4	4
250	5	4
300	6	5

350	6	5
400	7	6
450	7	6
500	7	6
550	-	7
600	-	7
650	-	7

Ширина межлавных целиков с одной стороны должна быть такой, чтобы обеспечить сохранность выработок в течение всего срока их эксплуатации, а с другой стороны такой, чтобы обеспечить полноту выемки полезного ископаемого. Так как пласты угля в пределах шахтного поля отнесены к угрожаемым по горным ударам, то минимальная допустимая ширина межлавных целиков, при условии применения в качестве крепи выработок сталеполлимерных анкеров, должна быть такой, чтобы в целике с предельно напряженным состоянием краевых частей, имеющаяся упругая область между двумя максимумами зон опорного давления от оконтуривающих целик выработок, была равна не менее мощности пласта. При этом, необходимо также учитывать имеющуюся зону трещиноватости и расслоения угля в бортах выработок, оконтуривающих целик. Требование о том, чтобы максимумы зон опорного давления не перекрывались в межлавном целике вызвано тем, что наложение двух зон увеличит примерно в два раза удельную нагрузку на целик и оконтуривающие выработки. Для того, чтобы максимумы зон опорного давления не перекрывались, необходимо оставить дополнительный запас целика не менее мощности пласта.

Для снижения интенсивности пучения пород почвы в конвейерном штреке 555 шахты «Чертинская-Коксовая» был выбран экспериментальный участок с ПК 20 по ПК 46, где апробировался предложенный способ охраны выработок.

После образования первичной трещины скважины герметизируются специальным устройством (пакером) и производится нагнетание воды под высоким давлением.

Скважины для НГР горного массива герметизируются специальными устройствами типа ГАС-42 или «Таурус».

Задачами шахтных инструментальных наблюдений являлись исследование характера и величин смещения пород в окрестности выемочных выработок.

Методом исследования смещений пород вокруг выработки являются шахтные инструментальные наблюдения на специальных замерных станциях, оборудованных контурными и глубинными реперами (рисунок 9).

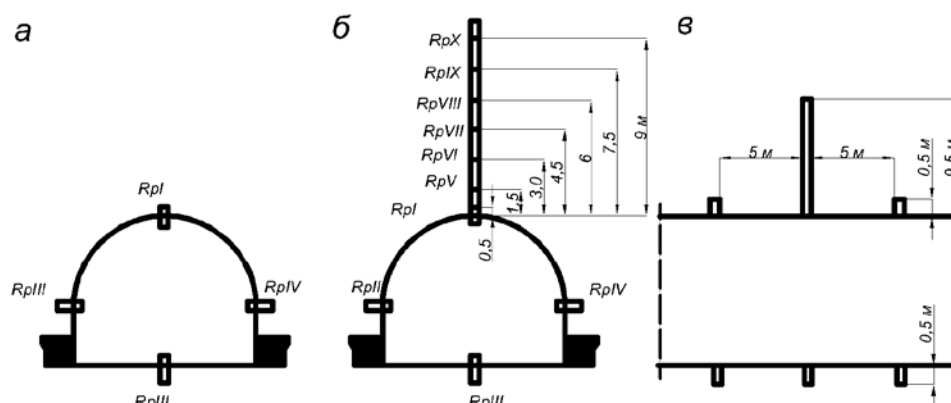


Рисунок 9 – Схемы замерных станций:

а – из контурных реперов; б – из контурных и глубинных реперов;

в – расположение замерных станций по длине выработки

Контурные реперы предназначены для получения данных о величинах смещений пород, кровли, почвы и боков выработки, а глубинные - для исследования смещений пород в массиве при различном удалении от контура выработки.

Замерная станция состояла из трех наблюдательных пунктов, расстояние между которыми составляет 5 м. Шпур для реперов в наблюдательном пункте располагали в одной плоскости, перпендикулярной к оси выработки.

Контурные реперы представляли собой металлические стержни диаметром 24 мм с клинощелевыми замками, глубинные состояли из распорной головки конструкции НИОГР и штоков длиной 1-1,5 м. Наблюдательную станцию устанавливали вне зоны влияния опорного давления впереди лавы.

Изменение высоты и ширины выработки определили по замерам между парными реперами RpI-RpIII и RpII-RpIV в сравнении с первоначальными замерами, снятыми при оборудовании наблюдательной станции. Измерения производили рулеткой ВНИМИ с ценой деления 1 мм. Разделение величины конвергенции кровли и почвы выполняли с помощью линии, проведенной между реперами, заложенными в боках выработки.

Для контроля сдвижения пород кровли и почвы выработок в вертикальном направлении применяли метод геометрического нивелирования. Отметки реперов в кровле и почве выработок определяли относительно опорных реперов при помощи нивелира НА-1, и шахтной рейки, подвешиваемой к крепи выработки. Опорные реперы (минимум два) закрепляли в выработках или в стенках камеры, расположенных в зоне установившегося горного давления. Нивелирный ход от опорных реперов прокладывали дважды - в прямом и обратном направлениях методом "со середины" с соблюдением равенства плеч.

После осуществления способа охраны выработок от пучения на экспериментальном участке проводился мониторинг за смещением пород кровли и почвы пласта 5, боков выработки на опытном участке. Станция измерения конвергенции (контурная реперная станция) «Кровля-Почва», «Бок-Бок» установлена в районе ПК 46 м. Станция глубинных реперов (РГ3) установлена в районе ПК 45.

Для определения величины смещений пород кровли по мере подвигания очистного забоя установлен глубинный репер РГ 3.

В таблице 3 приведены параметры установки глубинных реперов. Всего было установлено 16 станций наблюдений, данные о которых в таблице 4.

Таблица 3 - Глубины установки реперов замерных станций

№ репера	Глубины установки реперов
	Конвейерный штрек 555
R ₁	7,10 м
R ₂	3,30 м
R ₃	2,30 м

Таблице 4 – Данные станций наблюдений

Расположение станций относительно дневной поверхности и очистного забоя		
№ Станций	Глубина от поверхности, м	Расстояние до выемочного участка, в период наблюдения, м
1	610	43 -17
2	607	98-8
3	603	112-43
4	599	152-75
5	588	114-69
6	575	106-50
7	555	83-55
8	540	88-27
9	520	95-26

10	516	127-22
11	510	60-28
12	503	150-79
13	493	65-15
14	484	90-19
15	478	70-11
16	468	70-28

Результаты замеров величин смещений кровли, почвы и боков конвейерного штрека 555 представлены на рисунках 9 – 11.

Анализ результатов измерений смещений контура конвейерного штрека 555 показал, что применение разработанного способа охраны горных выработок позволило снизить интенсивность пучения пород почвы с 503 мм (на контрольном участке, станция № 1) до 192 ÷ 41 мм (на станциях №2 ÷ №8). На замерных станциях 9-16 пучение пород почвы не наблюдалось.

Смещение кровли конвейерного штрека 555 на контрольном участке (станция № 1) составляло 667 мм. После применения разработанного способа охраны выработки смещение кровли на участках станций № 2-16 составляло 2 ÷ 48 мм, а смещения боков уменьшились с 380 мм до 10 ÷ 47 мм.

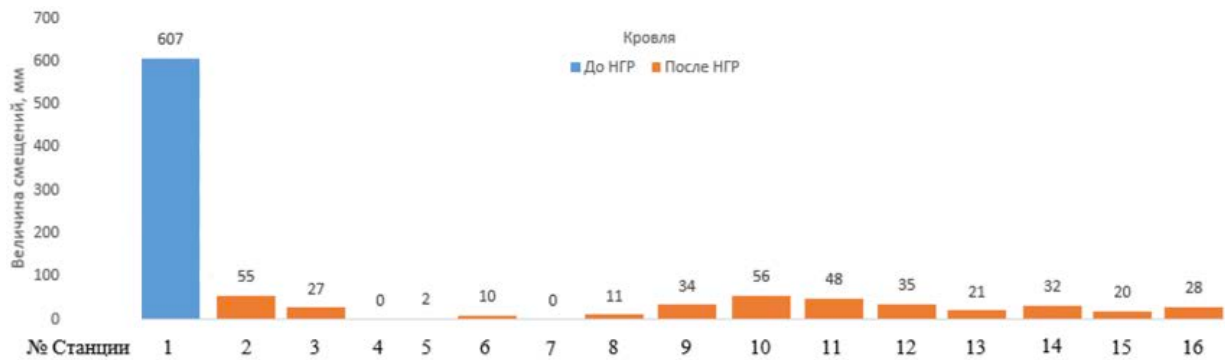


Рисунок 10 – Смещения кровли конвейерного штрека 555

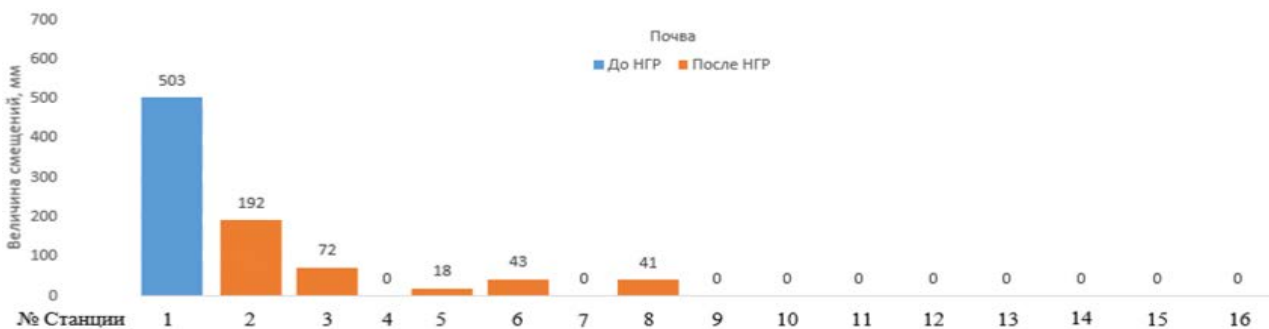


Рисунок 11 – Смещения почвы конвейерного штрека 555

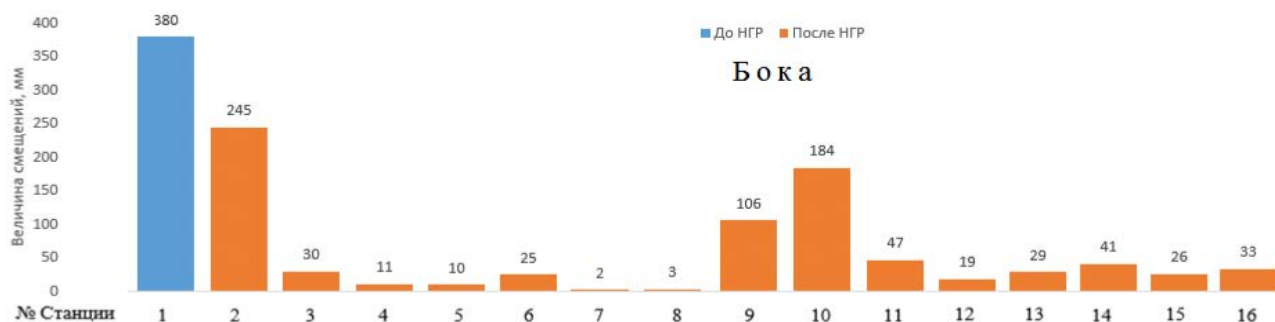


Рисунок 12 – Смещения боков конвейерного штрека 555

В конвейерном штреке 555, в районе проведения экспериментальных работ, проводился комплекс геофизических исследований с использованием аппаратуры ANGEL-M.

После проведения НГР кровли пласта значения параметра F, характеризующего структуру кровли, существенно изменились. Характерно, что до 8 метров глубины зондирования эти значения превысили прежние показатели параметра F практически в 2 раза. С глубины 8 метров и далее значения показателя F превышали значения данного параметра на 20% – 50%. Возможно, снижение значений параметра F на данных глубинах обусловлено геометрическими параметрами самой скважины. Скважина бурилась в кровлю пласта под углом 75 – 80°.

Исходя из результатов значений показателя F, полученных методом электромагнитного зондирования кровли пласта на участке ПК 31+10 м, проведенный на данном участке НГР оценивается как эффективный.

Кровля		до НГР	после НГР
Глубина зондирования, м	10	0,09	0,26
	9	0,20	0,23
	8	0,17	0,31
	7	0,15	0,38
	6	0,22	0,29
	5	0,25	0,27
	4	0,30	0,35
	3	0,36	0,39
	2	0,64	0,54
	1	0,85	0,88
ПК 31+10			

Рисунок 13 – Результаты наблюдений аппаратурой ANGEL-M с функцией АЭШ кровли по оценке эффективности проведения НГР кровли пласта 5

Согласно представленному на рисунке 13 распределению показателя F в кровле пласта на участке ПК 31+10 м до и после проведения НГР в его численных значениях весьма явно отмечается существенная разница в показаниях, причем на глубине от 7 метров до 10 эти отличия составляют от 50% до 150% в сторону их роста.

Полученные по результатам электромагнитного зондирования кровли пласта 5 значения показателя F на участке ПК 31+10 м. позволяют подтвердить эффективность проведения НГР, что подтверждает данные по снижению интенсивности пучения пород почвы пласта в конвейерном штреке 555 и повышения устойчивости штрека.

Много шахтопластов в Кузбассе имеют в кровле или почве, а большей частью и в кровле, и в почве такие неустойчивые породы, как глинистые и песчанистые сланцы.

Поэтому при выборе систем разработки для глубоких горизонтов следует исходить из необходимости предотвращения пучения пород в горных выработках.

Проведенные исследования показывают, что на состояние подготовительных выработок, а вместе с этим и на стоимость их поддержания влияют не только физико-механические свойства пород, но и глубина ведения работ, применяемые варианты разработки и углы падения пластов.

Стоимость поддержания подготовительных выработок будет определяться тем объемом ремонтных работ, который будет связан с удалением из выработок выжатой за срок их службы породы, ремонтом крепи и перестилкой рельсового пути (там, где он есть) или заменой конвейерной линии. Объем ремонтных работ будет тем больше, чем большей будет интенсивность пучения пород и чем большими будут срок службы выработок и их длина.

Для того, чтобы выбрать наиболее рациональный вариант разработки, необходимо знать, как будут протекать явления пучения пород в выработках, объем и частоту ремонтных работ и то, как это отразится на других производственных процессах и в первую очередь на транспорте.

Широкий диапазон горно-геологических условий обуславливает необходимость установления области применения различных способов предотвращения пучения почвы. Выбор рационального способа должен базироваться на физических основах процесса пучения с учетом его экономической эффективности.

Во всех случаях затраты на любое мероприятие по предотвращению пучения почвы должны быть меньше затрат на подрывку почвы ($r_{п.п} < r_{п}$).

Выбор способа предотвращения пучения производится в следующем порядке.

Рассчитывается величина смещений почвы в горной выработке для проектного способа охраны. Если смещения почвы требуют работ по предотвращению пучения, то намечаются способы предотвращения пучения и определяются их среднемесячные затраты на 1 м выработки $r_{п.п}$. Затем определяются затраты на подрывку 1 м почвы выработок, $r_{п}$. При $r_{п} < r_{п.п}$ следует применять подрывку почвы. При больших величинах смещений и необходимости многократной подрывки намечаются пути уменьшения пучения почвы. Если затраты на предотвращение (или уменьшение) пучения меньше затрат на подрывку, то приближенно определяют часть пучения, которую нельзя предотвратить известными способами, и устанавливают необходимость подрывки почвы.

Выбор способов борьбы с пучением почвы нельзя рассматривать в отрыве от поддержания кровли и боков выработки.

Знание закономерностей изменения интенсивности пучения пород в штреках во времени позволяет рассчитать объем породы, который может быть выжат в выработки за срок их службы. Следовательно, при выборе рационального способа разработки пласта в любых конкретных условиях можно заранее рассчитать сопоставимые затраты на проведение и поддержание подготовительных выработок для сравнения различных вариантов разработки.

Анализ изменения интенсивности пучения пород при различных вариантах разработки показывает, что наибольший объем породы может быть выжат в выработку при сплошной системе разработки с охраной штреков жесткими предохранительными целиками угля. Поэтому в условиях пучащих пород этот вариант будет наименее рентабельным. Минимальный объем пород, может быть выжат в выработку при проведении штрека с двусторонней раскосой. Однако проведение выработки с двусторонней раскосой связано с большими капитальными затратами. Кроме того, усадка породных стенок влечет за собой деформацию штреков. Поэтому на практике соотношение между затратами на проведение и поддержание подготовительных выработок будет зависеть от интенсивности пучения пород, длины и срока службы выработок и мощности пластов.

При обратном порядке обработки этажей (ярусов), т. е. при применении столбовых систем разработки, в случае, когда выработка служит только в течение срока отработки одного яруса или подэтажа, она располагается в нетронutom массиве угля, вследствие чего пучение пород незначительно. Откаточные штреки, используемые в дальнейшем в качестве вентиляционных, можно охранять со стороны выработанного пространства предохранительными целиками угля, литьевыми или породными полосами.

Так как трудоемкость работ по подрывке пород в кровле и почве выработки, а, следовательно, и связанные с этим затраты на ремонтные работы будут различными, то при сравнении вариантов в конкретных условиях необходимо учитывать отдельно объем выжатой породы в кровле и почве выработки. Так как закономерность выжимания пород как в кровле, так и в почве выработки по существу одинакова, то объем породы, выжатой за срок службы выработки в почве и кровле, будет пропорционален интенсивности пучения пород кровли и почвы.

Таким образом, объем породы, которая может быть выжата из кровли выработки,

$$Q_{кр} = h_{кр}^k \cdot L \cdot \alpha_k, \text{ м}^3, \quad (20)$$

а из почвы выработки

$$Q_{п} = h_{п}^n \cdot L \cdot \alpha_n, \text{ м}^3, \quad (21)$$

где $h_{кр}^k$ - средняя потеря высоты выработки за срок ее службы за счет опускания кровли, м;

$h_{п}^n$ - средняя потеря высоты выработки за срок ее службы за счет поднятия почвы, м;

α_n - ширина выработки у почвы, м;

α_k - ширина выработки у кровли, м.

Зная объем породы, которая может быть выжата в выработку за срок ее службы при различных вариантах разработки, несложно вычислить стоимость ремонтных работ в зависимости от интенсивности пучения пород.

Так как при различных вариантах разработки объем работ по проведению штреков будет различный, необходимо подсчитать стоимость проведения последних.

Расчет затрат на проведение и поддержание подготовительных выработок позволит в каждом конкретном случае установить экономически наиболее рациональный вариант отработки пласта в зависимости от интенсивности пучения пород.

Для установления потери высоты выработки за срок ее службы необходимо знать: интенсивность пучения пород в нетронутом массиве (Δh), в зоне опорного давления (Δh_{max}) и размеры зон по длине выработки, где проявляется опорное давление (для определения времени оседания пород $t_{сдв}$ и времени нарастания давления в зоне опорного давления $t_{оп}$), а также потерю высоты выработки впереди очистного забоя под влиянием опорного давления.

Наиболее исчерпывающие данные могут быть получены путем наблюдений за движением реперов, закладываемых в кровлю и почву выработок при ее проведении. По интенсивности перемещения таких реперов можно построить диаграмму, характеризующую изменение интенсивности пучения пород в выработке в зависимости от места расположения репера по отношению к очистному забою.

Построение такой диаграммы позволит достаточно точно определить среднюю интенсивность пучения пород по периодам нарастания и спада опорного давления.

Рекомендованный метод определения интенсивности пучения пород позволяет в каждом конкретном случае получать исходные данные для расчета объема ремонтных работ по поддержанию подготовительных выработок и их стоимости с достаточной для практических целей точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, представлены новые, научно обоснованные технологические решения для борьбы с пучением пород в подготовительных выработках, базирующиеся на применении податливых межлавных целиков и направленного гидроразрыва тяжелой кровли, что имеет существенное значение для развития подземной геотехнологии, а также повышения эффективности подготовительных и очистных работ на угольных шахтах России.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Наиболее существенными свойствами пород в горнотехнических условиях, влияющими на напряженно-деформированное состояние горного массива, провоцирующие пучение пород, являются:

- способность к образованию остаточных деформаций, возникающих при приложении нагрузок (включая и кратковременный начальный период действия этих нагрузок), т.е. при изменяющейся горнотехнической обстановке, например, способность к развитию деформаций выработки в зонах проходки или временного опорного давления;

- способность к текучести - систематическому росту деформаций при длительном действии неизменных нагрузок, т.е. при неизменяющейся горнотехнической обстановке, например, способность к пучению пород в выработке в зонах стационарного опорного давления.

При этом наиболее показательны проявления этих свойств при высоких (близких к разрушающим) нагрузках.

2. Исследование напряженно-деформированного состояния вмещающего горного массива конвейерного штрека 555, в условиях ш. «Чертинская-Коксовая», проведено с помощью программного комплекса NDCGaz 29-05-2020, а также комплекса геофизических исследований массива с помощью наведенных электромагнитных полей аппаратурой ANGEL-M. В результате исследований было установлено, что в массиве формируются зоны со значительным уровнем концентрации напряжений, что приводит к увеличению горного давления на податливый угольный целик, что в свою очередь передает это давление на породы почвы пласта и вызывает их пучение в штреке с потерей его устойчивости. Это обстоятельство указывает на необходимость применения направленного гидроразрыва массива с целью снижения его напряженного состояния и податливого угольного целика.

3. Разработана методика расчета параметров податливых угольных целиков. Проведенные исследования влияния изменяющихся во времени напряжений в массиве на деформированное состояние и запас прочности угольных целиков позволяют утверждать, что:

- введение функции мгновенного нагружения и критерия разрушаемости в уравнение наследственности Вольтерра - Работнова позволяет решить задачу расчета длительной прочности целиков;

- условия длительной прочности и, соответственно, допускаемые напряжения на целики зависят от характера изменения приложенных нагрузок в функции времени;

- допускаемые напряжения, полученные при $\sigma(t) = \sigma_0 = const$ меньше напряжений, полученных при условии плавного нарастания от нуля до максимума. Это свидетельствует о возможности регулирования прочности целиков путем изменения скорости отработки пласта.

4. Разработана конструкция УКЗ для формирования «первичной трещины» в массиве горных пород.

Параметры УКЗ и кумулятивного ножа, формирующего трещину в массиве пород, зависят от геометрических параметров кумулятивной выемки, свойств материала оболочки и облицовки, а также применяемого типа ВВ.

5. Проведены исследования процесса и определены параметры направленного гидроразрыва пород основной кровли по сформированной «первичной трещине» в массиве.

Давление жидкости, нагнетаемой в массив для его гидроразрыва, составило 15÷18 МПа, а время нагнетания 10÷15 мин.

6. Разработаны технологические решения для борьбы с пучением в подготовительных горных выработках.

Сущность технологических решений заключается в том, что зависающую консоль пород основной кровли разделяют на блоки небольших размеров. Для этого в кровлю пласта бурится одна или две скважины, в которые помещаются УКЗ и взрываются в режиме камуфлет, с целью образования «первичной трещины». После этого производится направленный гидроразрыв пород основной кровли угольного пласта.

7. Анализ результатов измерений смещений контура конвейерного штрека 555 показал, что применение разработанных технологических решений позволило снизить интенсивность пучения пород почвы с 503 мм (на контрольном участке, станция № 1) до 192 ÷ 41 мм (на станциях №2 ÷ №8). На замерных станциях 9-16 пучение пород почвы не наблюдалось.

Смещение кровли конвейерного штрека 555 на контрольном участке (станция № 1) составляло 667 мм. После применения разработанных технологических решений смещение кровли на участках станций № 2-16 составляло $2 \div 48$ мм, а смещения боков уменьшились с 380 мм до $10 \div 47$ мм.

8. Установлено, что применение разработанных технологических решений по предотвращению пучения почвы должны базироваться на физических основах процесса пучения, которые связаны со структурой и составом массива пород, с учетом их экономической эффективности для различных систем разработки, определяемой по разработанной методике.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора.

В изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science:

1. Гречишкин П. В., Щербаков В. Н., Зеляева Е. А., Зайцев Я. И. Оценка эффективности мероприятий по управлению кровлей в конвейерном штреке 555 на шахте «Чертинская-Коксовая» // Горный журнал. – 2022. - № 1.с. 101-105. DOI: 10.17580/gzh.2022.01.18

2. Гречишкин П.В., Розонов Е.Ю., Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Щербаков В.Н. Управление кровлей для повышения эффективности поддержания выработок, охраняемых податливыми целиками. Уголь. 2019. №10 (1123). С. 35-41. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-35-41

3. Melnik V. V., Grechishkin P. V., Gornostaev V.S., Shcherbakov V. N. Increasing the stability of mine stopes by injection hardening of the near-contour mass // XX Conference of PhD Students and Young Scientists – 2021. - №684. - pp 2-7. DOI:10.1088/1755-1315/684/1/012013

4. Мельник В.В., Щербаков В.Н. Способы и рекомендации проведения подготовительных выработок по породам склонным к пучению // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле - 2021. - №4. – с. 436-443.

в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

5. Щербаков В.Н. Способ повышения эффективности процесса гидровоздействия на угольные пласты при проведении горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 29). – С. 19-25. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-29-19-25.

6. Щербаков В.Н., Гречишкин П.В., Зеляева Е.А. Повышение эффективности поддержания анкерной крепью конвейерного штрека 555, охраняемого податливым целиком в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. № 3. – С. 94-103. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-94-103.

7. Щербаков В.Н. Разработка конструкции удлиненного кумулятивного заряда для разгрузки приконтурного массива подготовительных выработок. // Маркшейдерский вестник - 2021- №5 - 6- С.72-76.