

УДК 622.831

**В.В. Фомичев<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц.,  
**В.А. Соцков<sup>1</sup>**  
**А.В. Мальхин<sup>2</sup>**

1 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: fomichov@inbox.ru  
 2 – Шевченковская РГА, г. Киев, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАМНО-АНКЕРНОЙ КРЕПИ ДЕМОНТАЖНОГО ШТРЕКА ПРИ ПОДХОДЕ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

**V.V. Fomichov<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,  
**V.A. Sotskov<sup>1</sup>**,  
**A.V. Malykhin<sup>2</sup>**

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: fomichov@inbox.ru  
 2 – Shevchenkivska RDA, Kyiv, Ukraine

## DETERMINATION AND ANALYSIS OF THE ACCEPTABLE BENCHMARK CHANGES OF THE STRESS STRAIN STATE OF FRAME AND ANCHOR FASTENING ELEMENTS OF DISMANTLING DRIFT WHEN APPROACHING A WORKING FACE

**Цель.** Установление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния рамного и анкерного крепления демонтиражного штрека при приближении очистных работ.

**Методика.** Использован апробированный способ проведения вычислительного эксперимента с помощью метода конечных элементов. Для выполнения поставленной задачи была построена пространственная модель слоистого горного массива с надделением каждой литологической разности реальными физико-механическими характеристиками согласно данным геологической разведки в окрестности демонтиражного штрека ШП „Степная“. В выработке установлено рамное и анкерное крепление согласно данных паспорта крепления. Смоделировано пошаговое приближение очистного забоя к выработке. Вычислительный эксперимент выполнен в четыре этапа при различном расстоянии от очистного забоя до штрека.

**Результаты.** Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния крепежной системы. Выявлены закономерности перераспределения напряжений в рамном и анкерном креплении при изменении расстояния от очистного забоя до выработки. Определены области концентрации напряжений, опасные с точки зрения потери устойчивости элементов крепежной системы.

**Научная новизна.** Научная новизна проведенного исследования заключается в установлении закономерности влияния приближения очистного забоя на напряженно-деформированное состояние элементов крепежной системы демонтиражного штрека.

**Практическая значимость.** Полученные результаты будут использованы при обосновании параметров крепежной системы горных выработок в зоне влияния очистных работ.

**Ключевые слова:** *очистные работы, демонтиражный штрек, вычислительный эксперимент*

**Актуальность.** На шахтах Украины широкое распространение получила рамно-анкерная крепь. При этом конструктивные особенности этой крепи имеют широкий диапазон. Фактически в пределах конкретной шахты реализуется самостоятельная конфигурация взаимодействия рамы и анкеров. Это связано как с геологическими особенностями горного массива, так и с технологическими возможностями производства. Анализ воздействия установленных сталеполлимерных анкеров на НДС системы „крепь – горный массив“ показал, что для шахт Западного Донбасса определяющим следует считать не число, а их местоположение [1,2]. Однако, в ряде случаев, использование только сталеполлимерных анкеров не

позволяет добиться положительных результатов по обеспечению поддержания горных выработок [3–4]. Такие анкера, в ряде случаев, при приближении очистного забоя к выработке теряют свою несущую способность и не могут обеспечивать устойчивость боков выработки.

С другой стороны, на шахтах Кузбасса широкое распространение получили канатные анкера. Хотя установка таких анкеров требует значительных производственных затрат, положительный эффект по поддержанию кровли вентиляционных выработок в зоне влияния очистных работ наблюдается в натуральных условиях и лабораторно доказан. Но геологические условия Кузбасса в значительной степени отличаются от условий шахт Западного Донбасса, поэтому возникает необходимость, на основе уже

существующих научных данных, провести анализ поведения канатных анкеров в единой грузонесущей системе рамно-анкерной крепи и в условиях конкретной шахты Западного Донбасса.

**Цель** выполненных исследований заключается в выявлении особенностей поведения канатных анкеров в зоне взаимного влияния горных выработок и подтверждении возможности их использования в сложных горно-геологических условиях.

**Постановка задачи.** Задача решена путем проведения вычислительного эксперимента на основе метода конечных элементов. Горно-геологические условия, принятые при проведении расчетов, выбраны для 161 лавы шахты „Степная“. При моделировании демонтированного штрека использовалось сечение арочной формы под крепь КШПУ. Для его поддержания использовалось рамно-анкерное крепление. В сечение вписана рамная крепь с профилем СВП-27. Анкерное крепление состоит из 4 сталеполимерных анкеров длиной 2,4 м и двух канатных длиной 6 м. Полученная модель представлена на рис. 1. Диаметр сечения анкеров 0,014 м. Анкера установлены в массив непосредственно над рамой.

#### Изложение основного материала.

**Анализ НДС системы „крепь выработки – горный массив“ при приближении к демонтированному штреку очистного забоя.** В ходе проведения вычислительного эксперимента использовались четыре модели системы „крепь – горный массив“, различающиеся расстоянием между боком демонтированного штрека и плоскостью очистного забоя. Это расстояние составило 20 ; 10 ; 5 и 0,3 м. По результатам проведенных расчетов были построены эпюры приведенных напряжений, которые и были использованы в дальнейшем анализе. Кроме них, не приведены в статье, но использованы для построения заключений, эпюры вертикальных напряжений, полных и пластических деформаций. На первом этапе расчета очистной забой находится на расстоянии 20 м от демонтированного штрека. Исходя из полученных эпюр, стойки рамы уже нагружены неравномерно, что обусловлено приближением лавы. Левая сторона рамы нагружена значительно слабее, концентрация напряжений практически не превышает 162 МПа.

Анкерное крепление относительно рамы имеет меньшие напряжения, тем не менее, отчетливо просматриваются концентрации напряжений в зонах, где анкера пересекают границы породных слоев. Так как при моделировании были заданы условия контактов, наиболее приближенные к реальным условиям, то между породными слоями происходит проскальзывание, то есть смещение слоев относительно друг друга.

В целом, можно отметить, что на данном этапе расчета рамно-анкерное крепление выдерживает оказываемые нагрузки и справляется с функцией поддержания выработки. Так как это первый этап расчета и очистной забой здесь максимально удален, его влияние на распределение напряжений в крепи выработки еще незначительно и не превышает 16%.

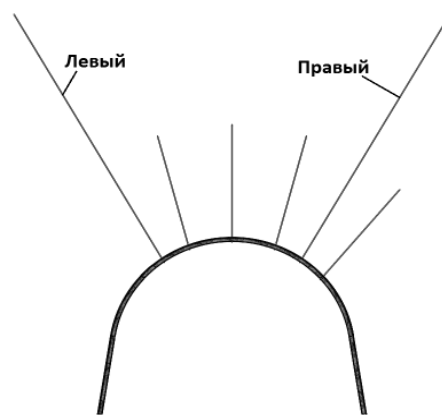


Рис. 1. Модель рамно-анкерного крепления: левый, правый – анкера

На следующем этапе проведения вычислительного эксперимента были получены результаты для 10 и 5 м удаления плоскости очистного забоя от демонтированного штрека. Поскольку данные результаты во многом схожи, проанализируем их совместно.

На эпюре распределения напряжений при удалении очистного забоя на расстояние 10 м от выработки отчетливо видно неравномерное распределение внутренних усилий в раме. Так правая сторона крепи нагружена сильнее, чем левая. Наибольшие концентрации напряжений отмечаются в стойке, преимущественно на внешней стороне, где максимум напряжений достигаем 198 МПа. При этом верхний сегмент рамы нагружен намного меньше, в диапазоне 102...127 МПа. В связи с перемещениями породных слоев относительно друг друга, вызванными горным давлением, анкера смещаются и деформируются профиль рамы. Аналогичный эффект будет присутствовать и на всех последующих этапах расчета. Здесь и далее, напряжения в анкерах во многом зависят от смещения породных слоев. Участки анкеров, находящиеся на границах слоев, принимают на себя значительные перерезывающие нагрузки.

При сравнительном анализе эпюры напряжений, при шаге расчета 5 м до демонтированного штрека, с результатом предыдущего расчета можно отметить ряд значительных изменений, связанных с увеличением напряжений сразу в нескольких участках крепи.

Нагрузки в правой стойке увеличились по всей длине профиля. В верхнем сегменте рамы произошли изменения, связанные с перераспределением напряжений. Напряжения здесь существенно не возросли и составляют 110...151 МПа. Картина напряжений в левой стойке не претерпела изменений – максимум напряжений составил 113 МПа.

Существенные изменения произошли в анкерном крепении. Рост напряжений происходит по длине анкера. Также на данном этапе расчета впервые появилась пластическая деформация самих анкеров. Для характеристики таких изменений необходимо анализировать рамно-анкерное крепление сквозь призму результатов расчетов для всего массива. Так как, в связи с продвижением очистного забоя, увели-

чивается выработанное пространство, это способствует приближению зоны перегиба слоев к демонтажному штреку. Эти процессы способствуют активизации перемещений в породных слоях кровли по всей модели, в общем, и над выработкой в частности. Собственно, эти факторы и приводят к увеличению концентрации напряжений в рамно-анкерном креплении вплоть до наступления пластических деформаций стальных конструкций, вызванных превышением предела текучести стали.

Анализируя вышеописанные эпюры распределения напряжений в креплении демонтажного штрека, можно отметить, что пропорционально приближению очистного забоя увеличивается давление на все элементы крепи, что приводит к появлению деформаций контура и уменьшению сечения выработки.

В первую очередь, на эпюре интенсивности напряжений рамно-анкерного крепления, при подходе очистного забоя к демонтажному штреку, стоит отметить многократное увеличение концентраций напряжений в раме. Горное давление не только спровоцировало деформацию рамы, но и привело к скачку напряжений в анкерах правой части конструкции крепи, что говорит о частичной потере несущей способности конструкции в целом. Такое значительное увеличение горного давления на данном участке модели обусловлено обрушением пород кровли в выработанное пространство, которое находится в непосредственной близости от выработки, что приводит к проседанию вышележащих слоев и смещению зоны перегиба слоев непосредственно в область отпорного влияния крепи.

Канатные анкера, левый и правый, ощутимо разошлись в картине перераспределения напряжений, вызванных проведением добычных работ в непосредственной близости от выработки. Анкер, расположенный со стороны подхода очистной выработки, попал в зону высоких поперечных деформаций, связанных с прогибом породных слоев кровли очистной выработки. Выполняя свою естественную функцию, анкер сопротивляется сдвигу слоев, однако, на данном этапе расчета, отчетливо видно, что это сопротивление приводит к значительным пластическим деформациям. Движение слоев стало настолько агрессивным, что состояние правой части анкерного крепления близко к критическому, когда возможно локальное разрушение тела анкера. При этом закономерным является тот факт, что анкера, расположенные на противоположной очистному забою стороне выработки, частично разгружаются.

В связи с обрушением пород в выработанное пространство, которое находится теперь непосредственно возле демонтажного штрека, анкера проседают вместе с породой, частично переходят в предельное состояние и изменяют свое первоначальное месторасположение. При этом крайний правый анкер перестает эффективно сопротивляться горному давлению и полностью смещается вместе с горной породой. Кроме того, остальные сталеполимерные анкера, в разной степени, также перестают активно сопротивляться горному давлению. Грубое сравнение напря-

женно-деформационных характеристик правого канатного анкера и других элементов анкерного крепления показывает, что основную функцию по поддержанию кровли демонтажного штрека осуществляет только этот анкер.

Анализ данных результатов расчета позволяет сделать заключение о том, что применение канатных анкеров позволяет снизить нагрузку в целом на крепь выработки и обеспечивать ее устойчивость вплоть до момента разрушения канатного анкера, вызванного выходом механизированного комплекса в демонтажный штрек. До этого момента НДС канатных анкеров не является критичным с точки зрения конструктивного состояния этих объектов.

**Результат влияния положений очистного забоя относительно демонтажной камеры на изменение напряжений в канатных анкерах.** Как уже было сказано выше, левый и правый канатные анкера ведут себя по-разному при проведении различных этапов вычислительного эксперимента. Если картина изменения напряжений в левом анкере достаточно проста и носит характер близкий к линейному, то в случае с правым анкером это утверждение не срабатывает. Можно заметить, что изменение картины напряжений в правом анкере происходит не только в количественном, но и в качественном смысле. Поэтому выполнять оценку поведения материала анкера только на доступных эпюрах следует считать недостаточным.

Для сравнения изменения состояния канатных анкеров применим энергетическую теорию Губера-Мизеса-Генки. В качестве параметра оценки состояния анкеров используем удельную потенциальную энергию изменения формы, вычислив ее, используя базы данных всех четырех расчетов проведенного вычислительного эксперимента. Именно в данной постановке задачи становится возможным выполнить такой анализ, поскольку анкера моделируются как объемные объекты.

Удельная потенциальная энергия изменения формы может быть описана следующим образом

$$A_{form} = A_{def} - A_0, \quad (1)$$

где  $A_{def}$  – полная удельная потенциальная энергия деформации;  $A_0$  – удельная потенциальная энергия мощного изменения объема анкера.

В момент перехода металла в пластическое состояние в условиях объемного напряженного состояния, преобразуя выражение (1), с использованием классических уравнений теории упругости, получим

$$A_{form} = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости.

Полученные таким образом значения максимум удельной потенциальной энергии изменения

формы для левого и правого канатных анкеров приведены на рис. 2.

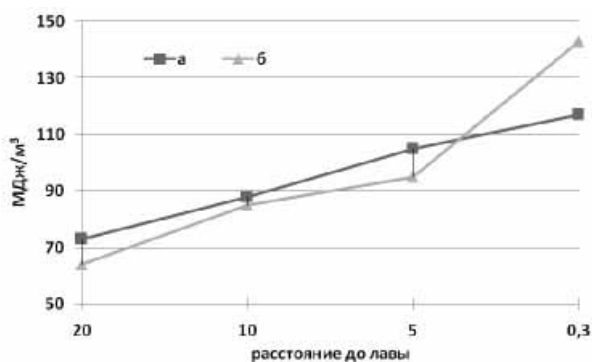


Рис. 2. Графики удельной потенциальной энергии изменения формы канатного анкера: а) левый; б) правый

Анализируя подобные графики, для конкретных горно-геологических условий, становится возможным определять состояние канатных анкеров при подходе лавы к демонтажному штреку и таким образом выполнять поиск оптимальных технологических показателей рамно-анкерной крепи.

Данный подход обеспечивает достаточную универсальность, поскольку не зависит ни от вида нагружения крепи, ни от ее геометрических характеристик, при этом, при условии соблюдения сплошности модели, позволяет оценить состояние не только канатных анкеров, но и любого элемента крепи выработки не только в линейной постановке задач геомеханики, но и в нелинейной.

**Выводы.** Применение канатных анкеров в конструкции рамно-анкерной крепи для условий шахт Западного Донбасса повышает устойчивость подготовительной выработки при приближении к ней очистного забоя. По сравнению со сталеполимерными, канатные анкеры дольше сопротивляются воздействию очистного забоя и обеспечивают устойчивость выработки вплоть до момента подхода добычного комплекса к демонтажному штреку. Применение канатных анкеров позволяет уменьшить число устанавливаемых сталеполимерных анкеров и упростить требования к их позиционированию. Изменение напряжений в канатных анкерах при приближении очистного забоя имеет нелинейный характер и различается по виду функциональной зависимости.

#### Список литературы / References

1. Цикра А.А. Исследование особенностей разрушения контакта сталеполимерного анкера с породной стенкой шпура / А.А. Цикра // Вестник Криворожского технического университета – 2007. – Вып. 16. – С. 229–234.

Tsikra, A.A. (2007), “Study of the features of the destruction of contact between a steel-polymer anchor and

a rock wall”, *Bulletin of Krivoy Rog Technical University*, Issue 16, pp. 229–234.

2. Поротников В.В. Анализ режимов анкерной крепи в слабых породах Западного Донбасса / В.В. Поротников // Науковий вісник НГУ – 2004. – № 2. – С. 10–12.

Porotnikov, V.V., (2004), “Analysis of the modes of roof bolting in weak rocks of the Western Donbass”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 2, pp. 10–12.

3. Фомичёв В.В. Исследование особенностей моделирования взаимодействия анкера с окружающей породой численными методами: сборник трудов III Международ. науч.-практ. конф. „Перспектива развития Прокопьевско-Киселевского угольного района как составная часть комплексного инновационного плана моногородов“ / В.В. Фомичёв, В.Ю. Медяник, Т.В. Маслова – Прокопьевск: ГУ КузГТУ, 2011. – С. 190–193.

Fomichov, V.V., Medyanik, V.Yu. and Maslova, T.V. (2011), “The study features of modeling the interaction with the surrounding rock anchors numerical methods”, *Proc. of the 3rd International Scientific and Practical Conf. “The prospect of Prokopyevsko-Kiselevsky coal district as a part of a comprehensive plan for the innovation industry towns”*, Prokopyevsk, GU KuzGTU, pp. 190–193.

4. Kovalevscaj, I., Chervatuk, V., Fomichov, V. (2011), “The problem with increasing metal-content of a development working’s combined support”, *Proc. of the 5th International Scientific-Practical Conf. “School Underground Mining. New Geoinformational and Technical Systems in Mining”*, pp. 23–27, Balkema, CRC Press, Netherlands.

**Мета.** Встановлення закономірностей зміни напружено-деформованого стану рамного й анкерного кріплення демонтажного штреку при наближенні очисних робіт.

**Методика.** Використано апробований спосіб проведення обчислювального експерименту за допомогою методу кінцевих елементів. Для виконання поставленого завдання була побудована просторова модель шаруватого гірського масиву з наділенням кожної літологічної різниці реальними фізико-механічними характеристиками згідно з даними геологічної розвідки в околиці демонтажного штреку ШП „Степова“. У виробці встановлено рамне та анкерне кріплення згідно з даними паспорта кріплення. Змодельоване покрокове наближення очисного вибою до виробки. Обчислювальний експеримент виконаний в чотири етапи при різній відстані від очисного вибою до штреку.

**Результати.** Виконано аналіз напружено-деформованого стану системи кріплення. Виявлені закономірності перерозподілу напружень у рамному й анкерному кріпленні при зміні відстані від очисного вибою до виробки. Визначені області концентрації напружень, небезпечні з точки зору втрати стійкості елементів системи кріплення.

**Наукова новизна.** Наукова новизна проведеного дослідження полягає у встановленні закономірності

впливу наближення очисного вибою на напружено-деформований стан елементів системи кріплення демонтажного штреку.

**Практична значимість.** Отримані результати будуть використані при обґрунтуванні параметрів системи кріплення гірничих виробок у зоні впливу очисних робіт.

**Ключові слова:** очисні роботи, демонтажний штрек, обчислювальний експеримент

**Purpose.** To determine the patterns of stress-strain state of the frame and anchoring of the dismantling roadway when approaching the stoping.

**Methodology.** We have used the approved method of computer simulation by the finite element method. To fulfill the task we have created the three-dimensional model of layered rock massif taking into account real physical and mechanical characteristics of each lithologic layer according to the geological survey which had been carried out near the dismantling drift of the mine "Stepnaya". We have installed frame and anchor support in the roadway according to the requirements of the timbering standard. We have modeled step by step approaching of

the working face. The computational experiment has been carried out in four stages at different distances from the working face to the drift.

**Findings.** We have analyzed the stress-strain state of the mounting system and established the regularities of the redistribution of stresses in the frame and anchoring support under changing distance from the working face to the roadway. The areas of stress concentration where the elements fastening system is prone to buckling failure has been defined.

**Originality.** We have established the influence of the distance to the working face on the stress-strain state of the elements of the fastening system of the dismantling roadway.

**Practical value.** The obtained results might be used for substantiation of the parameters of the fastening system of mine roadways in the area of influence of the stoping.

**Keywords:** stoping, demolition drift, computational experiment

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Бондаренком. Дата надходження рукопису 29.04.13.*

Baohua Yu, Chuanliang Yan, Jingen Deng,  
Wenliang Li, Lianbo Hu

State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting,  
China University of Petroleum, Beijing, China,  
e-mail: yanchuanliang@163.com

## ROCK MECHANICAL PROPERTIES AND BOREHOLE STABILITY OF GAS SHALE

Баохуа Юй, Чуаньян Янь, Цзіньгень Ден,  
Веньлян Лі, Ляньбо Ху

Державна головна лабораторія нафтових ресурсів і розвідки, Китайський університет нафти, Пекін, КНР,  
e-mail: yanchuanliang@163.com

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТІЙКІСТЬ СТІНОК СВЕРДЛОВИН ПРИ БУРІННІ НА СЛАНЦЕВИЙ ГАЗ

**Abstract.** Serious borehole instability occurs frequently during drilling in shale gas reservoirs. Shale gas reservoirs are featured by tight matrix, well-developed micro-fissures and laminations, and their peculiar mechanical properties are different from those of ordinary tight sandstones or carbonates. Thus, implementing correlative studies is of great significance to drilling and subsequent reservoir stimulation. Rock mechanical tests are performed to gas shale from south of China by the MTS-816 Rock Test System. The variation of rock mechanical properties with the angle between axial stress and the bedding plane normal (coring angle) is analyzed by the laboratory tests and a failure criterion is verified and applied to determine the strength of gas shale. The shale strength decreases first and then increases with the increasing of coring angle. It gets the maximum value with the coring angle of 0° and gets the minimum value with the coring angle of about 60°. The Young's modulus and Poisson's ratio increase with the increase of coring angle. Besides, the borehole stability model of shale gas well is established by combining transverse isotropic constitutive model and the continuously variable cohesion strength criterion. The collapse pressure is lowest when drilling to the maximum horizontal stress direction and reaches its maximum when drilling to the minimum horizontal stress direction.

**Key words:** shale gas; rock mechanics; anisotropy; failure criterion; coring angle; borehole stability

**Introduction.** Increasing fuel prices, the eminent fear of the limited conventional energy resources, and the projected

growth of heavy industry have placed great pressure on energy supplies. As a typical representative of unconventional resources, shale gas has attracted increasing attention in recent years [1]. According to an official report from the Energy Information Administration (EIA), the

© Баохуа Юй, Чуаньян Янь, Цзіньгень Ден, Веньлян Лі,  
Ляньбо Ху, 2014