

УДК 622.281.76

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.027>

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ АНКЕРНОЙ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

<sup>1</sup>Круковский А.П.<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

## ФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ АНКЕРНОГО КРІПЛЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

<sup>1</sup>Круковський О.П.<sup>1</sup>Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

## FORMATION OF ELEMENTS OF THE BOLTING STRUCTURE FOR MINE WORKINGS

<sup>1</sup>Krukovskyi O.P.<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine

**Аннотация.** С помощью численного моделирования работы анкерной крепи исследованы условия формирования грузонесущей опоры одним анкером, опорно-анкерного перекрытия системой анкеров и породно-анкерных элементов конструкции анкерной крепи. Для реализации поставленных задач по совершенствованию технологии анкерного крепления была выработана концепция взаимодействия породно-анкерных опор, при которой они образуют блоки, формирующие в приконтурном массиве единую конструкцию, способную противодействовать горному давлению. Показано, что она должна состоять из следующих элементов: силовой части перекрытия выработки; подпорной части; опоры; основания конструкции; защитных перемычек. При этом силовая часть перекрытия противодействует деформациям и смещению горных пород кровли выработки в её пространство. Подпорная часть воспринимает и передает нагрузку от силового элемента перекрытия на опору, также она необходима для управления сроком службы конструкции в зависимости от назначения выработки; опоры перекрытия передают нагрузку от перекрытия на основание, разгружая горные породы боков выработки. Основание конструкции способствует повышению устойчивости боков выработки и уменьшению пучения почвы. Защитные перемычки противодействуют разрушению приконтурного массива вследствие освобождения энергии упругих деформаций, которые накапливаются с увеличением длины выработки. Увеличение количества анкеров в элементах конструкции анкерной крепи приводит к росту относительной прочности трехосно сжатых приконтурных пород. После достижения этим показателем порогового значения армированный массив начинает работать в качестве опоры, несущая способность которой увеличивается при повышении мощности конструкции. Сохранение приконтурного массива выработки с приемлемыми значениями относительной прочности 6,0-7,5 достигается при отставании установки ряда анкерной крепи от плоскости забоя на величину 300 мм при скорости её проведения 3-10 м/сут. Увеличение отставания установки ряда анкеров от забоя выработки приводит к уменьшению относительной прочности пород в конструкции крепи.

Полученные результаты позволили усовершенствовать технологию опорно-анкерного крепления, которая успешно применяется на шахтах ПАО «ДТЭК Павлоградуголь», ПАО «Краснодонуголь» и ООО «Краснолиманское».

**Ключевые слова:** породно-анкерная конструкция, технология анкерного крепления, численное моделирование, элементы конструкции анкерной крепи

### 1 Проблема крепления горных выработок на угольных шахтах

Эффективность работы угольных шахт во многом зависит от обеспечения эксплуатационного состояния разветвлённой сети раскрывающих, подготовительных и выемочных горных выработок. С возрастанием глубины разработки угольных месторождений напряжения в горных породах достигают предельных значений, возникают реологические эффекты, которые в совокупности приводят к большим нагрузкам на крепь и обуславливают её деформацию и смещение пород в выработку [1, 2]. В типичных условиях эксплуатации потери площади поперечного сечения выработки достигают 40-45 % от проектного.

В условиях шахт Донбасса для поддержания выработок применяются различные виды крепи [3, 4]. Наибольшее распространение имеет металлическая податливая крепь арочного типа – 52-72 % (на некоторых шахтах 86-96 %). Несмотря на то, что за последние 25 лет несущая способность арочной податливой крепи возросла в 2-2,5 раз, в основном за счёт повышения металлоёмкости на 50 %, более 40 % выработок регулярно деформируется и перекрепляется, а свыше 25 % их длины находится в аварийном состоянии. Это обусловлено тем, что арочная крепь, даже при большой металлоёмкости, имеет недостаточную несущую способность, не превышающую 1,5 МПа.

Анализируя результаты натуральных наблюдений, большинство исследователей пришли к выводу, что никакая технически выполнимая и экономически целесообразная жёсткая или податливая крепь выработок, проведённых в горных породах на больших глубинах, не может противодействовать горному давлению, и поэтому бороться с образованием зоны разрушения путём увеличения несущей способности подпорной крепи нецелесообразно [5, 6].

Управление деформированием породного массива можно осуществить анкерной крепью. Она позволяет улучшить прочностные показатели пород и повысить несущую способность породного массива.

Анкерную крепь широко применяют в угольной промышленности и на других объектах подземного строительства в Великобритании, США, Германии, Польше, Австралии, России, Индии, Украине и других странах [7]. Начиная с момента начала применения анкеров и до настоящего времени для решения вопросов, связанных с изучением принципов работы анкерных систем крепления, отечественными и зарубежными учёными было проведено большое количество исследований [8-11].

До 1970-х годов применялись в основном анкера с механическим (замковым) закреплением. Развитие полимерных закрепителей с быстрым временем схватывания и высокой прочностью позволило начать применение анкеров с закреплением по всей длине штанги при креплении горных выработок. Использование таких анкеров улучшило состояние выработок, в том числе со слабой и слоистой кровлей. Анкера с полимерным закреплением по всей длине штанги имеют большее сопротивление боковому движению по сравнению с механическим закреплением, а также менее подвержены коррозии, что существенно повышает их эффективность [7].

Взаимодействие между анкерами и породным массивом реализуется одним или сочетанием следующих трёх основных механизмов: подвешивание, формирование балки и сжатие [8, 11], рис. 1. Без существенного и своевременного подкрепления слоистая непосредственная кровля начинает отделяться от основной с возможным обрушением в дальнейшем. Если непосредственная кровля слабая, а вышележащий слой породы прочный, то при анкерообразовании нижний слой подвешивается к верхнему, рис. 1 а. Основываясь на этой теории, анкера должны выдерживать вес пород нижнего подвешенного слоя. Для этого они должны быть закреплены в прочной породе основной кровли на глубину не менее 0,25-0,35 м от границы слабых пород [8].

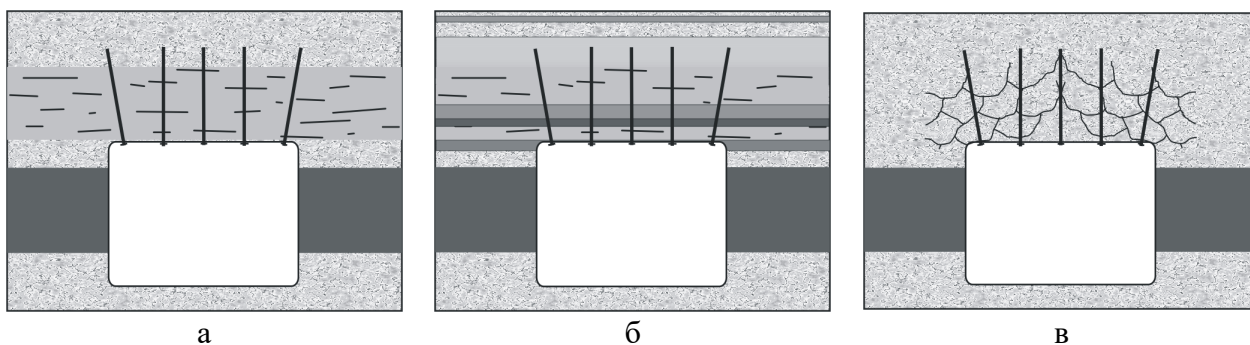


Рисунок 1 – Механизм взаимодействия между анкерами и породным массивом

Во многих случаях основная прочная кровля находится вне пределов анкерной крепи для использования её в качестве опоры для подвешивания. Но и тогда анкерная крепь может применяться вполне успешно. Фактически сдвигание и разделение слоёв породы происходит по горизонтали и по вертикали вдоль плоскостей сопряжений. Анкера, пересекая эти слои, могут предотвращать или уменьшать в очень большой степени горизонтальные перемещения, а натяжение анкеров соединяет отдельные слои в один блок, обеспечивая их перемещение на одну и ту же величину. С другой стороны, благодаря натяжению анкеров возникают дополнительные силы трения вдоль плоскостей сопряжения, также уменьшая горизонтальные смещения пропорционально натяжению в анкерах, рис. 1 б. В большинстве случаев, где непосредственная кровля состоит из слоистых пород, проявляется совместное действие эффектов подвешивания и формирования балки.

Когда породы непосредственной кровли содержат одну или несколько систем трещин с различной ориентацией, анкера существенно увеличивают силу трения вдоль трещин и плоскостей ослабления, таким образом исключая или уменьшая скольжение и разделение вдоль плоскостей ослабления, рис. 1 в. Этот эффект сжатия в основном зависит от действующей силы натяжения анкеров или, при благоприятных условиях, от пассивного натяжения под действием перемещения массива. Известно, что натяжение анкера вызывает напряжения в слоистой породе, которые являются сжимающими и по оси анкера и перпендикулярно к анкеру. Наложение зон сжатия вокруг анкеров формирует сплошную зону сжатия, в которой прочность пород на сдвиг увеличивается.

Механизм сжатия при взаимодействии пород и анкера можно использовать и в ненарушенных породах. В этом случае приложением предварительного натяжения анкеров формируется породно-анкерный блок, который находится в трёхосно сжатом напряженном состоянии, близком к состоянию ненарушенных пород. Такие блоки можно формировать как в кровле, так и в боках выработки.

Анкера с полным полимерным закреплением по длине оказывают значительное воздействие на породу, в которой они закрепляются [12]. Сопротивление, препятствующее опусканию и боковым смещениям по плоскостям напластований кровли, создаётся в результате взаимодействия стержня анкера, полимерного закрепителя и стенок шпура.

При выборе типа и параметров анкерной крепи должна учитываться совокупность природных и техногенных факторов, влияющих на устойчивость выработок. Расчёт параметров анкерной крепи обычно сводится к определению

размеров области деформаций (разрушения) массива вокруг выработки, величины нагрузки на крепь, несущей способности её составных элементов, длины и плотности установки штанг [13, 14]. Основным недостатком такого подхода является то, в качестве управляющих параметров принимаются только длины анкеров и плотность их установки. В условиях повышенной трещиноватости, блочного строения или явно выраженной слоистости необходимо большее значение придавать схемам установки анкерной крепи.

Кроме того, при отходе забоя и запаздывании установки крепи подработанные породы и поверхность забоя выработки разгружаются от горного давления, происходит разуплотнение пород. Это особенно заметно в непрочных, трещиноватых породах. В этом случае анкерная крепь будет устанавливаться в нарушенный, потерявший монолитность породный массив. Поэтому также весьма важным является вопрос определения оптимальных временных параметров установки анкерной крепи.

Традиционно анкера устанавливаются в выработках с прямоугольным поперечным сечением перпендикулярно напластованию, а в выработках арочной формы радиально. Но такие схемы расположения анкеров имеют ограниченную область применения. При усложнении горно-геологических условий взаимодействие между вертикально установленными анкерами недостаточное как в ряду, так и между рядами вдоль выработки. Для повышения уровня взаимодействия необходимо повышать плотность установки анкеров в ряду и уменьшать расстояние между рядами. А это не всегда технологически осуществимо и экономически приемлемо.

Наиболее перспективным направлением повышения степени взаимодействия между анкерами является такое их пространственное расположение, которое бы обеспечило сохранение пород приконтурного массива в трёхосно сжатом состоянии. Как показали испытания образцов, даже незначительное увеличение бокового подпора повышает в 1,5-2,5 раза предел прочности [6].

Значительное развитие технологии анкерного крепления получили в США, Австралии, Великобритании и Германии. В каждой стране принят свой подход к управлению горным давлением, соответственно будут различаться и подходы к применению анкерной крепи. Существуют различия и в схемах установки анкеров. Например, при креплении боков выработки. В американских шахтах практически не крепят бока, в то время как боковые анкера являются основным компонентом системы поддержания выработки в Германии. Плотность установки анкеров значительно отличается. Причина высокой плотности в немецких шахтах состоит не только в большой глубине разработки и связанных с этим высоких напряжениях массива, а также – в использовании системы разработки с одним штреком и сохранении его на повторное использование. Применяемая в Великобритании технология предполагает использование анкеров, закреплённых полимером по всей длине, с высокой несущей способностью [15]. Возможности существующих технологий анкерного крепления показаны в табл. 1.

Учитывая изложенное, можно сказать, что основными направлениями совершенствования технологии анкерного крепления являются:

- введение в систему анкеров, устанавливаемых с наклоном вдоль оси выработки, которые усиливают взаимодействие между рядами анкеров и дают возможность формировать анкерно-породную конструкцию, способную удерживать углепородный массив вокруг выработки от возникновения и развития процессов разрушения;
- установка анкеров группами для формирования из армированных монолитных горных пород блока конструкции анкерной крепи;
- разделение конструкции на блоки, что позволяет сохранить устойчивость горной выработки как системы в целом за счёт движения блоков относительно друг друга;
- оптимизация параметров «отставание анкерной крепи от забоя» и «время установки первого ряда анкерной крепи»;
- изменение принципов формирования крепи, которое должно базироваться на более жёстком ограничении смещений пород в выработку для сохранения их природной монолитности и повышения устойчивости породного обнажения.

Таблица 1 – Сравнительный анализ технологий анкерного крепления

Параметры технологии	Технология				
	Британская	Немецкая	Американская	Кузбасс	Механизованная
Форма сечения выработки	прямоугольная	арочная	прямоугольная	прямоугольная	прямоугольная/арочная
Оптимизация параметра «отставание анкерной крепи от забоя»	+	+/-	-	+	-
Оптимизация параметра «время установки первого ряда анкерной крепи»	+	+/-	-	-	+
Применение наклонных вдоль выработки анкеров	-	-	-	-	-
Применение усиливающих элементов	-	рамная крепь, бетонирование	-	канатные анкера	-
Возможность сохранения на повторное использование	-	+	-	+	-
Особенности технологии		анкерно-рамное и рамно-анкерное крепление	шахматный порядок установки, без предварительного натяжения анкеров	усиление канатными анкерами	-

Поэтому целью работы является установление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного породного массива с учётом пространственного размещения анкеров, разработка принципов формирования конструкции анкерной крепи и её элементов.

## 2 Математическая модель работы конструкции анкерной крепи

Процесс деформирования породного массива с выработкой, закреплённой анкерной крепью, будем описывать системой уравнений:

$$c_g \frac{\partial u_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + X_i(t),$$

где  $c_g$  – коэффициент демпфирования, кг/с/м<sup>3</sup>;

$u_i$  – перемещения, м;

$t$  – время, с;

$\sigma_{ij,j}$  – производные от компонент тензора напряжений по  $x, y$ , МПа/м;

$X_i(t)$  – проекции внешних сил, действующих на единицу объёма твёрдого тела, Н/м<sup>3</sup>.

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H; & \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma H; \\ u_x|_{\Omega_1} &= 0; & u_y|_{\Omega_2} &= 0, \end{aligned}$$

где  $\lambda$  – коэффициент бокового распора;

$\gamma$  – усреднённый вес вышележащих горных пород, Н/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина разработки, м;

$\Omega_1$  – вертикальные границы внешнего контура;

$\Omega_2$  – горизонтальные границы внешнего контура.

Приведённые в статье задачи решались автором в упругопластической постановке с использованием метода конечных элементов [16, 17]. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применялось условие прочности Кулона-Мора. Блок-схема алгоритма решения задачи приведена на рис. 2 [18].

Система «анкерная крепь – приконтурный породный массив» работает в режиме взаимовлияющих деформаций. Такой режим взаимодействия предполагает совместную работу анкерной крепи и горных пород [19]. При этом нагрузка на анкер определяется деформацией приконтурного массива, и наоборот – деформируемый анкер оказывает влияние на величину смещения приконтурного массива. Чтобы отразить особенности полимерного закрепления, важно правильно смоделировать как сам анкер, так и способ его закрепления в шпуре.

Для моделирования анкера использовался стержневой конечный элемент, рис. 3. Характеристики этого одномерного элемента из изотропного материала – геометрические (толщина, длина  $L$ ), физические (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, временное сопротивление).

Для моделирования полимерного закрепителя были применены специальные контактные конечные элементы [20, 21], имитирующие контакт между стержневыми конечными элементами анкера, и конечными элементами породного массива, рис. 4. Это дало возможность изменять прочность закрепления для различных задач.

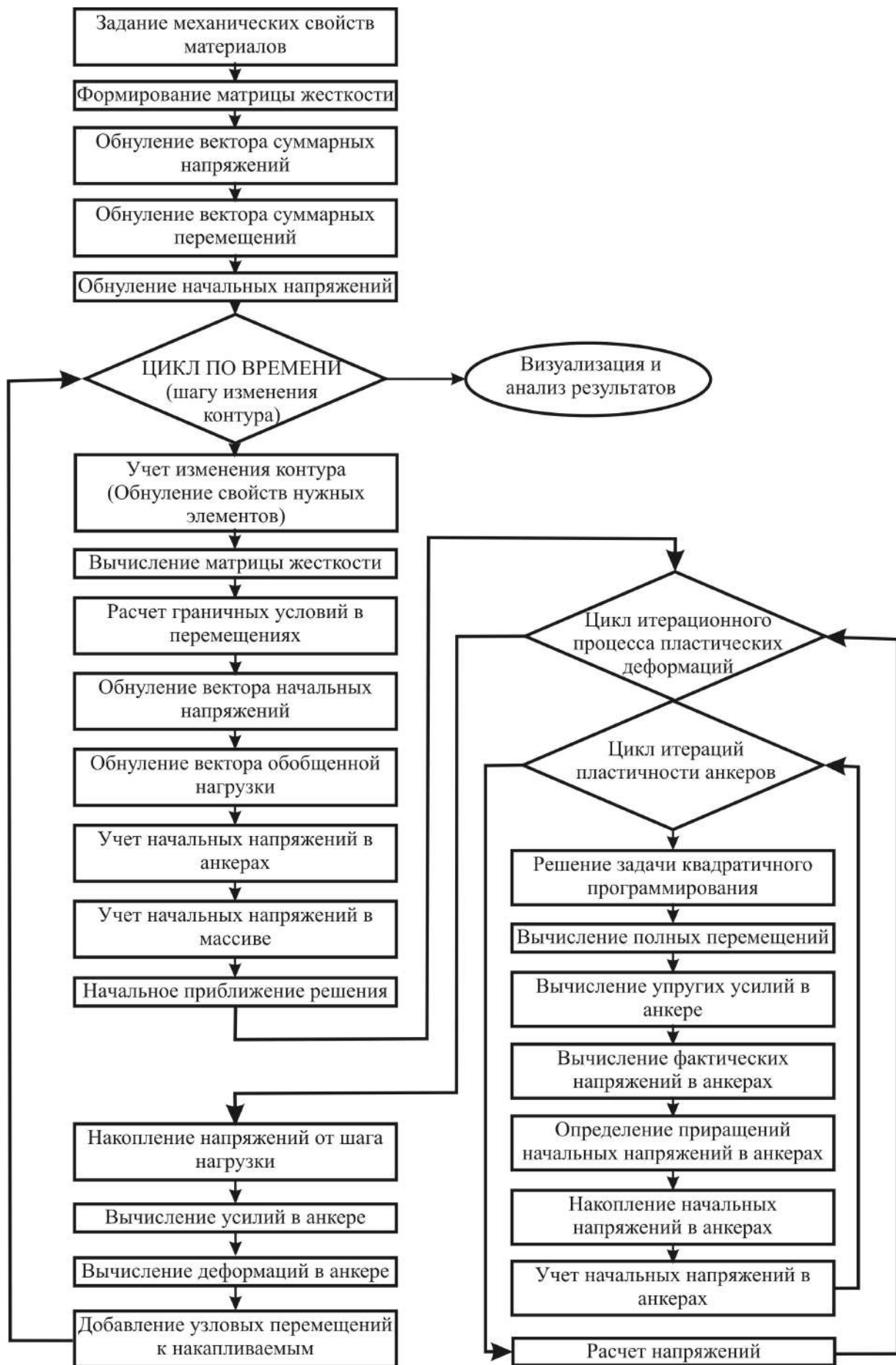


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма решения задачи

Для оценки степени разнокомпонентности поля напряжений использовался параметр  $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$ , возможного режима разрушения –  $P = \sigma_3 / \gamma H$ , запаса прочности горных пород относительно действующих напряжений –  $Z = \sigma_{сж} / (\sigma_1 - \sigma_3)$ , Лоде-Надаи  $\mu_\sigma$  [22].

### 3 Условия формирования грузонесущей опоры вокруг анкера

Для исследования условий формирования грузонесущей опоры были выполнены расчёты напряженного состояния приконтурного массива вокруг выработки с одиночным анкером в кровле при различных значениях его длины и прочности закрепления [11, 23]. Длина анкера варьировалась в пределах от 1,125 до 9 м, прочность закрепления  $P_{зак}$  – от 0,5 до 2,5 кН/мм, рис. 5.

Установка анкера с прочностью закрепления 0,5 кН/мм практически не влияет на изменение значений рассматриваемых параметров в приконтурных породах. При низкой прочности закрепления (0,5 кН/мм) нагрузка, принимаемая анкером, не превышает этого значения. Породы вокруг анкера находятся в состоянии обобщённого растяжения,  $\mu_\sigma < -0,5$ .

При увеличении прочности закрепления до 1,5 кН/мм (рис. 4 б) воздействие анкера на приконтурный массив возрастает. Значение параметра  $Q$  вдоль всей длины анкера меньше 0,7. Радиус этой области – 0,4 м. Увеличилось значение минимальной компоненты напряжений в приконтурном массиве вокруг анкера. Изолиния со значением  $P = 0,4$  опустилась практически к контуру выработки, вдоль всей длины анкерной штанги  $P > 0,4$ , у верхнего конца анкера образовалась область, где  $P > 0,6$ . Породы вокруг анкера перешли из состояния обобщённого растяжения к обобщённому сдвигу,  $0 < \mu_\sigma < -0,5$ . Повышение прочности закрепления до 1,5 кН/см позволило анкеру воспринять большую нагрузку, что увеличило его влияние на прилегающий породный массив, расширив область его воздействия.

При дальнейшем увеличении прочности закрепления размеры опоры увеличиваются, напряженное состояние пород вблизи анкера приближается к трёхосно сжатому [24].

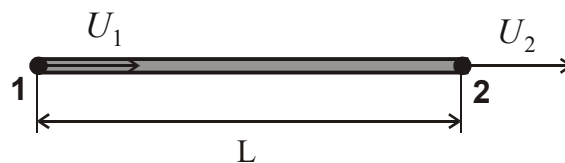


Рисунок 3 – Стержневой конечный элемент

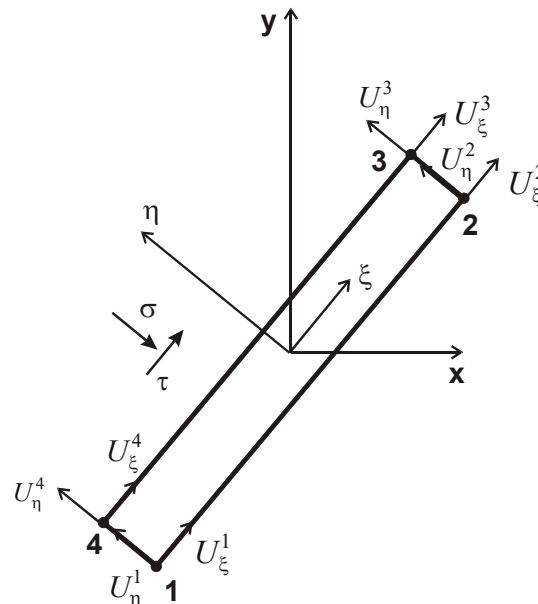
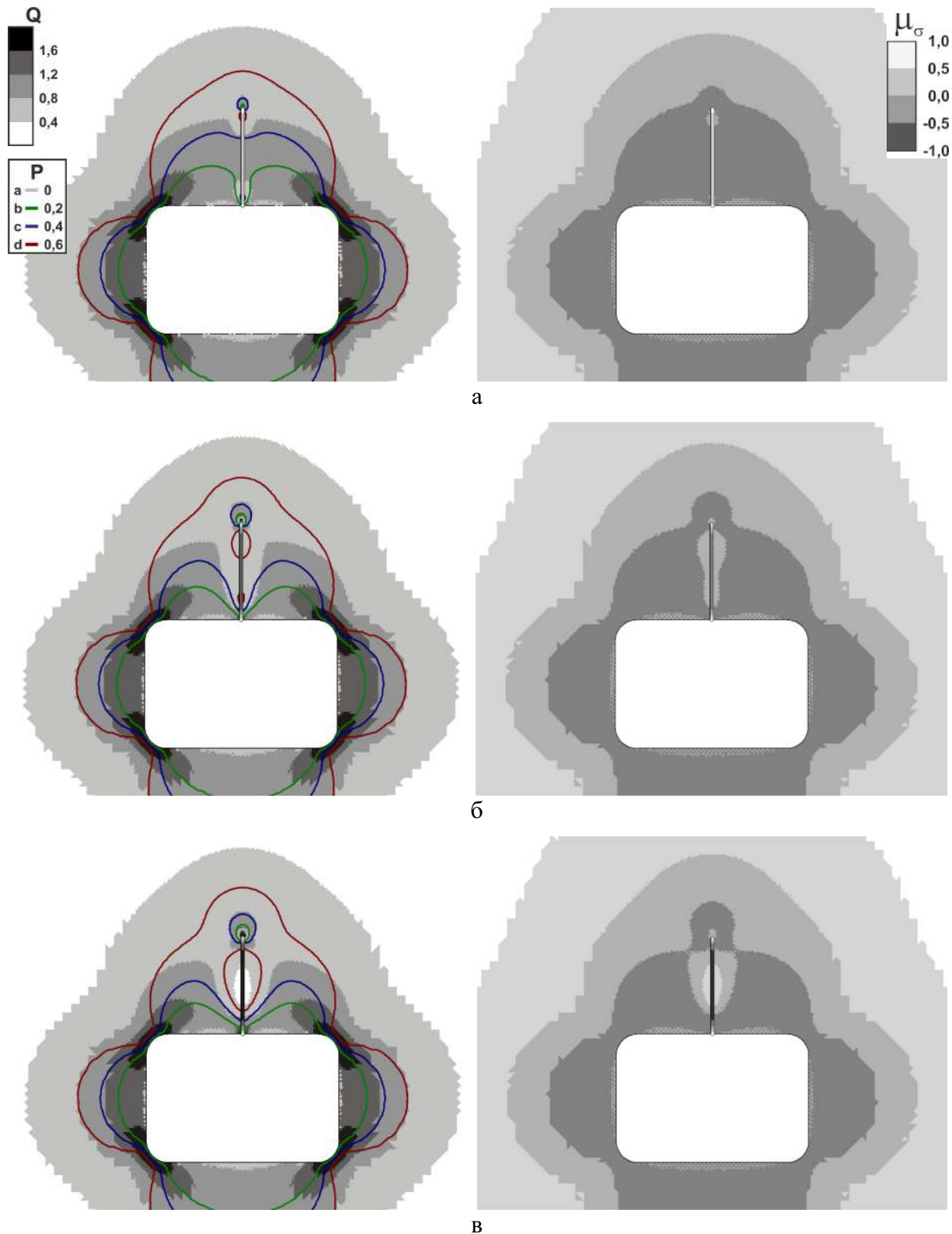


Рисунок 4 – Схема контактного конечного элемента





а –  $P_{зак} = 0,5$  кН/мм; б –  $P_{зак} = 1,5$  кН/мм; в –  $P_{зак} = 2,5$  кН/мм

Рисунок 5 – Распределение значений параметров  $Q$ ,  $P$  и Лодэ-Надаи вокруг горной выработки с одним анкером, с различной прочностью закрепления

Таким образом, если прочность закрепления  $P_{зак} < 1$  кН/мм, опора не создаётся. Поэтому применение анкерных штанг высокой несущей способностью (с прочностью на разрыв 250 кН и более) становится нецелесообразным. При низкой прочности закрепления анкерная штанга не может быть нагружена до своих рабочих нагрузок.

Результаты изучения комплексного влияния параметров длины и прочности закрепления анкера представлены в табл. 2. Они отражают основные условия формирования анкером породной опоры.

Таблица 2 – Радиус влияния анкера в зависимости от прочности закрепления и длины анкерной штанги

Длина анкерной штанги, м	Радиус влияния анкера, м, в зависимости от прочности закрепления анкерной штанги, кН/мм				
	1	2	3	4	5
1,85	0,07	0,11	0,15	0,18	0,22
2	0,16	0,28	0,4	0,55	0,7
2,25	0,17	0,3	0,45	0,61	0,79
2,5	0,18	0,32	0,47	0,65	0,84
2,85	0,19	0,33	0,5	0,69	0,9
3,25	0,2	0,35	0,52	0,72	0,94

Радиус опоры возрастает от 0,15 до 0,75 м с ростом показателя качества закрепления анкера от 1 до 5 кН/мм при соотношении его длины к полуширине выработки, равном 1. При этом увеличение его длины не приводит к увеличению радиуса опоры, а снижение его длины до 0,6 от полуширины выработки приводит к уменьшению на 40 % радиуса опоры.

#### 4 Формирование опорно-анкерного перекрытия системой анкеров

Анкерная крепь представляет собой пространственную систему закреплённых в шпурах анкерных штанг. Каждый качественно установленный анкер создаёт вокруг себя породную опору, в которой максимально сохранено состояние нетронутого массива. Поэтому основная задача при установке анкеров добиться такого их расположения, чтобы созданные анкерно-породные опоры максимально эффективно взаимодействовали между собой, препятствуя смещению приконтурного массива внутрь горной выработки и повышая её устойчивость.

Расстояние между анкерными штангами в ряду и между рядами анкеров являются важными параметрами анкерной крепи [25, 26]. Для определения влияния плотности установки анкеров на формирование опорного перекрытия выполнен ряд расчётов для случаев, когда в кровлю выработки устанавливалось от 1 до 6 анкеров стандартной длины закрепления  $L_a = 2,25$  м (полная длина равна 2,4 м). На рис. 6 представлено распределение значений параметров  $Q$  и  $P$ , на рис. 7 – параметра Лоде-Надаи вокруг горной выработки, в кровле которой установлены 1, 3, 5 и 7 анкеров.

При установке одного анкера в кровлю выработки вокруг него формируется упрочнённый породный блок, рис. 6 а. Стальная штанга удерживает приконтурные породы от смещения в выработку. В области воздействия анкера горные породы находятся в условиях трёхосного сжатия с повышенными значениями минимальной компоненты главных напряжений, рис. 6 а. Вокруг анкера сформировалась зона обобщённого сжатия, рис. 7 а.

С увеличением количества установленных анкеров до 3 в кровле выработки вокруг каждой из анкерных штанг формируются породные опоры, рис. 6 б. Расстояние между анкерами превышает радиусы сформированных опор, поэтому

они не взаимодействуют между собой. Зоны обобщённого сжатия, образованные вокруг каждого анкера, не пересекаются, рис. 7 б, сплошное перекрытие в кровле не формируется. В межанкерном пространстве значение параметра  $P$ , характеризующего минимальную компоненту главных напряжений, близко к нулю. То есть в областях, находящихся между породными опорами, при недостаточной прочности пород возможно их разрушение и образование вывалов. Но даже в этих условиях устойчивость кровли выработки намного выше, чем при традиционном поддерживающем креплении, при котором область с разрушенными породами занимает практически все пространство над выработкой.

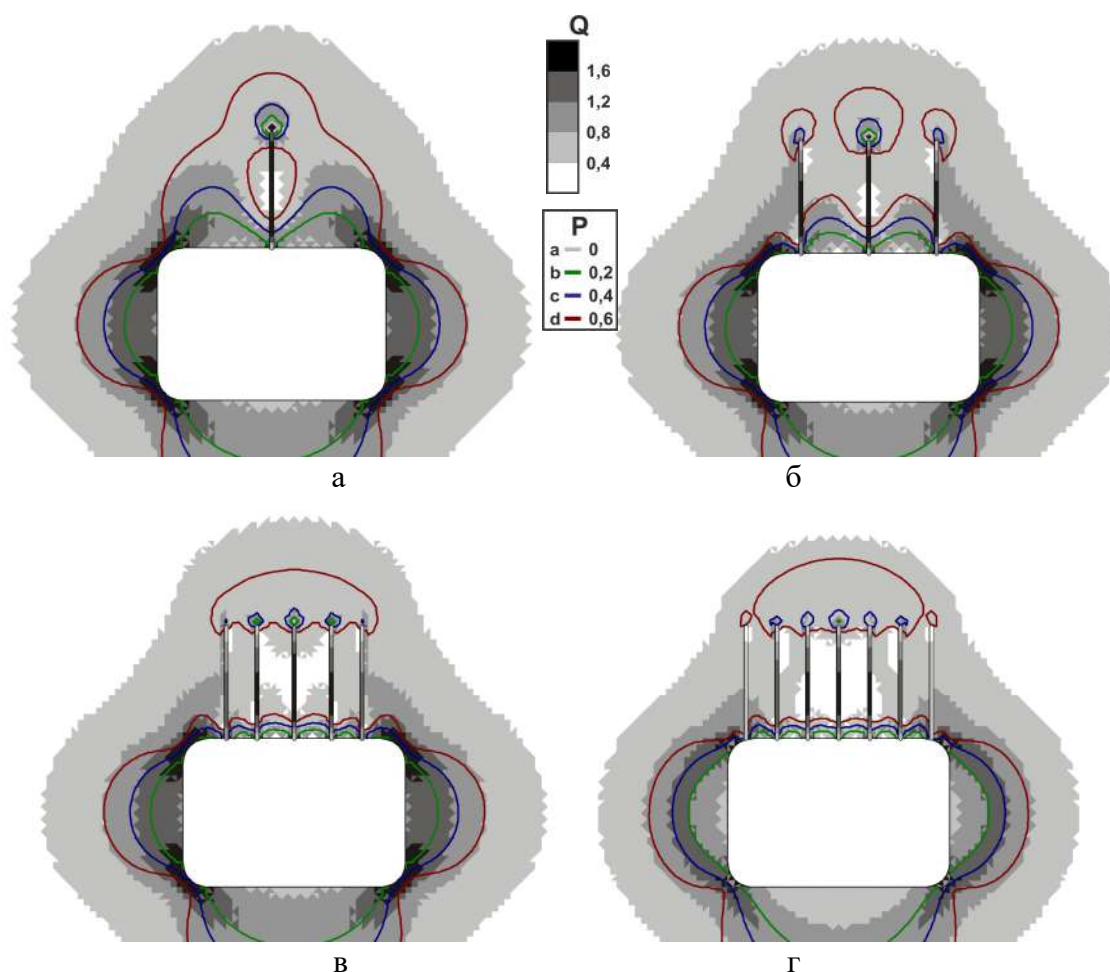


Рисунок 6 – Распределение значений параметров  $Q$  и  $P$  вокруг горной выработки с различной плотностью установки анкеров

При дальнейшем увеличении плотности установки анкерной крепи в кровле выработки (рис. 6 в) породные опоры, сформированные вокруг анкеров, пересекаются и начинают взаимодействовать, образуя сплошное перекрытие. С увеличением количества анкерных штанг в кровле выработки до 7 прочность сформированного перекрытия возрастает.

Таким образом, в непосредственной кровле выработки анкерованием максимально сохранено состояние нетронутого массива. Зона трёхосно сжатых пород с повышенными значениями минимальной компоненты напряжений охватывает практически все приконтурное пространство в кровле выработки и подходит непосредственно к поверхности выработки, т.е. над выработкой системой

анкеров сформирована высокопрочная сплошная плита перекрытия, в которой блокирована возможность развития самопроизвольного разрушения.

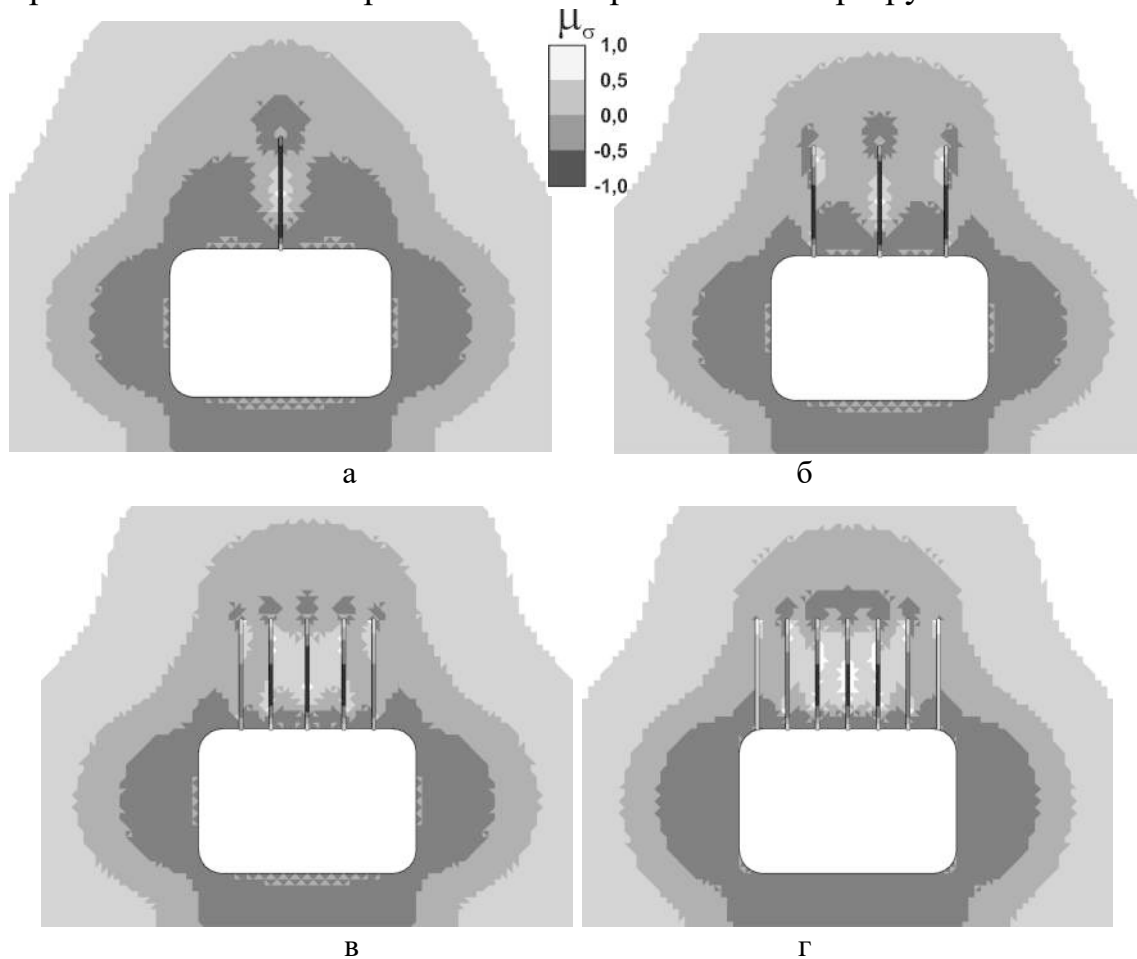
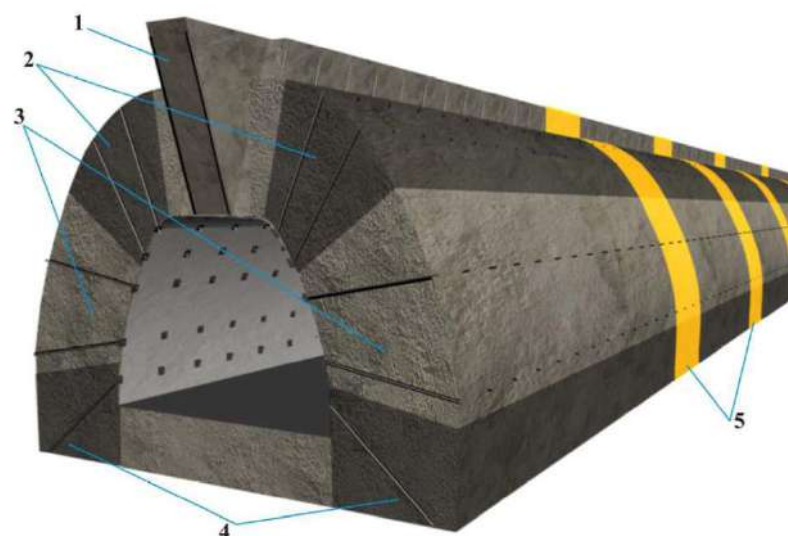


Рисунок 7 – Распределение значений параметра Лоде-Надаи вокруг горной выработки с различной плотностью установки анкеров

## 5 Формирование породно-анкерных элементов конструкции анкерной крепи

Для реализации поставленных задач по совершенствованию технологии анкерного крепления была выработана концепция взаимодействия породно-анкерных опор, при которой они образуют блоки, формирующие в приконтурном массиве единую конструкцию, способную противодействовать горному давлению, рис. 8 [27]. Размеры и форма этих породно-анкерных блоков



1 – силовая часть перекрытия выработки; 2 – подпорная часть перекрытия; 3 – опоры перекрытия; 4 – основание конструкции; 5 – защитные перемычки

Рисунок 8 – Элементы конструкции анкерной крепи

определяются пространственным расположением сталеполимерных анкеров. Уровень монолитности всей конструкции можно повысить для увеличения срока службы выработки или, наоборот, обеспечить подвижность блоков в случае погашения выработки за лавой [28].

Конструкция анкерной крепи должна состоять из следующих элементов: силовая часть перекрытия выработки; подпорная часть перекрытия; опоры перекрытия; основание конструкции; защитные перемычки [29, 30].

Рассмотрим подробнее каждый из элементов конструкции анкерной крепи.

### **5.1 Силовая часть перекрытия выработки**

Силовая часть перекрытия выработки – элемент конструкции, сформированный основными анкерами для противодействия деформациям и смещению горных пород кровли выработки в её пространство. Этот элемент является основным и обязательным элементом конструкции анкерной крепи, он расположен в центральной части кровли вдоль всей выработки. Элемент образовывается анкерами в количестве от 2 до 5 в зависимости от размеров поперечного сечения выработки и требуемой мощности конструкции. Для формирования силовой части перекрытия применяются сталеполимерные анкера длиной преимущественно 2,4 м. Для усиления этого элемента конструкции могут применяться канатные анкера глубокого заложения.

Угол наклона анкеров силового элемента определяет уровень конструкции анкерной крепи – простая (АКпр), усиленная (АКпс), мощная (АКпт). Анкера силового элемента устанавливаются:

- в простой конструкции – в плоскости сечения;
- в усиленной – с наклоном на забой под углом 70-75°;
- в мощной – часть анкеров с наклоном на забой под углом 70-75°, часть – с наклоном назад, на устье выработки, под углом 70-75°.

Простая конструкция анкерной крепи используется в выработках прямоугольного и арочного сечения, проводимых в породах 1 категории устойчивости со сроком службы до 3 лет. Примером может служить конвейерный ходок № 1 пласта  $k_2+k_2^B$  СП «Шахта Дуванная» ПАО «Краснодонуголь». В непосредственной кровле выработки залегает слой известняка мощностью 1,5 м с пределом прочности на одноосное сжатие – 80-110 МПа, основная кровля – слой песчаника мощностью до 18-25 м, предел прочности на одноосное сжатие у которого – 80-90 МПа, что повышает устойчивость выработки. Рекомендуемая схема анкерной крепи – простая с перемычками, закреплёнными по усиленной схеме.

Примером применения усиленной конструкции анкерной крепи может служить вентиляционный ходок 11 северной лавы пл.  $k_5^H$  СП «Шахта им. Н.П. Баранова» ПАО «Краснодонуголь». Выработка проводилась прямоугольным поперечным сечением 5,5×2,4 м, крепление – анкерное. Глубина проведения выработки – 764 м. Способ проведения выработок – комбайновый. Непосредственная кровля выработки представлена глинистым и песчаным сланцами суммарной мощностью до 5 м, над которыми расположен угольный прослоек, далее – слой песчаника мощностью 17 м. В таких условиях для препятствия отрыву пород кровли от песчаника была рекомендована усиленная схема анкерной крепи с

перемычками, закрепленными АКпт. Четыре центральных анкера, наклоненных вперед, образуют силовую часть перекрытия выработки.

Примером применения мощной конструкции анкерной крепи может служить 341 бортовой штрек шахты «Павлоградская» ПАО «Павлоградуголь». Выработка проводилась арочным поперечным сечением КШПУ-11,0, крепление – анкерно-рамное. Глубина проведения выработки – 250 м. Способ проведения выработок – комбайновый. Условия проведения выработки характеризуются наличием слабых вмещающих пород с пределом прочности на одноосное сжатие 16-20 МПа. Для поддержания выработки после прохождения лавы с целью её повторного использования в таких условиях была рекомендована мощная схема анкерного крепления, рис. 9. Пять центральных анкеров, из которых три наклонено вперед и два – назад, рис. 9 б, образуют силовую часть перекрытия.

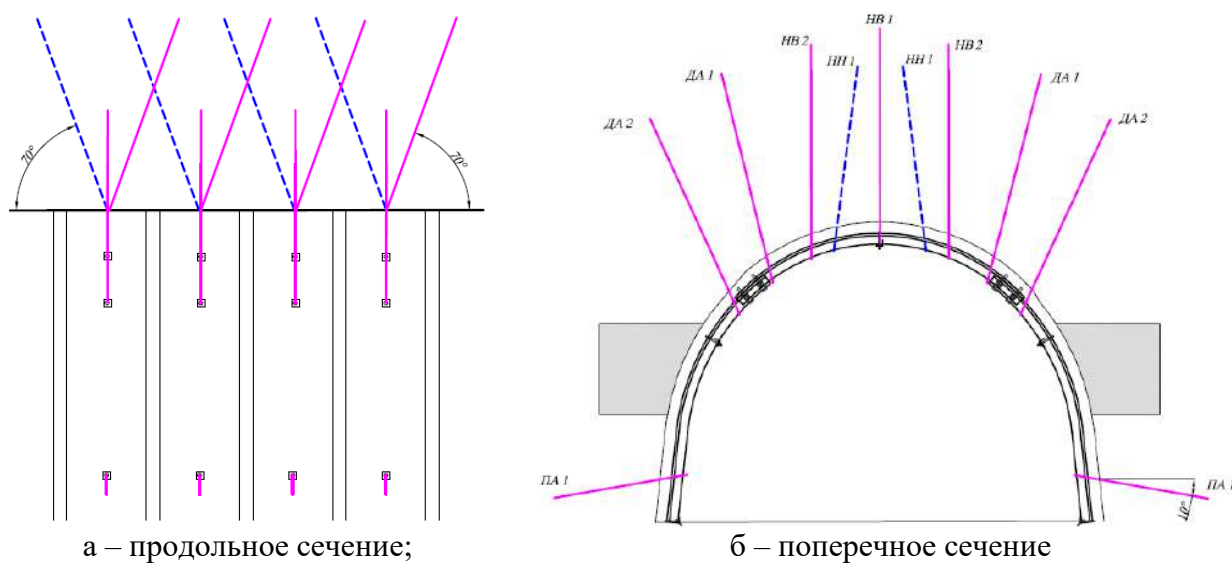


Рисунок 9 – Схема крепления 341 бортового штрека

В период проведения выработки выполнялось её геомеханическое обследование, показавшее, что состояние выработки в процессе проведения и на момент начала отработки лавы – устойчивое, рис. 10.

### 5.2 Подпорная часть перекрытия выработки

Подпорная часть перекрытия выработки – элемент конструкции для восприятия и передачи нагрузки от силового элемента перекрытия на опору, а также для управления сроком службы конструкции в зависимости от назначения выработки. Подпорная часть представлена двумя



Рисунок 10 – Состояние 341 бортового штрека

элементами, расположенными по обе стороны от силовой части конструкции, не обязательно симметрично относительно оси выработки. Различия в схеме формирования подпорной части каждого бока выработки могут быть обусловлены:

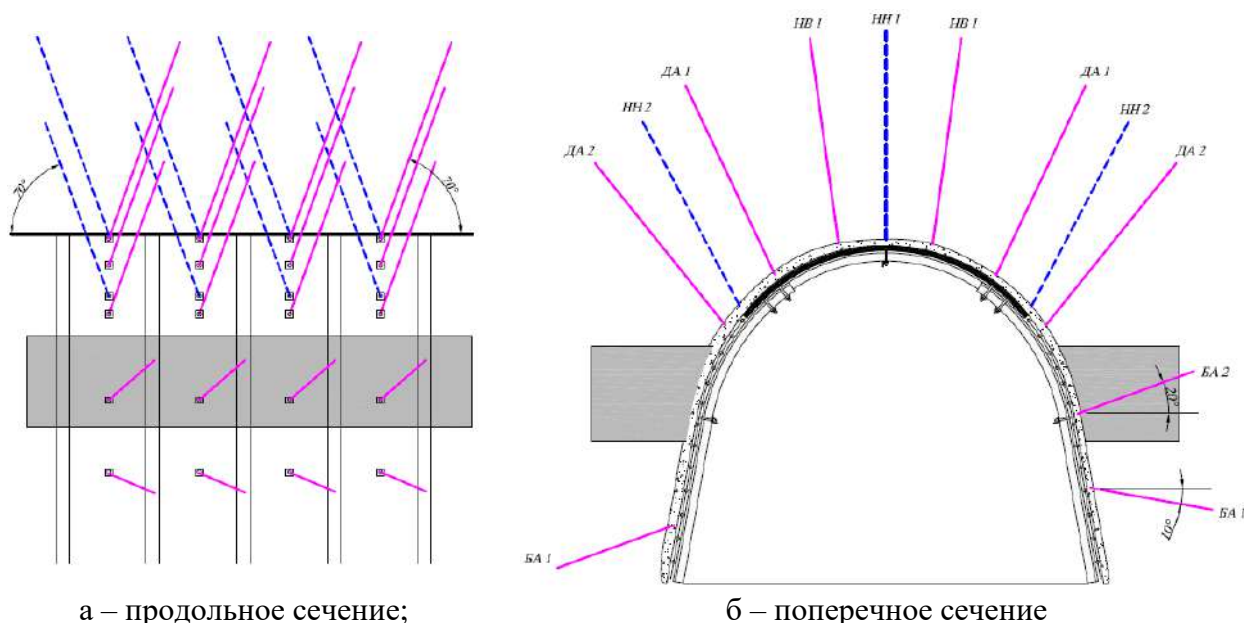
- наклоном угольного пласта и породных слоёв;
- кривизной, направлением природной трещиноватости;
- технологическими требованиями при проведении очистных работ (погашаемая выработка или сохраняемая для повторного использования);
- проведением выработки вприсечку к выработанному пространству.

Подпорная часть является обязательным элементом конструкции анкерной крепи, состоящим из 1-4 сталеполимерных дополнительных анкеров ДА длиной, как правило, 2,4 м. Иногда допускается, чтобы один из анкеров подпорной части имел длину 1,5 м.

Анкера подпорной части также могут устанавливаться по простой, усиленной и мощной схеме. Анкера ДА устанавливаются:

- в простой конструкции – в плоскости сечения с наклоном на бок;
- в усиленной – с наклоном на забой под углом  $70-75^\circ$  и на бок выработки;
- в мощной – часть анкеров с наклоном на забой под углом  $70-75^\circ$ , часть – с наклоном назад, на устье выработки, под углом  $70-75^\circ$  и на бок выработки.

Анкера подпорной части конструкции анкерной крепи – ДА1 и ДА2, установленные по простой схеме, показаны на рис. 9. То есть силовая часть в представленной схеме сформирована по типу мощной конструкции, и она опирается на подпорную часть, сформированную по типу простой конструкции анкерной крепи.



а – продольное сечение;

б – поперечное сечение

Рисунок 11 – Схема крепления 520 бортового штрека

В качестве примера усиленной подпорной части можно привести схему крепления 520 бортового штрека шахты «Терновская» ПАО «Павлоградуголь». Особенностью данной выработки является проходка вприсечку к сборному штреку навстречу обрабатываемой лаве. Рекомендуемая схема анкерной крепи для этой выработки – усиленная с мощными перемычками. На участке с неполным

креплением применялась усиленная конструкция анкерной крепи. Подпорная часть крепи образована анкерами, наклонёнными на забой и бока выработки.

Мощная подпорная часть использовалась в схеме крепления 520 бортового штрека шахты «Терновская» на участках с полным креплением – «перемычках». Для сохранения боков выработки и перекрытия были



Рисунок 12 – Состояние 520 бортового штрека

применены мощные подпорные части конструкции АК, рис. 11. Подпорная часть на этой схеме представлена анкерами ДА1, ДА2 и НН2.

В период проведения выработки выполнялось её геомеханическое обследование, показавшее, что состояние выработки в процессе проведения – устойчивое. Участок поверхности выработки с анкерами ДА1, ДА2 и НН2 показан на рис. 12.

### **5.3 Опоры перекрытия выработки**

Опоры перекрытия выработки – это элементы конструкции, сформированные боковыми анкерами БА для восприятия и передачи нагрузки от перекрытия на основание и уменьшения нагрузки горных пород боков выработки.

Опорная часть конструкции располагается в центральной части боков выработки, в угольном пласте, в породе над или под ним. Если бока выработки представлены прочными породами, то на участках с неполным креплением этот элемент не является обязательным. Опорная часть представлена двумя элементами, которые не всегда симметричны относительно оси выработки.

Количество анкеров в опорах конструкции зависит от:

- высоты выработки;
- мощности угольного пласта;
- прочности угольного пласта и вмещающих пород;
- назначения выработки;
- срока службы выработки.

Обычно количество анкеров в одной опоре не превышает 4 шт.

Для крепления породной части боков могут применяться сталеполимерные анкера длиной от 1,5 до 2,4 м; для крепления угольного пласта – пластиковые и деревянные анкера длиной 1,2-1,8 м.

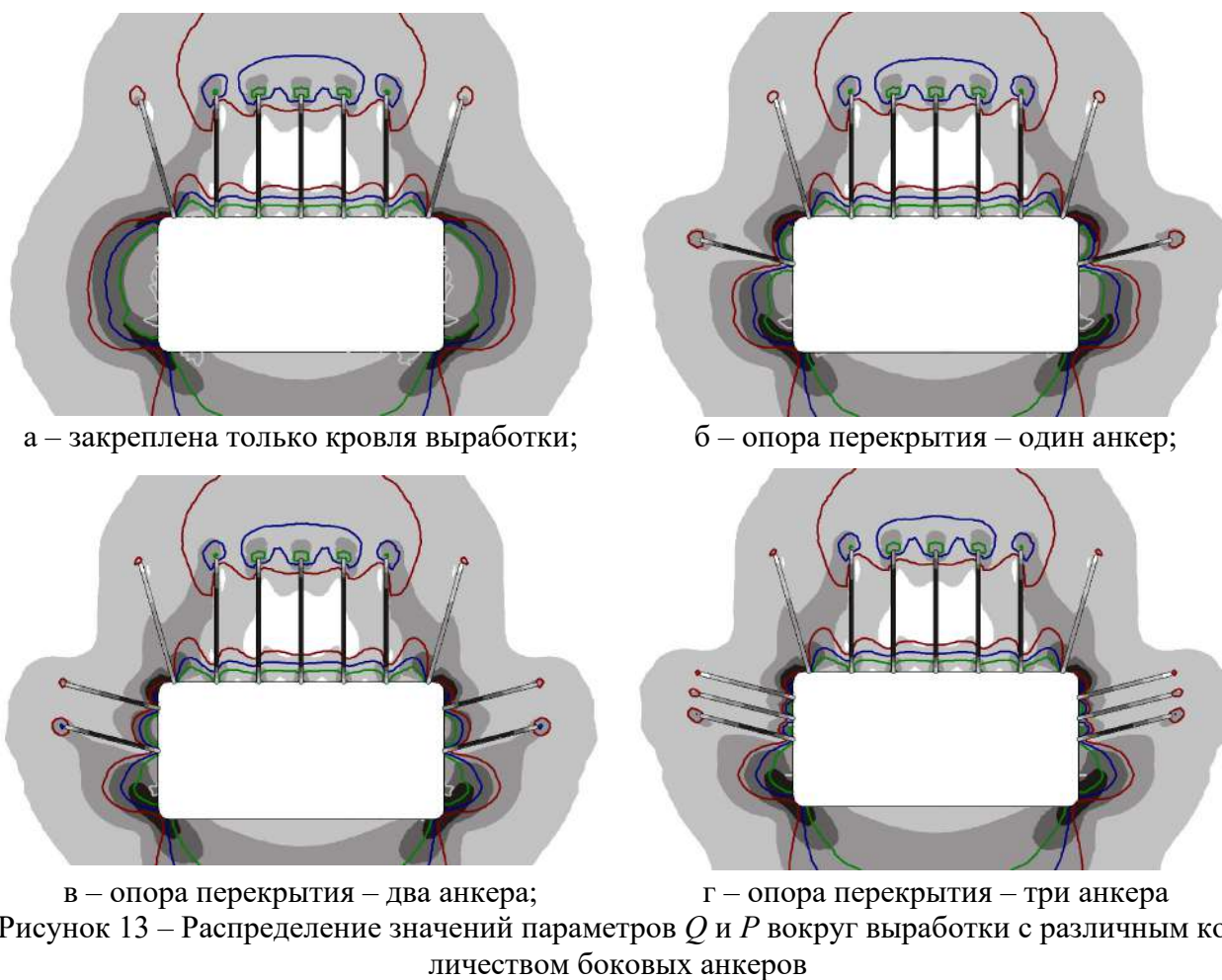
Анкера опорной части могут устанавливаться по простой, усиленной и мощной схеме. При этом с целью сшивания слоёв все боковые анкера необходимо устанавливать под углом не менее 10-15° к напластованию.



Проведём серию расчётов напряженного состояния выработки с анкерной крепью, проводимой по угольному пласту, для случаев, когда конструкция анкерной крепи состоит из:

- силовой и подпорной частей (закреплена только кровля выработки);
- силовой, подпорной частей, опора перекрытия представлена одним анкером;
- силовой, подпорной частей, опора перекрытия – два анкера;
- силовой, подпорной частей, опора перекрытия – три анкера.

Анализ изменения напряженного состояния боков выработки с анкерной крепью будем проводить на основе сопоставления размера зоны неупругих деформаций приконтурных пород и значений разности максимальной и минимальной компонент главных напряжений в них. Рассмотрим напряженное состояние горного массива вокруг одиночной горной выработки прямоугольного поперечного сечения с различным количеством боковых анкеров, рис. 13, рис. 14.

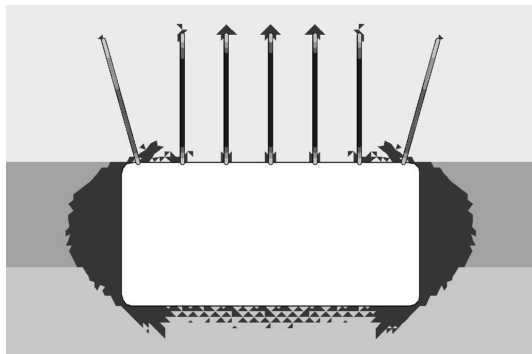


Из рисунков видно, что каждый установленный боковой анкер сокращает площадь зоны неупругих деформаций, разрывая её на несколько не связанных между собой областей, рис. 14 б-г. Область повышенной разнокомпонентности в боках выработки ( $Q > 1,2$ ) также заметно сокращается, рис. 13 б-г. Значение параметра  $P$  в приконтурной области повышается до 0,2.

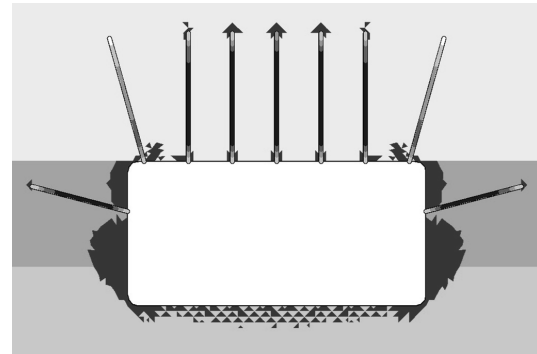
На рис. 15 показан график смещений боков выработки.

С установкой анкеров процесс выдавливания угля в боках выработки останавливается, трещинообразование практически не развивается. Значения

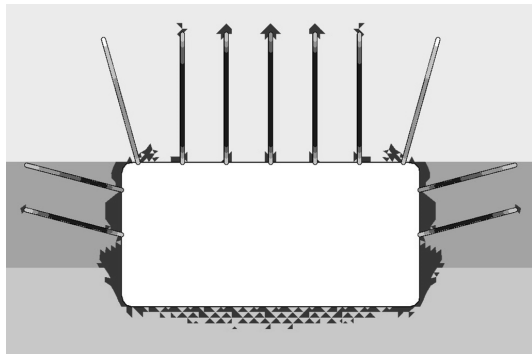
осреднённых геомеханических параметров  $Q$  и  $P$  в этих зонах изменяются к лучшему: применение боковых анкеров понижает значение параметра  $Q$  и значительно повышает значение минимальной компоненты тензора главных напряжений. Возможность разрушения вмещающих пород в боках выработки, которые служат опорой породно-анкерного перекрытия кровли, понижается. Каждый из анкеров, установленных в угольный пласт, уменьшает значение перемещений бока выработки на 30-33 %.



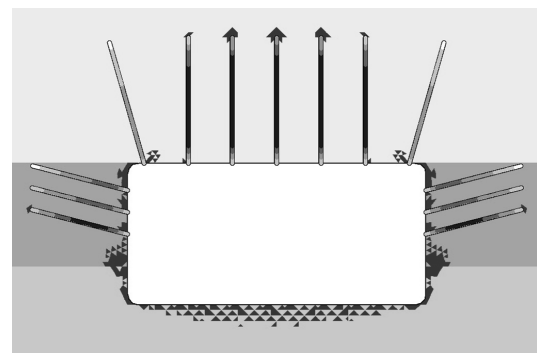
а) закреплена только кровля выработки;



б) опора перекрытия – один анкер;



в) опора перекрытия – два анкера;



г) опора перекрытия – три анкера

Рисунок 14 – Зона неупругих деформаций вокруг выработки с различным количеством боковых анкеров

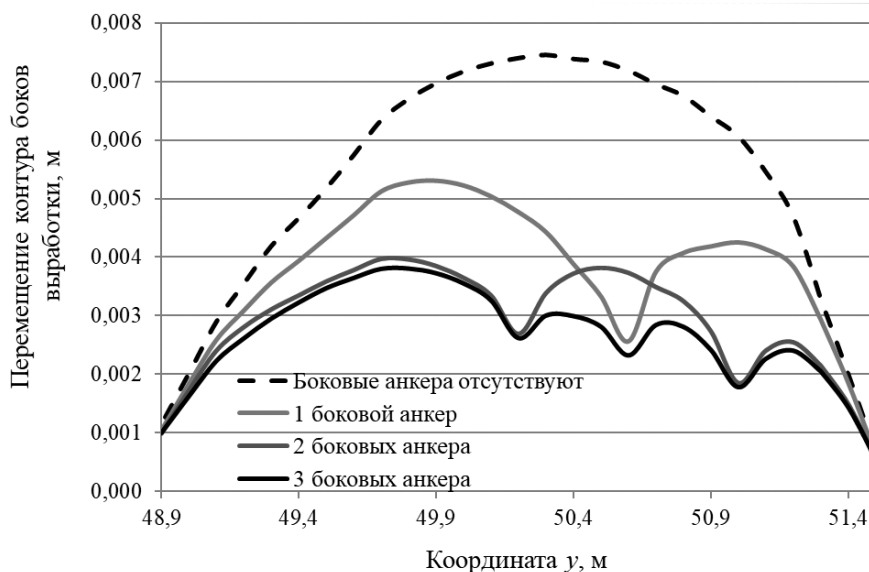


Рисунок 15 – Смещение боков выработки

Примером крепления боков по простой схеме с применением пластиковых анкеров является 43 конвейерный штрек пл.  $i_3$  шахты «Молодогвардейская»

ПАО «Краснодонуголь». Эта выработка прямоугольной формы проводилась на глубине 617 м комбайновым способом. Для поддержания выработки использовалось анкерное крепление. Рекомендуемая схема анкерной крепи – усиленная с перемычками, закрепленными АКпт, а для опорной части конструкции – крепление по простой схеме, рис. 16. Опора конструкции представлена двумя пластиковыми анкерами длиной 1,8 м, один из которых устанавливается в пласт, другой – над пластом в плоскости сечения под углом к напластованию.

Примером крепления боков по мощной схеме с применением пластиковых анкеров является западный фланговый вентиляционный ходок № 23 пл. із шахты «Суходольская-Восточная» ПАО «Краснодонуголь». Это выработка прямоугольной формы проводилась на глубине 915 м буровзрывным способом. Для поддержания выработки использовалась анкерная крепь. Рекомендуемая схема – усиленная с перемычками, закреплёнными АКпт. Мощность угольного пласта – 1,8-1,9 м, прочность угля – 15 МПа, наличие воды в забое, потеря несущей способности бока в нижней части – все эти факторы обусловили необходимость установки в угольный пласт на перемычках дополнительного пластикового анкера. Опорная часть конструкции анкерной крепи состоит из 3 анкеров, средний из которых установлен с наклоном назад, верхний и нижний – с наклоном на забой выработки.

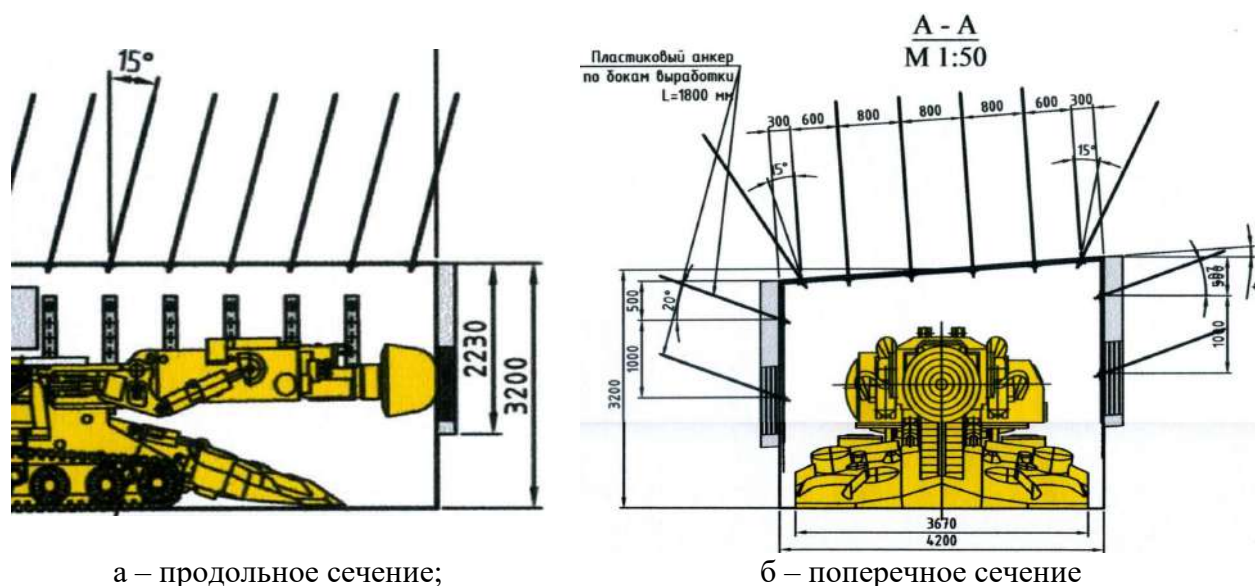
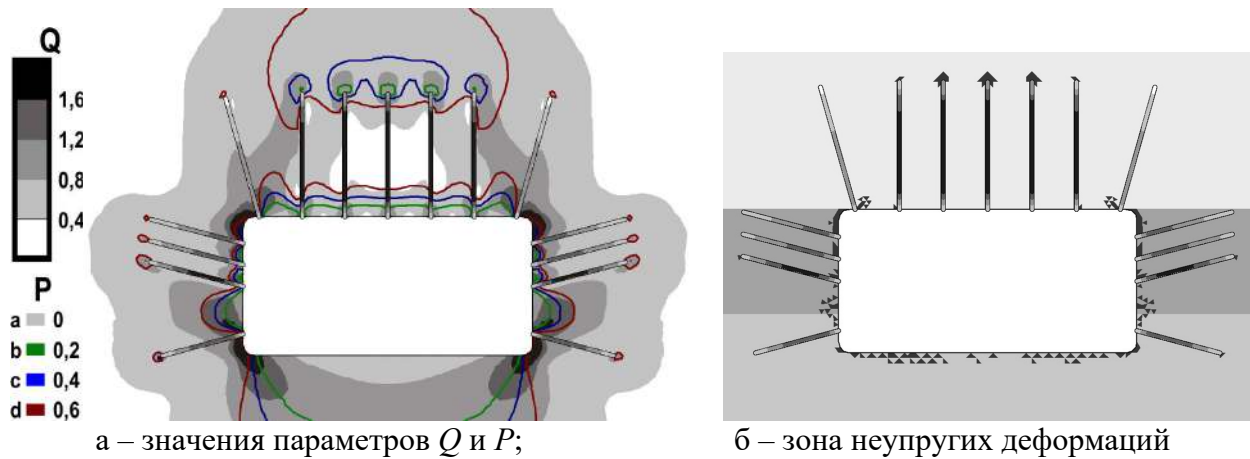


Рисунок 16 – Схема крепления 43 конвейерного штрека

#### 5.4 Основание конструкции анкерной крепи

Основание конструкции – это элементы конструкции, сформированные почвенными анкерами ПА из горных пород боков выработки, в том числе ниже её почвы, для восприятия нагрузки от конструкции. Способствует повышению устойчивости боков выработки и уменьшению пучения почвы.

Основание конструкции расположено в нижней части боков выработки, при условии прочных пород боков выработки не является обязательным элементом конструкции АК. Оно состоит из 1-2 сталеполимерных анкеров длиной 1,5-1,8 м (если угольный пласт расположен в нижней части сечения выработки, могут применяться пластиковые или деревянные анкера).

а – значения параметров  $Q$  и  $P$ ;

б – зона неупругих деформаций

Рисунок 17 – Распределение параметров вокруг выработки, закрепленной анкерной крепью с основанием конструкции

Почвенные анкера наклонены вниз под углом  $10-25^\circ$  и могут пересекать линию почвы. Анкера основания могут устанавливаться по простой, усиленной и мощной схеме.

Сравним напряженное состояние вмещающих пород вокруг выработки с анкерной крепью, конструкция которой включает в себя основание, рис. 17 а, б и без него, рис. 13 г и 14 г. Действие почвенного анкера хорошо видно на рис. 17 а – зона повышенной разнокомпонентности в нижней части боков выработки значительно сократилась; изолинии параметра  $P$  плотнее придвинулись к поверхности боков, что говорит о снижении уровня разгрузки вмещающих пород. Зона неупругих деформаций, рис. 17 б, в почве выработки также уменьшилась – это значит, что величина поднятия почвы при пучении понизится.

Чтобы проиллюстрировать это, построим графики относительного пучения почвы (относительно максимального перемещения при отсутствии боковых анкеров) выработки при различных схемах анкерной крепи, рис. 18.

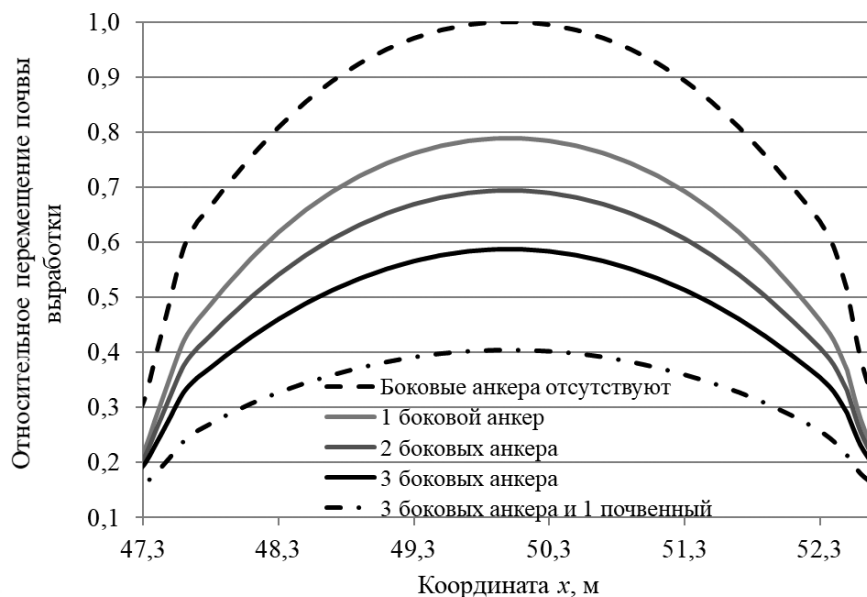
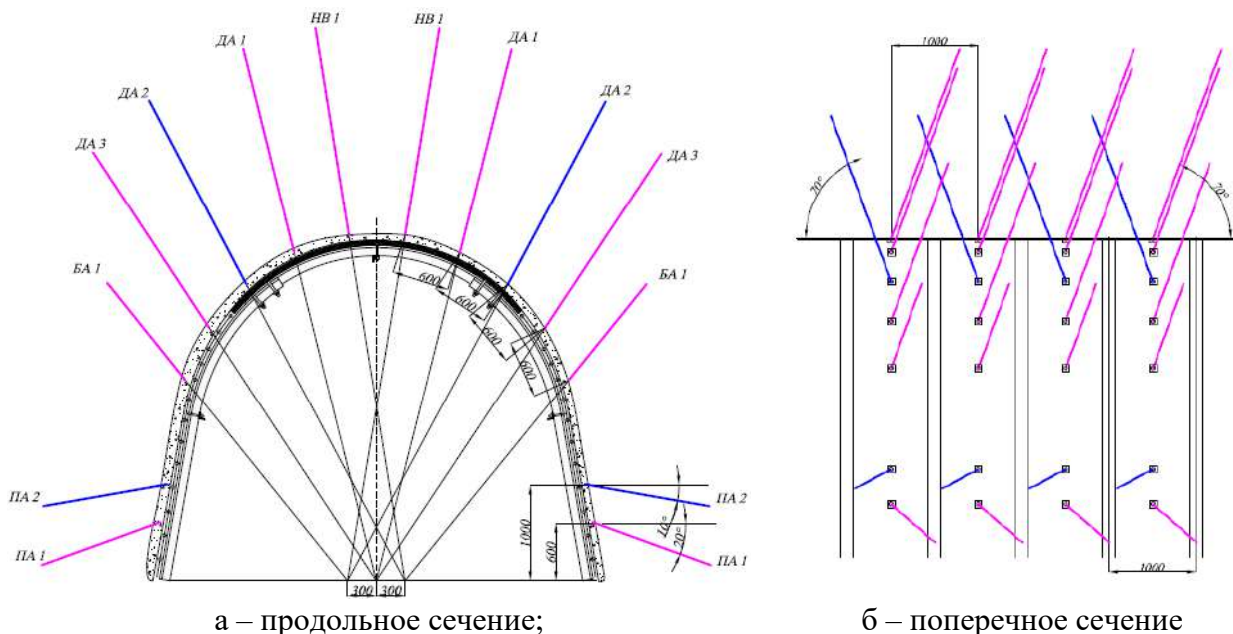


Рисунок 18 – Относительные перемещения почвы выработки при различных видах конструкций АК

Видно, что применение трёх боковых анкеров снижает пучение почвы на 40 %, одного почвенного – на 60 %.

В качестве примера использования почвенных анкеров по простой схеме можно привести схему крепления 593-го сборного штрека на участке ПК0-ПК-8 шахты «Юбилейная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь». Выработка на этом участке проводилась с надработкой и подработкой двух других выработок, что является осложняющим фактором. В связи с этим для сохранения устойчивости боков в конструкции анкерной крепи были добавлены почвенные анкера.



а – продольное сечение;  
б – поперечное сечение  
Рисунок 19 – Схема крепления 2-го западного откаточного штрека

Конструкция анкерной крепи с мощным основанием применялась при креплении 2-го западного откаточного штрека пл. С<sub>8</sub> на шахте «Терновская» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь». Этот штрек проводился в массиве, подработанном горными выработками по пластам С<sub>6</sub> и С<sub>5</sub>. Отличительная особенность проведения данной выработки – её почвой является верхняя граница достаточно хрупкого угольного пласта. В таких условиях прогнозные значения пучения почвы – 0,5-1,0 м. Для предотвращения процесса пучения и сохранения боков выработки от разрушения необходимо применение мощного основания конструкции анкерной крепи, рис. 19. Основание конструкции образовано анкерами ПА1 и ПА2, развёрнутыми на забой и на устье выработки.

В период проведения выработки выполнялось её геомеханическое обследование, показавшее, что состояние выработки



Рисунок 20 – Состояние 2-го западного откаточного штрека

в процессе проведения – устойчивое. Благодаря установке почвенных анкеров по мощной схеме процесс пучения почвы был блокирован. Участок поверхности выработки с анкерами ПА1 и ПА2 показан на рис. 20.

### 5.5 Защитные перемычки

Защитные перемычки – это элементы конструкции, предназначенные для противодействия опасному разрушению приконтурного массива вследствие освобождения энергии упругих деформаций, которые накапливаются с увеличением длины выработки. Элемент защитная перемычка (участок с полным перекрытием) состоит из 3 и более подряд идущих рядов анкерной крепи более мощной конструкции, чем основное крепление (неполное перекрытие). При основном виде крепления АКпр перемычки формируются установкой дополнительных анкеров по схеме АКпс или АКпт; при основном АКпс – за счёт установки дополнительных анкеров по схеме АКпт [31].

Длина каждой защитной перемычки и расстояние между ними определяются горно-геологическими условиями, назначением выработки, сроком её службы. Обычно длина перемычки составляет 4-5 рядов, расстояние между ними – 20 м. По схеме с полным перекрытием крепятся участки:

- в начале и в конце выработки с анкерной крепи (переходные участки);
- с изменением геометрии сечения выработки;
- геологических нарушений;
- сопряжения с другими выработками;
- подработки и надработки других выработок.

Применение защитных перемычек в конструкции анкерной крепи является обязательным для любых выработок с анкерной и анкерно-рамной крепью.

Рассчитаем параметры напряженного состояния вмещающих пород вокруг протяжённой горной выработки, закреплённой анкерной крепью различных видов: простой АК; простой анкерной крепи на основных участках длиной 20 м и усиленной на перемычках длиной 4 м; усиленной анкерной крепи на основных участках длиной 20 м и мощной на перемычках длиной 4 м.

На рис. 21 показано распределение значений параметра  $Q$ , характеризующего степень разнокомпонентности поля напряжений, в первом случае, когда элемент «перемычка» в конструкции анкерной крепи отсутствует.

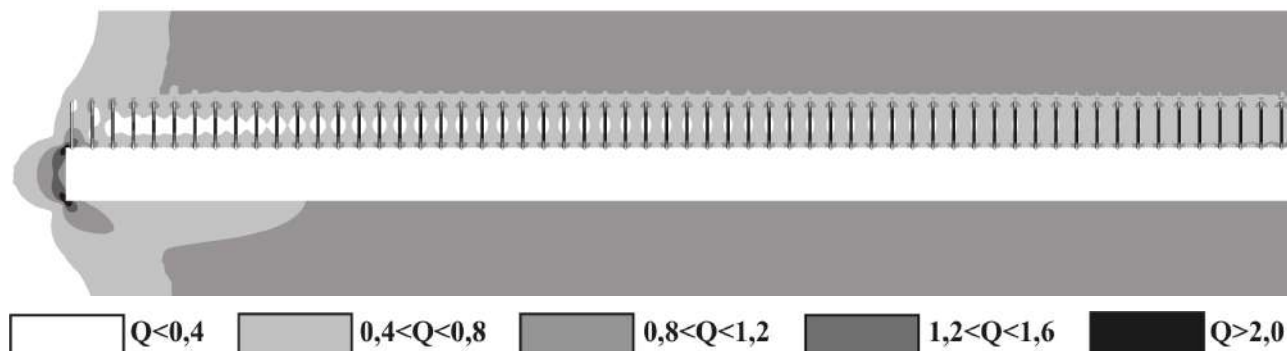


Рисунок 21 – Распределение значений параметра  $Q$  вокруг протяжённой выработки, закреплённой АКпр без перемычек

Видно, что в забое выработки происходит концентрация напряжений. В кровле при помощи сталеполимерных анкеров создано породно-анкерное перекрытие, значение параметра  $Q$  в котором не превышает 0,8, а вблизи забоя – 0,4. Но с отходом забоя область белого цвета внутри перекрытия с  $Q < 0,4$  постепенно уменьшается, и исчезает совсем. Анкера с отходом забоя все больше нагружаются, данный вид конструкции анкерной крепи не может нейтрализовать накапливаемые с увеличением длины выработки напряжения, возможна потеря несущей способности перекрытия.

При усилении этой же схемы перемычками из четырёх рядов анкерной крепи с дополнительными, наклонёнными на забой выработки, анкерами, рис. 22, процесс ослабления породно-анкерного перекрытия в кровле замедляется – область, в которой  $Q < 0,4$ , не исчезает полностью, как в правой части рис. 21, а лишь разделяется на отдельные зоны вокруг каждого анкерного ряда. На перемычках области с сохранённой природной монолитностью ( $Q < 0,4$ ) имеют большую площадь, чем на участках с неполным креплением, тем самым увеличивая взаимодействие между рядами анкеров.

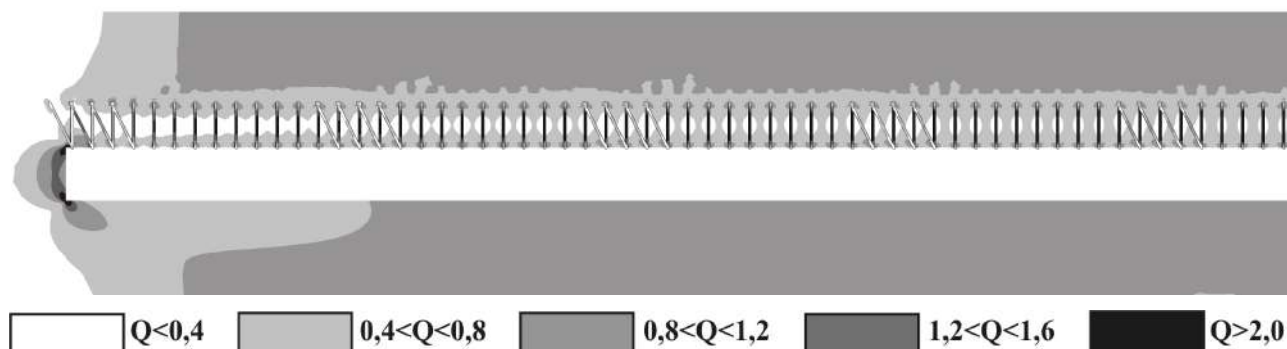


Рисунок 22 – Распределение значений параметра  $Q$  вокруг протяжённой выработки, закреплённой АКпр с усиленными перемычками

На рис. 23 показано распределение значений параметра  $Q$  в третьем случае, когда участки с неполным креплением по усиленной схеме чередуются с мощными перемычками.

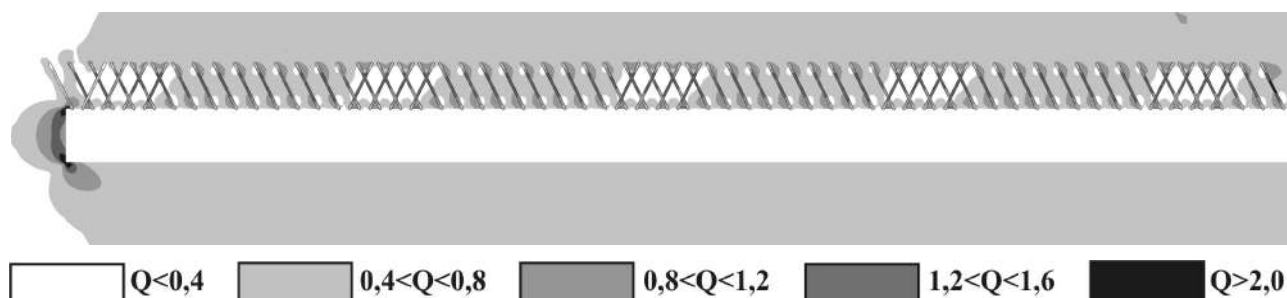


Рисунок 23 – Распределение значений параметра  $Q$  вокруг протяжённой выработки, закреплённой АКпр с мощными перемычками

Из рисунка видно, что на перемычках разрозненные области белого цвета, где  $Q < 0,4$ , объединяются в единые области, в которых сохранено природное напряженное состояние, породы не разгружены от горного давления. На участках с неполным перекрытием значение параметра  $Q$  также не выходит за предел допустимых значений для сохранения состояния, близкого к состоянию ненарушенного массива – 0,8.

Построим графики изменения среднего значения параметров  $Q$ ,  $P$  и  $Z$  в заанкерванной области вдоль выработки, рис. 24. Координата забоя выработки – 46 м.

В глубине горного массива, вне области влияния выработки, при боковом распоре  $\lambda = 1$  главные напряжения равны. Поэтому параметр  $Q$  равен 0, рис. 24 а. При подходе выработки происходит перераспределение напряжений с увеличением максимальной и уменьшением минимальной компонент главных напряжений. Вследствие этого параметр  $Q$  увеличивает своё значение и для случая АКпр без перемычек принимает пиковое значение 0,77 на уровне забоя выработки, затем в работу включается анкерная крепь, значение  $Q$  понижается до уровня 0,43. Получается, что вертикально расположенные анкера устанавливаются в разгруженный массив.

Затем, с отходом забоя и увеличением длины выработки, значение параметра  $Q$  постепенно возрастает, увеличивается степень разнокомпонентности поля напряжений в породах кровли выработки, проявляется действие фактора влияния длины выработки. При этом значение параметра  $Z$  уменьшается, рис. 24 в, понижая запас прочности горных пород в приконтурной области. Взаимодействие между рядами слабое. Можно уменьшить шаг установки анкеров. Это несколько улучшит ситуацию, но все равно не до конца. При дальнейшем увеличении длины выработки тенденция снижения запаса прочности сохраняется.

При усилении АКпр перемычками значения параметра разнокомпонентности уменьшаются по всей длине выработки, улучшая состояние кровли на 12-30 % по сравнению с предыдущим случаем. А значение параметра  $Z$  увеличивается на 15-35 %, при этом изменение этих параметров по сравнению с простой конструкцией анкерной крепи без перемычек происходит менее интенсивно.

При применении усиленной анкерной крепи на основных участках и мощной на перемычках состояние кровли улучшается ещё значительно – значение параметра  $Q$  уменьшается на 20-67% на различных участках выработки, а значение параметра  $Z$  увеличивается на 24-69%. Также следует отметить, что с увеличением длины выработки значение этих параметров стабилизируется.

С отходом забоя выработки уменьшается минимальная компонента главных напряжений – происходит разгрузка горного массива. Вследствие этого параметр  $P$  также уменьшается и для случая АКпр без перемычек продолжает уменьшаться с увеличением длины выработки, принимая наименьшее значение 0,36 на конце исследуемого участка выработки, рис. 24 б. Вертикально расположенные анкера сдерживают процесс разгрузки в кровле выработки (по сравнению с незакрепленной выработкой), но не блокируют его.

При усилении АКпр перемычками значение параметра  $P$  увеличивается по всей длине выработки, процесс разгрузки кровли от горного давления замедляется. Её состояние улучшается на 11-23% по сравнению с предыдущим случаем. При применении усиленной анкерной крепи на основных участках и мощной на перемычках состояние кровли улучшается ещё значительно – значение  $P$  увеличивается на 25-50% на различных участках выработки, рис. 24 б.



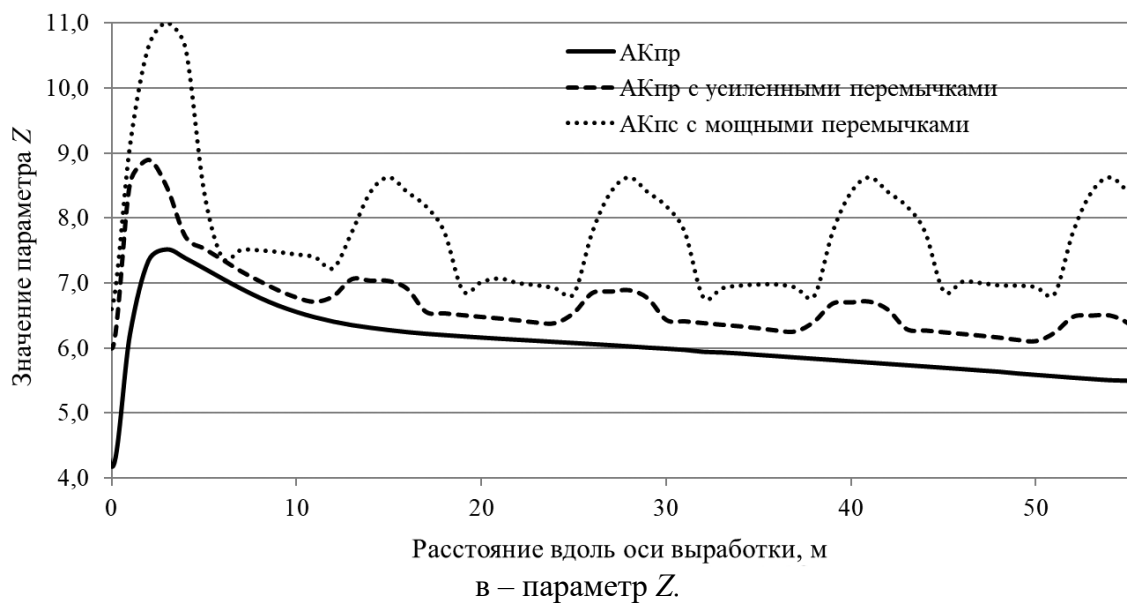
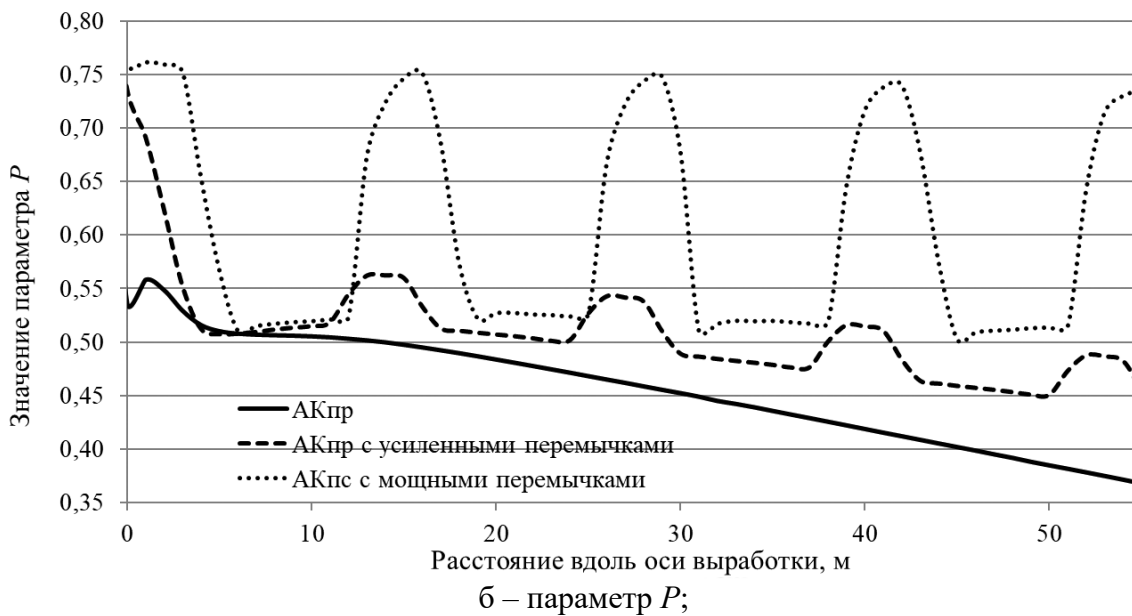
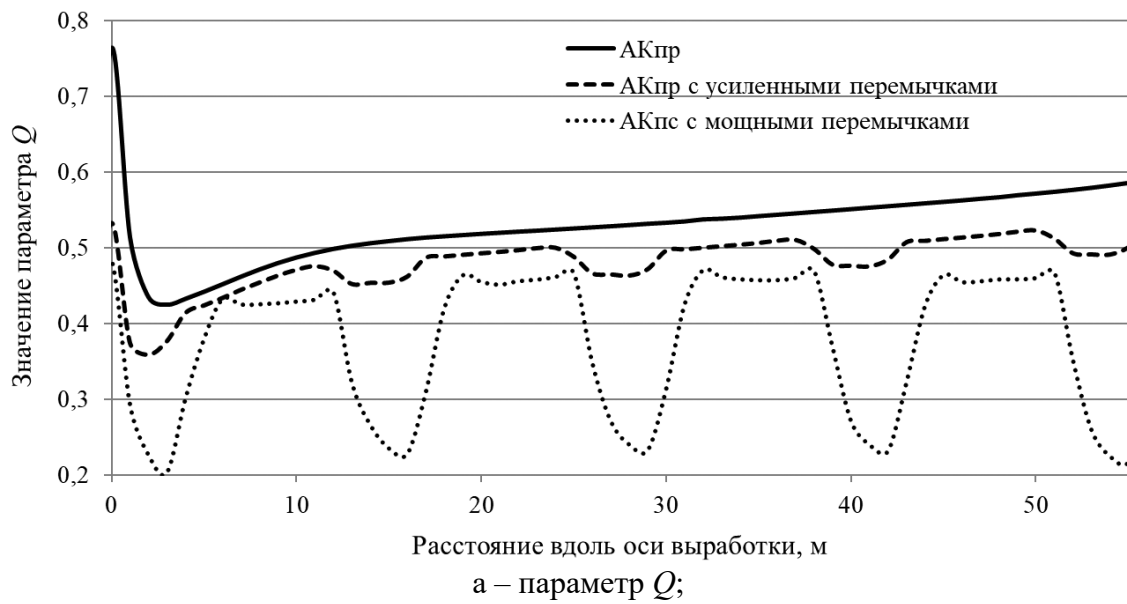
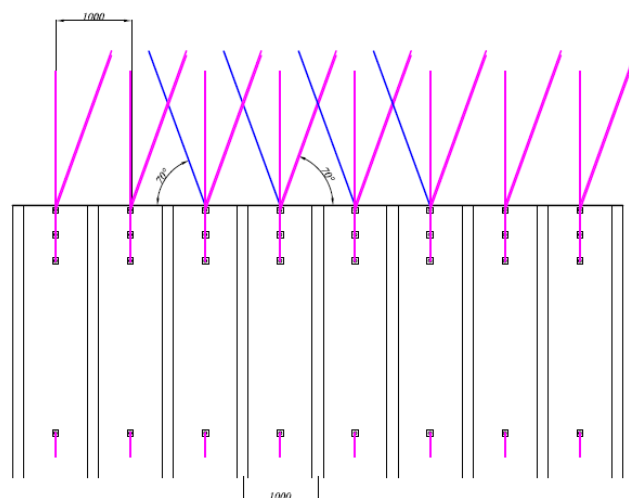
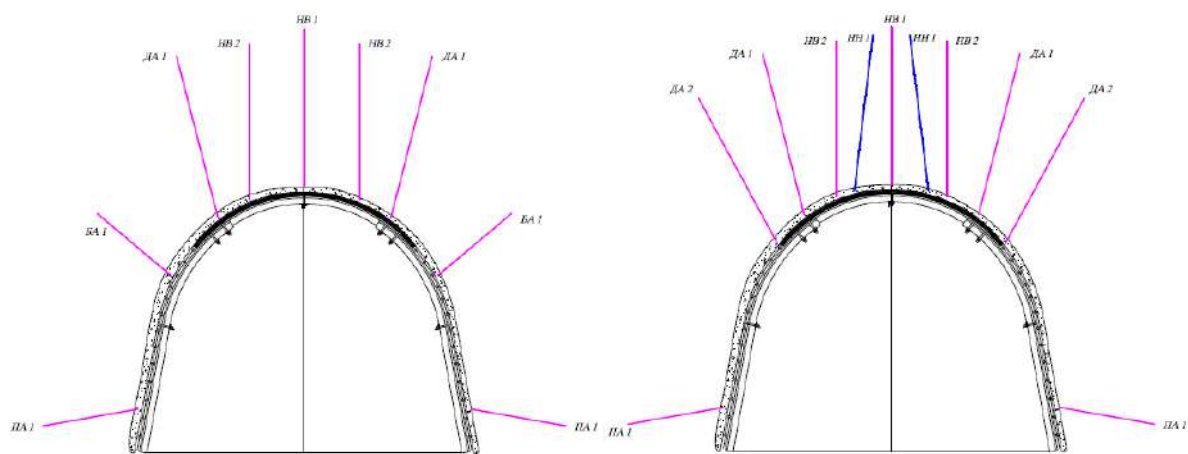


Рисунок 24 – Изменение средних значений геомеханических параметров в заанкерванной области вдоль оси выработки

Примером применения усиленных перемычек при простой схеме крепления может служить конвейерный ходок № 1 пласта К-2+ К-2-в СП «Шахта Дуванная» ПАО «Краснодонуголь». В непосредственной кровле выработки залегает слой известняка мощностью 1,5 м с пределом прочности на одноосное сжатие – 80-110 МПа, основная кровля – слой песчаника мощностью до 18-25 м, предел прочности на одноосное сжатие у которого – 80-90 МПа, что повышает устойчивость выработки. Рекомендуемая схема анкерной крепи – простая с перемычками, закреплёнными по усиленной схеме. Для усиления крепи в силовую часть конструкции дополнительно устанавливались три анкера с наклоном на забой и по одному анкеру в каждый бок выработки под угольный пласт. Протяжённость перемычки – 4 м (6 рядов). Расстояние между перемычками – 20 м.



а – продольное сечение;



б – поперечное сечение, участок с неполным креплением;

в – поперечное сечение на перемычках

Рисунок 25 – Схема крепления конвейерного ходка № 1

Мощные перемычки при усиленной схеме крепления на основных участках применялись при проведении 585 сборного штрека шахты «Юбилейная». Выработка проводилась по пласту С<sub>6</sub> с верхней и нижней подрывкой. Мощность угольного пласта – 0,94-1,12 м. Породы непосредственной кровли трещиноваты с частотой 3-5 тр./м и разбиты двумя системами трещин. На всем протяжении выработки в 8,56-9,90 м выше кровли пласта залегает угольный пласт С<sub>6</sub><sup>1</sup>. Междупластье представлено аргиллитом и алевролитом. В 1,72-2,06 м ниже почвы

пласта залегає прослой угля мощностью 0,08-0,14 м. Прогнозная конвергенция контура для незакреплённой выработки, вычисленная по стандартной методике, составила 203 мм вне зоны влияния очистных работ и 345 мм в зоне влияния очистных работ. В данных горно-геологических условиях с учётом необходимости сохранения выработки после прохождения первой лавы и поддержание её на повторное использование для отработки второй лавы применялись следующие схемы конструкций анкерной крепи, рис. 25: усиленные с наклоном на забой основных анкеров на участках с неполным креплением и мощные с установкой дополнительных усиливающих анкеров с наклоном назад на устье выработки на перемычках.

В период проведения выработки, отработки первой и второй лав выполнялось её геомеханическое обследование, показавшее, что состояние выработки в процессе проведения – устойчивое, рис. 26.



Рисунок 26 – Состояние 585 сборного штрека на окне первой лавы

### **5.6 Формирование конструкции опорно-анкерной крепи**

Для исследования влияния количества анкеров в элементах поперечного сечения конструкции анкерной крепи на устойчивость протяжённой горной выработки выполнены численные расчёты напряженно-деформированного состояния вмещающих пород со схемами, которые применяются в базовых горно-геологических условиях шахт Украины. Это комбинированная крепь – анкера с рамами из профиля СВП-22. Шаг установки крепи – 1 м. Исходные данные схем размещения анкеров в горной выработке представлены в табл. 3.

Здесь  $n_C$  – количество анкеров в силовой части перекрытия конструкции;  $n_{KB}$  – количество анкеров в подпорной части перекрытия конструкции;  $n_B$  – количество анкеров в боках выработки для формирования опоры перекрытия;  $n_{BP}$  – количество анкеров в боках выработки для формирования основы перекрытия.

Таблица 3 – Номера схем и состав конструкций анкерной крепи

Параметры крепи	Номер схемы, $N_c$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип крепи	АКпр		АКпс				АКпт		
Общее количество анкеров, $N_a$	4	6	8	10	10	12	13	15	17
$n_C$	2	2	2	2	2	2	2+1	2+1	2+1
$n_{KB}$	2	4	4	4	4	4	4+2	4+2	4+2
$n_B$	0	0	0	2	0	2	0	0	2
$n_{BP}$	0	0	2	2	4	4	4	4+2	4+2

Расчёты выполнены для условий с приемлемой для стандартных анкеров минимальной и максимальной прочностью пород, глубины заложения выработки, максимальной площади сечения выработки. Результаты расчётов для относительного запаса прочности  $Z$  (рис. 27) и долей нагрузки (рис. 28) на рамную и анкерную крепь и приконтурный массив предоставлены графиками среднего значения геомеханических параметров и их минимальных и максимальных отклонений при изменении горно-геологических условий.

Несущая способность конструкций анкерной крепи возрастает при её усилении от простой до мощной. С увеличением мощности конструкции анкерной крепи осуществляется перераспределение нагрузки: на анкерную и рамную крепь нагрузка уменьшается, а нагрузка на сформированные в массиве породные опорные элементы увеличивается. При  $Z = 6$  (порог монолитности), породные опорные элементы начинают работать в качестве крепи.

Влияние мощности конструкций анкерной крепи на устойчивость горной выработки оценивалось по изменению

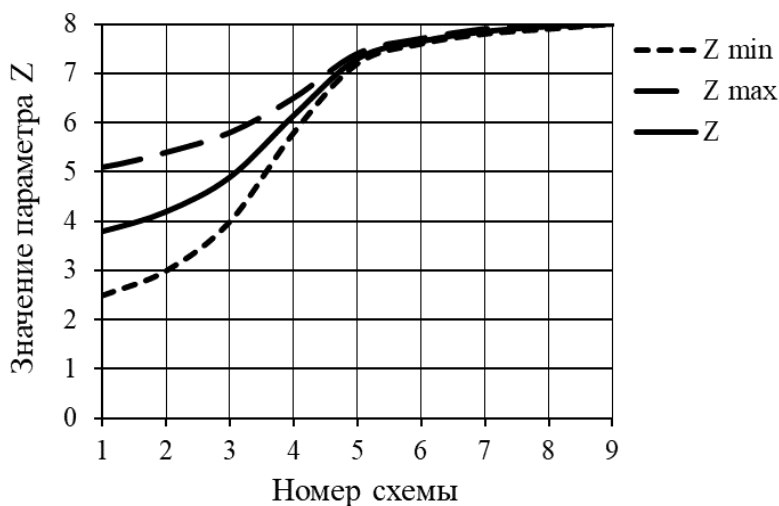


Рисунок 27 – Изменение относительной прочности пород при применении различных видов конструкций анкерной крепи

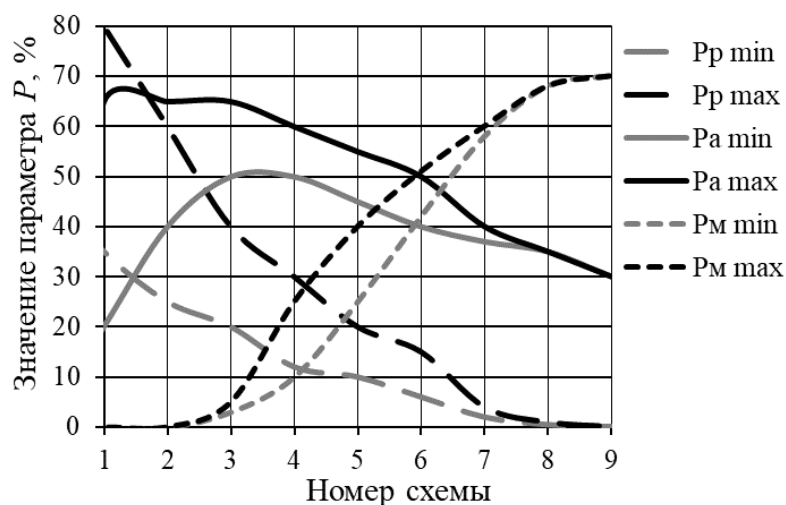


Рисунок 28 – Изменение нагрузки на крепь при применении различных видов конструкций анкерной крепи

площади поперечного сечения. На рис. 29 представлено среднее значение относительного уменьшения поперечного сечения горной выработки и его минимальные и максимальные значения в соответствии с диапазоном горно-геологических условий.

Результаты расчётов относительного уменьшения поперечного сечения горной выработки сравнивались с данными маркшейдерской съёмки размеров для условий 157 сборного штрека ш. «Степная», 136 сборного штрека ш. «Терновская», 3 северного конвейерного штрека шахты ООО «Краснолиманское». Относительная погрешность расчётных данных не превышала 15 %.

#### 6 Динамика изменения поля напряжений вокруг горной выработки во время технологического цикла анкерного крепления

При отставании от временного графика, определенного технологией установки анкерной крепи, подработанные породы, обнажённый забой выработки разгружаются от горного давления, происходит разуплотнение пород – теряется их природная монолитность. Анкерная крепь, установленная в потерявший монолитность породный массив, уже не сформирует из приконтурных пород единую конструкцию, гарантирующую сохранность выработки в течение всего срока её службы. В таком случае анкер выполняет только функцию подшивания непосредственной кровли к основной.

Исследуем динамику изменения поля напряжений вокруг горной выработки за время 15-ти технологических циклов анкерного крепления. Для этого рассмотрим задачу об определении полей напряжений вокруг движущегося забоя горной выработки в различные моменты времени при установке 15 рядов наклонных анкеров. Проведём расчёт поля напряжений для следующих условий. Высота выработки – 3 м, расстояние между рядами анкеров – 0,8 м, длина анкера – 2,4 м, угол наклона анкеров –  $70^\circ$  на забой. Время установки 1 ряда анкеров – 40 мин.

Сетка конечных элементов изменяется во время расчёта: при очередной выемке породы на величину заходки из расчётной схемы убираются лишние конечные элементы, при установке очередного ряда анкеров добавляются элементы, моделирующие анкерные штанги. На рис. 30 показан фрагмент сетки конечных элементов, соответствующей моменту установки 5 рядов анкеров.

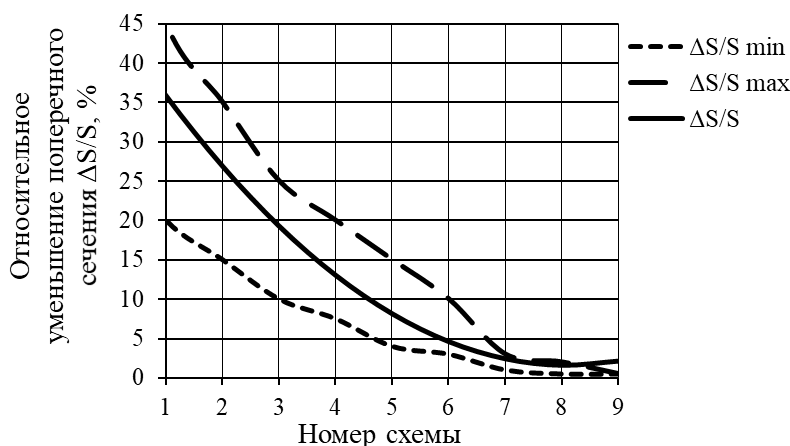


Рисунок 29 – Относительное уменьшение поперечного сечения горной выработки при применении различных видов конструкций анкерной крепи

Результаты расчётов приведены на рис. 31 и 32 (номер анкера соответствует порядку его установки).

Из анализа результатов расчёта следует: когда в незакреплённой горной выработке устанавливается первый ряд анкерной крепи, анкера начинают препятствовать расслоению пород в кровле выработки.

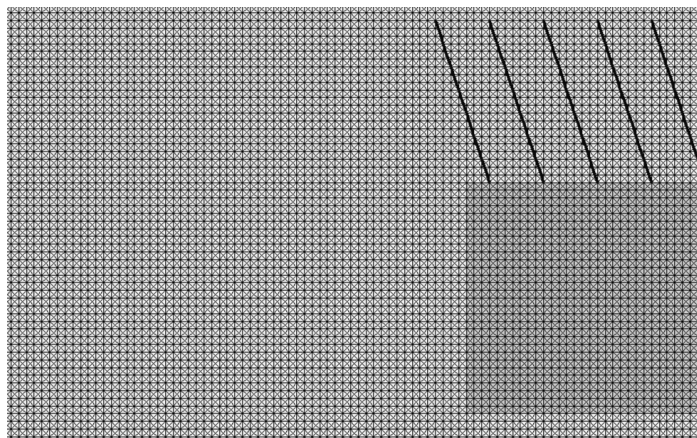


Рисунок 30 – Конечно-элементная сетка

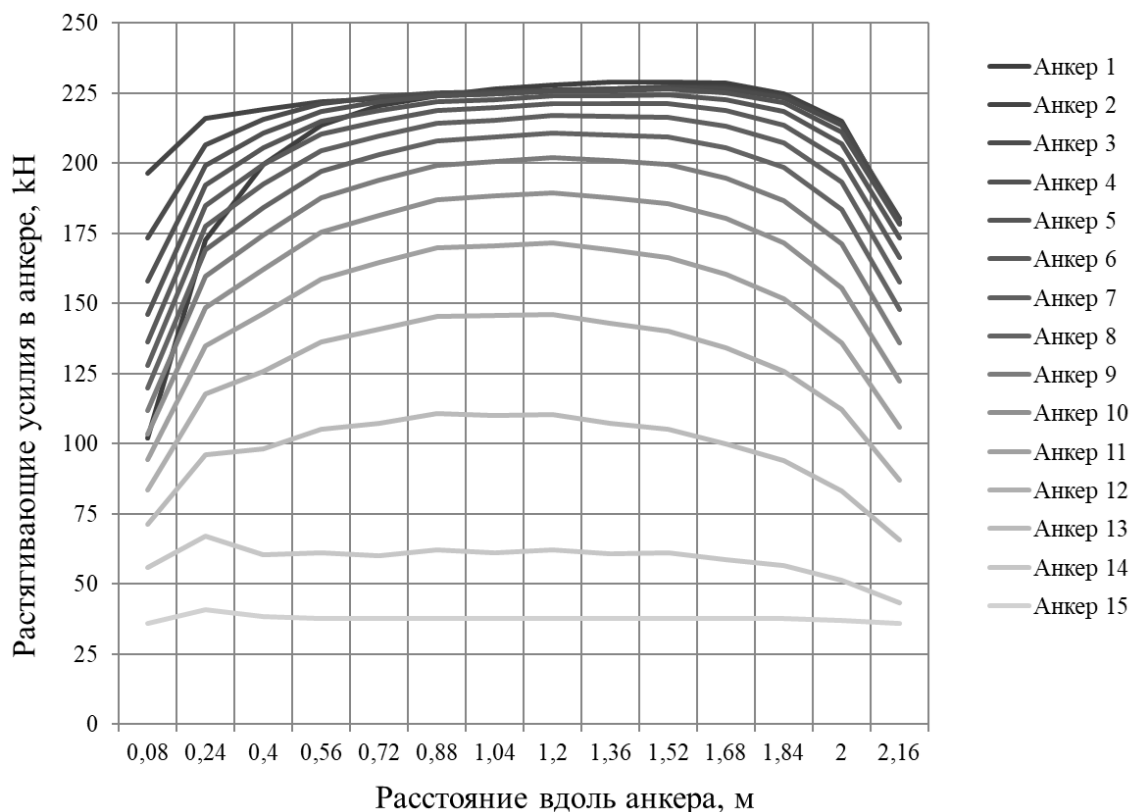


Рисунок 31 – Растягивающие усилия в анкерах после установки 15 рядов

Основной механизм их работы на данном этапе заключается в сшивании разрушенных пород непосредственной кровли и подвешивании их к более прочным породам основной кровли. Формируется переходный участок, на котором постепенно уменьшается разнокомпонентность поля напряжений – анкера понижают значение параметра  $Q$  в кровле выработки до безопасного уровня. При увеличении минимальной компоненты главных напряжений до величины порогового уровня горная порода имеет несущую способность, близкую к монолитной горной породе, снижая склонность к хрупкому разрушению. Сжатые области вокруг отдельных анкерных штанг пересекаются, образуя сплошное перекрытие. На данном этапе анкерная крепь уже полностью используется в качестве основного вида крепи.

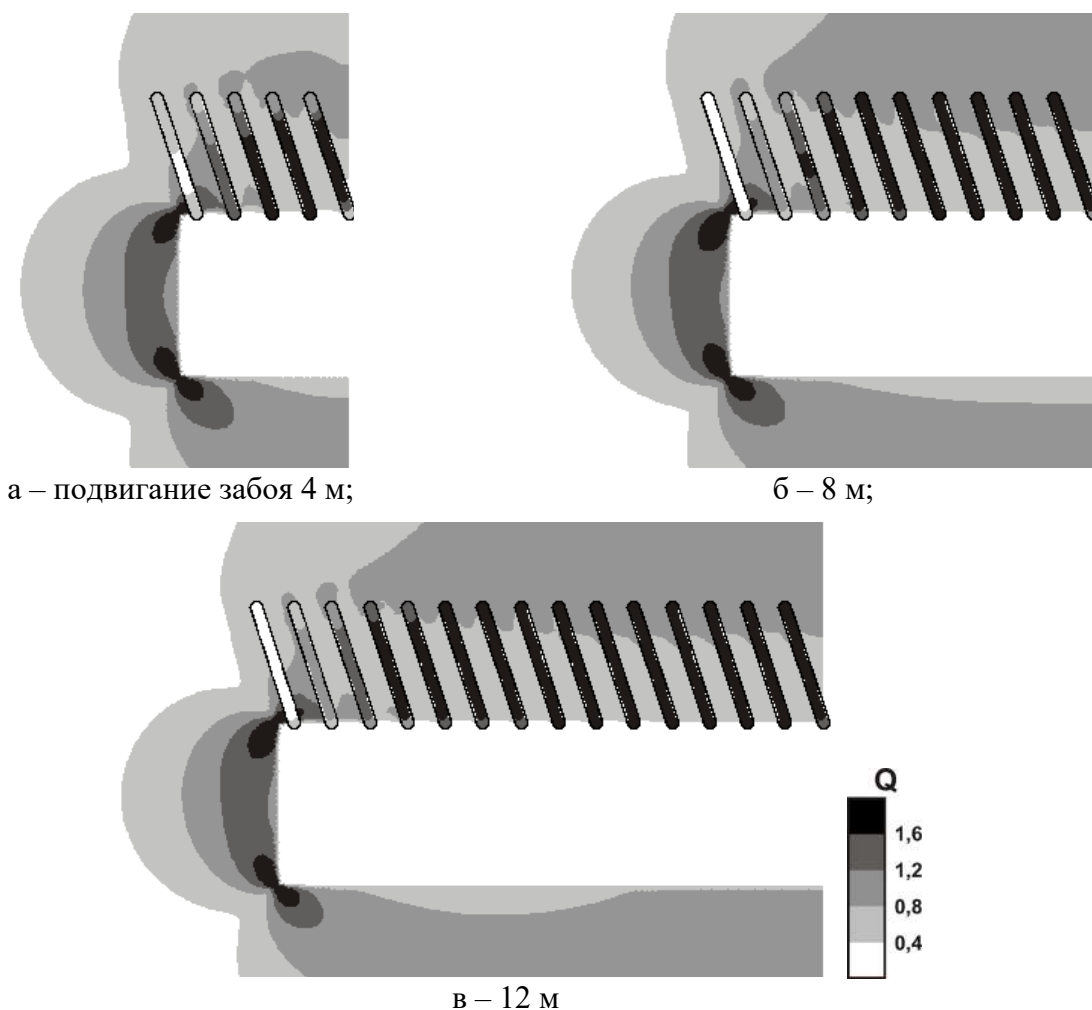


Рисунок 32 – Распределение значений параметра  $Q$  в массиве и усилий в анкерах

В дальнейшем, при установке непосредственно в забое выработки анкерных штанг, закреплённых полимерным составом, породные блоки в непосредственной близости от штанги после отхода забоя остаются сжатыми, поскольку имеют возможность смещения внутрь выработки только в рамках упругих деформаций штанги, а нагрузка на ближние к забою анкера уменьшается, рис. 32.

Для исследования влияния скорости проведения выработки и расстояния места установки анкеров до забоя проведены расчёты для нескольких технологических схем. Скорость проведения выработки изменялась в диапазоне 5-40 м/сут, с её дискретными значениями: 5, 7,5, 10, 15, 30 и 40 м/с. Расстояние от места установки анкеров до забоя варьировалось в диапазоне 0,3-5 м с дискретными значениями: 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8, 1, 1,5, 2, 3 и 5 м.

На рис. 33 приведены графики смещений кровли при установке анкеров: в 0,3 м от забоя выработки, в 1 м, в 2 м и в 5 м от забоя при скорости проведения выработки 10 м/сут. При установке анкерной крепи в 0,3 м от забоя анкер сразу же включаются в работу, сопротивляясь смещениям горной породы внутрь выработки. При отставании места установки анкерной крепи на большее расстояние от забоя приконтурный массив в течение определенного времени (для 5 м время достигает 12-18 ч) имеет возможность беспрепятственно смещаться, что приводит к его разгрузке. Таким образом, анкера будут устанавливаться в уже

нарушенную породу, а в случае слабых пород Западного Донбасса с низким значением предела прочности на растяжение – в практически разрушенную.

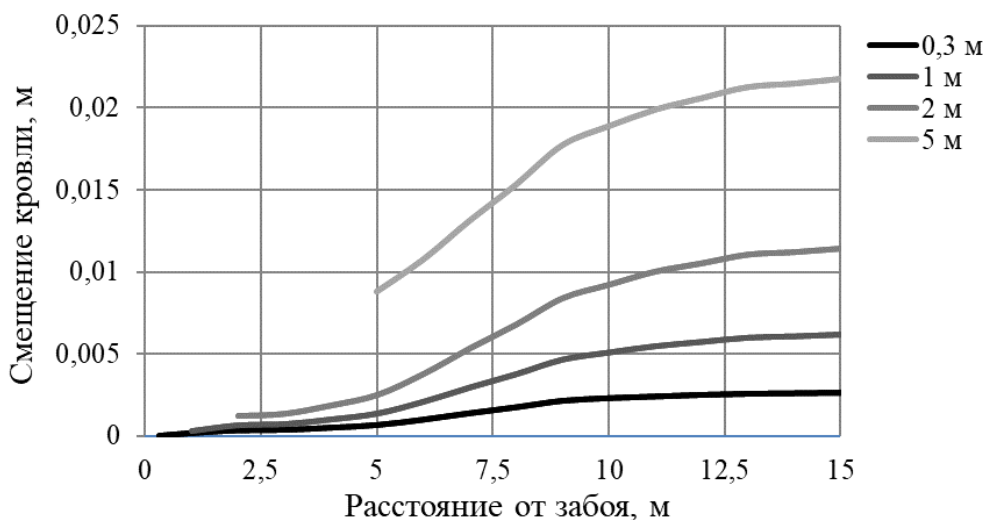


Рисунок 33 – Смещения кровли при установке анкеров в 0,3; 1; 2 и 5 м от забоя выработки при скорости проведения выработки 10 м/сут

Влияние изменения скорости проведения выработки при установке анкеров в 0,3, 1 и 2 м представлено на рис. 34. Оптимальной скоростью проведения выработки принята скорость, при которой в приконтурных породах сохраняется относительная прочность не менее 6 (параметр  $Z$ ).

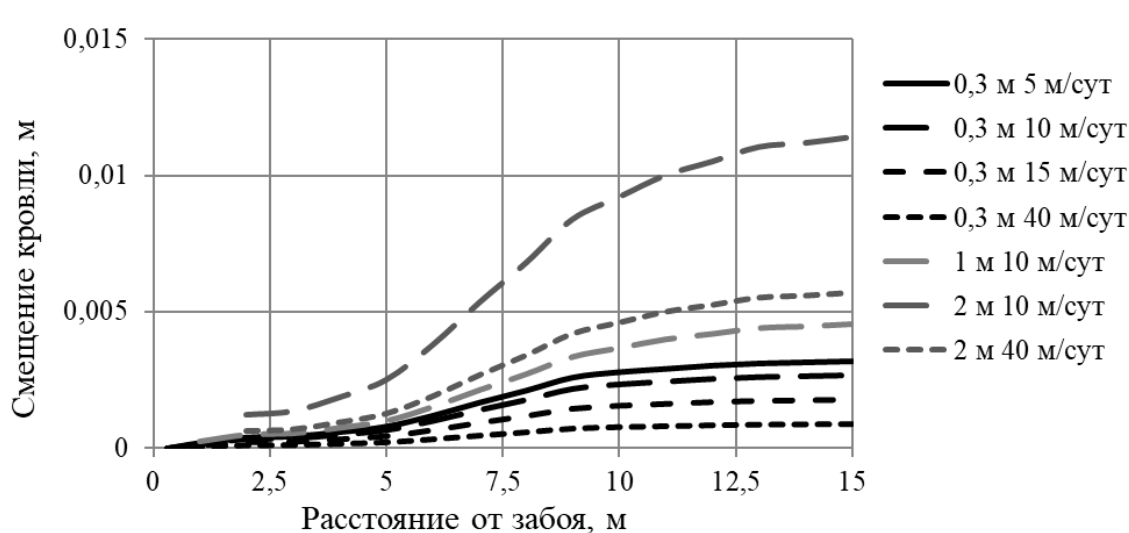


Рисунок 34 – Смещения кровли при установке анкеров в 0,3 м от забоя выработки при скорости проведения 5, 10, 15 и 40 м/сут, в 1 м и в 2 м от забоя при скорости проведения 10 и 40 м/сут

Представленные данные позволяют сделать вывод о существенном влиянии отставания установки анкеров от забоя на процесс последующего деформирования анкерных штанг и приконтурных пород. На основании полученных зависимостей определено, что оптимальное отставание ряда анкерной крепи от плоскости забоя при комбайновом способе проведения выработки составляет 300 мм при скорости проведения 5-10 м/сут, 400 мм при скорости 10-15 м/сут, 600 мм при скорости 20-30 м/сут; 1000 мм при скорости 30-40 м/сут.



## 7 Выводы

Для предупреждения саморазрушения приконтурных пород конструкция анкерной крепи должна состоять из следующих элементов: силовая часть перекрытия выработки; подпорная часть перекрытия выработки; опоры перекрытия выработки; основание конструкции; защитные перемычки.

При этом силовая часть перекрытия противодействует деформациям и смещению горных пород кровли выработки в её пространство. Подпорная часть воспринимает и передает нагрузку от силового элемента перекрытия на опору, также она необходима для управления сроком службы конструкции в зависимости от назначения выработки; опоры перекрытия передают нагрузку от перекрытия на основание, разгружая горные породы боков выработки. Основание конструкции способствует повышению устойчивости боков выработки и уменьшению пучения почвы.

Защитные перемычки противодействуют разрушению приконтурного массива вследствие освобождения энергии упругих деформаций, которые накапливаются с увеличением длины выработки. Применение элемента конструкции анкерной крепи «перемычка» с периодичностью 20-25 м блокирует негативное действие фактора влияния длины выработки, увеличивая относительную прочность пород в окрестности выработки при применении простых конструкций анкерной крепи до 6, усиленных – до 7,5 и мощных – до 8,5.

Увеличение количества анкеров в элементах конструкции анкерной крепи приводит к росту относительной прочности трехосно сжатых приконтурных пород. После достижения этим показателем порогового значения армированный массив начинает работать в качестве опор, несущая способность которых увеличивается при повышении мощности конструкции, при этом относительная потеря площади сечения выработки уменьшается. Сохранение приконтурного массива выработки с приемлемыми значениями относительной прочности 6,0-7,5 достигается при отставании установки ряда анкерной крепи от плоскости забоя на величину 300 мм при скорости её проведения 3-10 м/сут. Увеличение отставания установки ряда анкеров от забоя выработки приводит к уменьшению относительной прочности пород в конструкции крепи.

Полученные результаты позволили усовершенствовать технологию опорно-анкерного крепления, которая успешно применяется на шахтах ПАО «ДТЭК Павлоградуголь», ПАО «Краснодонуголь» и ООО «Краснолиманское».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 224 с.
2. Глушко В.Т., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. М.: Недра, 1982. 193 с.
3. Каретников В.Н., Клейменов В.Б., Нуждихин А.Г. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. М.: Недра, 1989. 571 с.
4. Литвинский Г.Г., Гайко Г.И., Кулдыркаев Н.И. Стальные рамные крепи горных выработок. Київ: Техніка, 1999. 216 с.
5. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. М.: Недра, 1984. 415 с.
6. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. К.: Наукова думка, 1989. 192 с.
7. Lautsch T. Roofbolting in three continents – a comparison. *Fourth International Symposium Roofbolting in Mining*. Aachen, 2001. P. 59-76.
8. A critical overview of U.S. rock bolting practices / J. Luo, C. Haycocks, M. Karmis, E. Westman. *Third International Symposium Roofbolting in Mining*. Aachen, 1998. P. 13-34.
9. Gerrard C. Rock bolting in theory. *Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting*. Abisko, Sweden, 1983. P. 3-29.

10. Мельников Н.И. Анкерная крепь. М.: Недра, 1980. 252 с.
11. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2002. 372 с.
12. Решетов С.Е., Ремезов А.В., Мышляев Б.К. Особенности современной технологии анкерования кровли, применяемой в США. *Уголь*. 1999. № 12. С. 77-78.
13. Минзарипов Р.Г. Совершенствование параметров сталеполимерного анкерного крепления полевых выработок шахт СУБРА. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006. №3. С. 312-319.
14. Комбинированные анкерные системы для повторного использования горных выработок / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др. Днепр: ЛизуновПрес, 2017. 188 с.
15. Arthur J. Support of Coal Mines in the United Kingdom. *Proceedings of the 21 International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, WV, 2002. P. 161-168.
16. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 2013. 714 p.
17. Non-linear finite element analysis of solids and structures / de Borst R., Crisfield M.A., Remmers, J.J.C., Verhoosel C.V. John Wiley & Sons, 2012. 516 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118375938>
18. Круковский О.П. Наукові основи технології опорно-анкерного кріплення гірничих виробок вугільних шахт: дис... д-ра техн. наук: 05.15.02. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2012. 361 с.
19. Круковский А.П. Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива при отходе забоя горной выработки. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. Дніпропетровськ: Дніпропетровський національний університет, 2011. Вип. 17. С. 175-181.
20. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М. Недра, 1987. 224 с.
21. Goodman R.E., Taylor R.L., Brekke T.L. A model for the mechanics of joined rock. *Proc. ASCE*. 1968. Vol. 94. P. 637-654.
22. Krukovskiy O., Bulich Y., Zemlianaia Y. Modification of the roof bolt support technology in the conditions of increasing coal mining intensity. *E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice*. 2019. №109. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900042>
23. Круковский А.П. Формирование породной опоры с применением анкера высокой несущей способности. *Геотехническая механика*. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2005. № 55. С. 82-91.
24. Круковский А.П. Влияние прочности закрепления анкеров на формирование несущего перекрытия в кровле горной выработки. *Геотехническая механика*. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2004. № 51. С. 239-250.
25. Терещук Р.Н. Определение рациональной плотности анкерования однородного приконтурного массива. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук: Кременчуц. нац. ун-т ім. М. Остроградського, 2013. Вип. 2. С. 130-137.
26. Круковский А.П. Влияние плотности установки высоконагруженных анкерных штанг на формирование системы опорного перекрытия. *Геотехническая механика*. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2003. № 47. С. 254-261.
27. Круковский А.П., Круковская В.В., Хворостян В.А. Технология опорно-анкерного крепления горных выработок угольных шахт Украины. *Уголь Украины*. 2013. № 2. С. 13-16.
28. Технологія анкерного кріплення гірничих виробок на шахтах України: стан та перспективи / Булат А.Ф., Попович І.М., Вівчаренко О.В., Круковский О.П. *Уголь Украины*. 2014. № 2. С. 3-7.
29. СОУ 10.1.05411357.010:2014. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги. [Чинний з 2014.11.10]. К.: Мінвуглепром України, 2014. 69 с.
30. Krukovskiy O.P. Application of roof bolting support in the Ukrainian mines. *The 25th World Mining Congress 2018: proceedings. Underground mining*. Astana, 2018. P. 1451-1459.
31. Круковский О.П., Круковська В.В., Хворостян В.О. Спосіб анкерного кріплення гірничої виробки з періодичним посиленням анкерно-породної конструкції. *Геотехнічна механіка*. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2019. № 144. С. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.053>

## REFERENCES

1. Stavrogin, A.N. and Protosenya, A.G. (1992), *Mehanika deformirovaniya i razrusheniya gorniyh porod* [The mechanics of deformation and destruction of rocks], Nedra, Moscow, Russia.
2. Glushko, V.T. and Vinogradov, V.V. (1982), *Razrushenie gorniyh porod i prognozirovaniye proyavleniy gornogo davleniya* [Rock destruction and prediction of rock pressure], Nedra, Moscow, USSR.
3. Karetnikov, V.N., Kleymenov, V.B. and Nuzhdihin, A.G. (1989), *Krepleniye kapitalnykh i podgotovitelnykh gorniyh vyirabotok* [Supporting of capital and preparatory mine workings], Nedra, Moscow, USSR.
4. Litvinskiy, G.G., Gayko, G.I. and Kuldyrkaev, N.I. (1999), *Stalnyye ramnyye krepki gorniyh vyirabotok* [Steel frame support for mine workings], Tekhnika, Kyiv, Ukraine.
5. Baklashov, I.V. and Kartoziya, B.A. (1984), *Mehanika podzemnykh sooruzheniy i konstruksiy krephey* [Mechanics of underground constructions and structures of supports], Nedra, Moscow, USSR.
6. Vinogradov, V.V. (1989), *Geomehanika upravleniya sostoyaniem massiva vblizi gorniyh vyirabotok* [Geomechanics of massif state control near mine working], Naukova dumka, Kyiv, USSR.
7. Lautsch, T. (2001), "Roofbolting in three continents – a comparison", *Fourth International Symposium Roofbolting in Mining*, Aachen, pp. 59-76.
8. Luo, J., Haycocks, C., Karmis, M. and Westman E. (1998), "A critical overview of U.S. rock bolting practices", *Third International Symposium Roofbolting in Mining*, Aachen, pp. 13-34.

9. Gerrard, C. (1983), "Rock bolting in theory", *Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting*, Abisko, Sweden, pp. 3-29.
10. Melnikov, N.I. (1980), *Ankernaya krep* [Roof bolting], Nedra, Moscow, USSR.
11. Bulat, A.F. and Vinogradov, V.V. (2002), *Oporno-ankernoe krepnenie gorniyh vyirabotok ugolnyih shaht* [The bearing-bolt supporting for coal mines workings], IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.
12. Reshetov, S.E., Remezov, A.V. and Myishlyayev, B.K. (1999), "Features of the modern technology of roof anchoring used in the USA", *Ugol*, no.12, pp. 77-78.
13. Minzaripov, R.G. (2006), "Improving the parameters of steel-polymer anchoring of field workings of mines SUBRA", *Gornyyi informatsionno analiticheskiy byulleten*, no.3, pp. 312-319.
14. Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Simanovich, G.A. et al. (2017), *Kombinirovannyye ankernyye sistemy dlya povtornogo ispolzovaniya gorniyh vyirabotok* [Combined anchor systems for mine workings reuse], LizunovPres, Dnepr, Ukraine.
15. Arthur, J. (2002), "Support of Coal Mines in the United Kingdom", *Proceedings of the 21 International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV, pp. 161-168.
16. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. and Zhu, J.Z. (2013), *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann, London, UK.
17. de Borst, R., Crisfield, M.A., Remmers, J.J.C. and Verhoosel, C.V. (2012), *Non-linear finite element analysis of solids and structures*, John Wiley & Sons, London, UK. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118375938>
18. Krukovskiy, O.P. (2012), "The scientific basis of technology support-anchor fastening of mining workings of coal mines", D.Sc. Thesis, The underground extraction of mineral deposits, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.
19. Krukovskiy, O.P. (2011), "Modelling changes of stress-strain state of solid edge during the distance of work-ing face of mine workings", *Problemy obchysluvalnoi mekhaniky i mitsnosti konstruksii*, no. 17, pp. 175-181.
20. Fadeev, A.B. (1987), *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [Finite Element Method in Geomechanics], Nedra, Moscow, USSR.
21. Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L. (1968), "A model for the mechanics of joined rock", *Proc. ASCE*, vol. 94, pp. 637-654.
22. Krukovskiy, O., Bulich, Y. and Zemlianaia, Y. (2019), "Modification of the roof bolt support technology in the conditions of increasing coal mining intensity", *E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice*, no.109. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900042>
23. Krukovskiy, O.P. (2005), "Formation of rock support using high load-bearing anchor", *Geo-Technical Mechanics*, no. 55, pp. 82-91.
24. Krukovskiy, O.P. (2004), "The effect of anchor fixing strength on the formation of a bearing overlap in a mining roof", *Geo-Technical Mechanics*, no.51, pp. 239-250.
25. Tereschuk, R.N. (2013), "Definition of rational anchoring density of homogenous surrounding massif", *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva*, no.2, pp. 130-137.
26. Krukovskiy, O.P. (2003), "The influence of the density of the installation of high-bearing anchor rods on the formation of the support floor system", *Geo-Technical Mechanics*, no. 47, pp. 254-261.
27. Krukovskiy, O.P., Krukovska, V.V. and Khvorostian, V.O. (2013), "The technology of bearing-bolt supporting of mine workings for Ukraine coal mines", *Ugol Ukrainy*, no.2, pp. 13-16.
28. Bulat, A.F., Popovych, I.M., Vivcharenko, O.V. and Krukovskiy, O.P. (2014), "Technology of mine workings anchoring in mines of Ukraine: state and prospects", *Ugol Ukrainy*, no.2, pp. 3-7.
29. Ukraine Ministry of Coal Industry (2014), *10.1.05411357. 010:2014. Systema zabezpechennia nadiinoho ta bezpechnoho funktsionuvannia hirnychkykh vyrobok iz ankernym kripnenniam. Zahalni tekhnichni vymohy* [10.1.05411357. 010:2014. System for ensuring reliable and safe operation of mine workings with anchoring. General technical requirements], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kyiv, Ukraine.
30. Krukovskiy, O.P. (2018), "Application of roof bolting support in the Ukrainian mines", *The 25th World Mining Congress 2018. Proceedings. Underground mining*, Astana, pp. 1451-1459.
31. Krukovskiy, O.P., Krukovska, V.V. and Khvorostian, V.O. (2019), "Method of roof-bolting support of mining with the periodic strength of anchor-rock structure", *Geo-Technical Mechanics*, no.144, pp. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.053>

#### Об авторе

**Круковский Александр Петрович**, член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, заместитель директора института по научной работе, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, [igtm@ukr.net](mailto:igtm@ukr.net)

#### About the author

**Krukovskiy Oleksandr Petrovych**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Deputy Director of the institute, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine, [igtm@ukr.net](mailto:igtm@ukr.net)

**Анотація.** За допомогою чисельного моделювання роботи анкерного кріплення досліджені умови формування вантажонесної опори одним анкером, опорно-анкерного перекриття системою анкерів і породно-анкерних елементів конструкції анкерного кріплення. Для реалізації поставлених завдань щодо вдосконалення технології

анкерного кріплення була сформульована концепція взаємодії породно-анкерних опор, при якій вони утворюють блоки, що формують в приконтурному масиві єдину конструкцію, здатну протидіяти гірському тиску. Показано, що така конструкція повинна складатися з наступних елементів: силової частини перекриття виробки; підпірної частини; опори; основи конструкції; захисних перемичок. При цьому силова частина перекриття протидіє деформації і зміщенню гірських порід покрівлі виробки в її простір. Підпірна частина сприймає і передає навантаження від силового елемента перекриття на опору, також вона необхідна для управління терміном служби конструкції в залежності від призначення виробки. Опори перекриття передають навантаження від перекриття на основу, розвантажуючи гірські породи боків виробки. Основа конструкції сприяє підвищенню стійкості боків виробки і зменшенню здимання підосви виробки. Захисні перемички протидіють руйнуванню приконтурного масиву внаслідок вивільнення енергії пружних деформацій, які накопичуються із збільшенням довжини виробки. Збільшення кількості анкерів в елементах конструкції анкерного кріплення призводить до зростання відносної міцності тривісно стиснутих приконтурних порід. Після досягнення цим показником порогового значення армований масив починає працювати в якості опори, несуча здатність якої збільшується при підвищенні потужності конструкції. Збереження приконтурного масиву виробки з прийнятними значеннями відносної міцності 6,0-7,5 досягається при відставанні установки ряду анкерного кріплення від площини забою на величину 300 мм при швидкості її проведення 3-10 м/добу. Збільшення відставання установки ряду анкерів від вибою виробки призводить до зменшення відносної міцності порід в конструкції кріплення.

Отримані результати дозволили удосконалити технологію опорно-анкерного кріплення, яка успішно застосовується на шахтах ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», ПАТ «Краснодонвугілля» і ТОВ «Краснолиманське».

**Ключові слова:** породно-анкерна конструкція, технологія анкерного кріплення, чисельне моделювання, елементи конструкції анкерного кріплення

**Abstract.** Using numerical simulation of the bolting work, the conditions for the formation of a load-bearing support by one anchor, formation of the support-anchor overlap by the anchor system and formation of elements of rock-bolting structure are investigated. To improve the technology of anchoring, a new concept has been developed. It consists in the fact that the interacting rock-anchor supports form blocks which are united into a single construction that can resist rock pressure. It is shown that it should consist of the following elements: a load-bearing part of the canopy; a backing-up part of the canopy; supports of the canopy; a base of the structure and elements "bridges". The load-bearing part of the canopy counteracts deformations of the roof rocks and their displacement into the roadway. The backup part takes the load from the load-bearing element of the canopy and transmit it to the support. This part is also needed for controlling life period of the construction depending on the roadway operation. Supports of the canopy transmit load from the canopy to the base. The base of the construction facilitates increasing of stability of the roadway wall and decreasing of the floor heaving. The "bridges" prevent the edge rock mass from breaking due to the released strain energy, which is accumulated with each elongation of the roadway. An increase in the number of bolts in structural elements of anchor supports leads to an increase in the relative strength of triaxially compressed edge rocks. After this indicator reaches the threshold value, the reinforced rocks begin to work as a support, the bearing capacity of which increases with increasing construction power. Acceptable values of the relative strength of 6.0-7.5 are stored in the rocks around the mine working, if the distance between the mine face and the first row of bolts does not exceed 300 mm at a driving rate of 3-10 m/day. An increase in the distance between the mine face and the first row of bolts leads to a decrease in the relative strength of the rocks in the construction.

These results made it possible to improve the bearing-bolt supporting technology, which is successfully used in the coal mines of DTEK Pavlogradugol PJSC, Krasnodonugol PJSC and Krasnolimanskoye LLC.

**Keywords:** rock-bolting structure, technology of anchoring, numerical simulation, elements in the bolting construction

*Статья поступила в редакцию 17.02.2020*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. С.П. Минеевым*