

УДК 622.28

© В.В. Фомичев, В.Н. Почепов, Л.Я. Фомичева, В.В. Лапко

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ  
ПОДДЕРЖИВАЕМОЙ ДВУХУРОВНЕВОЙ АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ ПРИ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ  
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

© V. Fomychov, V. Pochepov, L. Fomychova, V. Lapko

**THE INVESTIGATION OF STABILITY OF THE WORKING ROOF  
SUPPORTED BY TWO-LEVEL ROOF BOLTING FOR DYNAMIC  
CHARACTERISTICS OF THE GEOMECHANICAL SYSTEM**

Сохранение эксплуатационных характеристик горных выработок, поддерживаемых анкерной крепью, с усложнением горно-геологических условий требует применения двухуровневой анкерной крепью. Для определения оптимальных параметров такой крепи необходимо определять условия установки отдельных анкеров при влиянии на них проходческого и очистного забоев. Это влияние на анкера, устанавливаемые в одной плоскости, изменяется во времени. Проведенный вычислительный эксперимент позволил определить область допустимых значений углов установки анкеров в условиях динамически изменяемого напряженно-деформированного состояния геомеханической системы.

Збереження експлуатаційних характеристик гірничих виробок, які підтримуються анкерним кріпленням, з ускладненням гірничо-геологічних умов вимагає застосування дворівневого анкерного кріплення. Для визначення оптимальних параметрів такого кріплення необхідно визначити умови установки окремих анкерів при впливі на них прохідницького й очистного вибоїв. Цей вплив на анкери, які встановлені в одній площині, змінюється у часі. Проведений обчислювальний експеримент дозволив визначити область припустимих значень кутів установки анкеров в умовах динамічно змінюваного напружено-деформованого стану геомеханічної системи.

**Введение.** В настоящее время подавляющая часть горных выработок угольных шахт и рудников проводится с применением различных вариантов анкерной крепи. При этом происходит расширение технологических возможностей подземной добычи полезных ископаемых связанное с изменением горно-геологических и горно-технологических условий эксплуатации подземных сооружений [1, 2].

Поэтому, все чаще, для обеспечения устойчивого состояния выемочных выработок и их сопряжений (рис. 1) на весь период эксплуатации, применяют двухуровневую схему анкерного крепления, где кроме анкеров длиной до 3 м (I уровень), используются анкеры глубокого заложения (II уровень). Анкеры второго уровня закрепляются в устойчивых породах кровли – за пределами свода естественного обрушения и с учетом ослабления и деформации боков выработки. При этом неустойчивые породы кровли скрепляются анкерами первого уровня и «подвешиваются» на анкерах второго уровня к устойчивым породам кровли за пределами естественного свода обрушения.

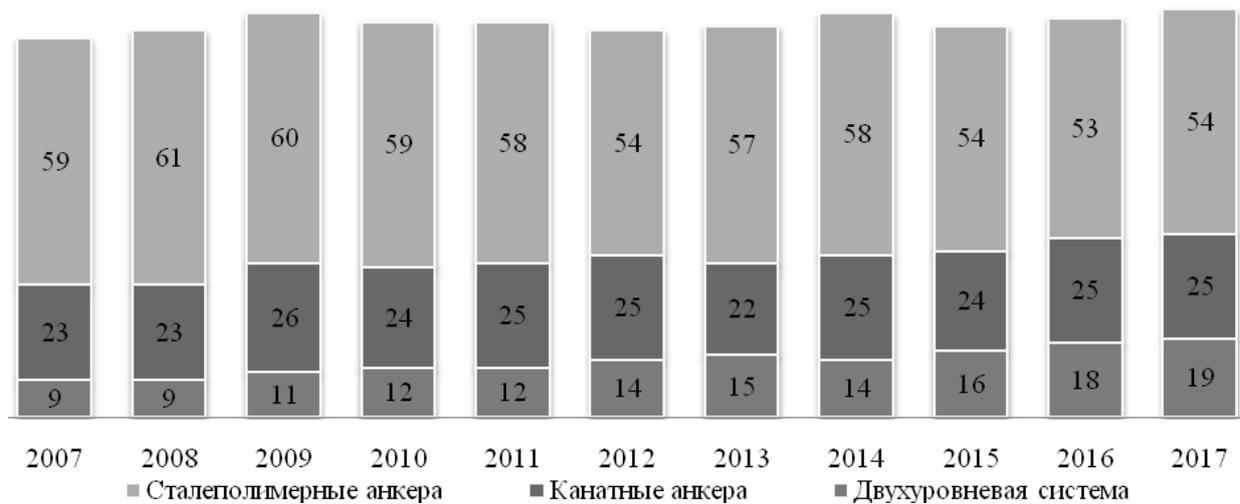


Рис. 1. Доля в анкерном креплении выработок сталеполлимерных и канатных анкеров, и двухуровневого анкерного крепления

Диаграмма на рис. 1 составленная на основе данных Международного сообщества геомехаников (ISRM) показывает уверенный рост объемов применения двухуровневой анкерной крепи во вновь пройденных выработках. Проблема обеспечения эффективности применения такой системы крепления, в различных условиях эксплуатации выработок, требует выработки четких технологических критериев формирования несущей консоли при различных параметрах установки анкеров. Возникают вопросы влияния прочностных характеристик пород кровли на размеры и взаимное расположение анкеров первого и второго уровня. Это требует проведения последовательных этапов эксперимента, в рамках которого изменяются прочностные и геометрические характеристики геомеханической системы [3, 4]. Простейшим способом реализации такого подхода является выполнение вычислительного эксперимента на основе сеточных методов.

**Цели исследования и постановка задачи.** Цель проведенного исследования заключается в определении влияния взаимосвязи механических характеристик пород кровли и параметров установки канатных анкеров в двухуровневой анкерной крепи на состояние свода выработки при движении проходческого забоя.

При постановке эксперимента выполнить дискретизацию исследования по объектам и методам для обеспечения оптимальных показателей многопараметрической модели геомеханической системы. То есть, снизить до минимально необходимого размерность расчетной области вычислительного эксперимента.

На первом этапе, для достижения данной цели необходимо изучить изменение напряженно-деформированного состояния геомеханической системы сопряжения выемочной и очистной выработок на различных этапах эксплуатации. Определить параметры зон предельно и запредельного состояния породно-

го массива на различных временных промежутках движения проходческого и очистного забоя.

На втором этапе, выполнить анализ изменения состояния кровли выемочной выработки во времени при различных параметрах установки канатных анкеров. Установить границы области выбора оптимальных показателей анкерного крепления при существующем напряженно-деформированном состоянии геомеханической системы.

**Организация вычислительного эксперимента и анализ полученных результатов.** Исследуемая модель «породный массив – выработка – анкерное крепление» состоит из компонентов обладающих различными механическими характеристиками. Эти характеристики различным образом изменяются с течением времени и изменением напряженно-деформированного состояния геомеханической системы. Описание этих характеристик требует получения конкретных значений изменяемых базовых показателей расчетной модели. Для решения этой задачи применяется комплексный подход оценки взаимного влияния этих показателей заключающийся в проведении лабораторных, натуральных исследований и вычислительного эксперимента. Общая схема проведения таких исследований приведена на рис. 2.



Рис. 2. Выбор методик исследований различных элементов геомеханической модели выемочной выработки и их взаимосвязь при определении параметров двухуровневой анкерной крепи

В соответствии с особенностями реализации и типа моделирования отдельного компонента расчетной модели его характеристики определяются либо одной из выбранных методик, либо на основе анализа результатов полученных двумя или тремя методиками, либо последовательным приближением на основе итерационного процесса с использованием нескольких методик. Получаемые значения определяют облик базовой расчетной модели используемой при проведении основного блока исследований. Каждый компонент анализируется отдельно и в связке с другими компонентами расчетной модели, с которыми он взаимодействует по условиям проводимых исследований [5, 6].

В качестве стационарных базовых показателей расчетов использовались данные о состоянии подземных выработок и типов крепежных конструкций, применяемых на действующих рудниках и шахтах Украины независимо от глубин и вида добываемого полезного ископаемого [7].

Механические характеристики горных пород являются наиболее сложной, с точки зрения описания, компонентой расчетной модели геомеханической системы [1, 8]. Нелинейность поведения горных пород зависит от таких особенностей их строения как высокая неоднородность материала, намокание, и структурные нарушения. Это с одной стороны. С другой стороны, на проведения породного массива влияют такие факторы внешнего воздействия, как концентрация тектонических напряжений, технологии проведения горных работ и особенности применяемых методов охраны горных выработок. При использовании анкерного крепления к таким факторам добавляются условия сопряжения тела анкера и поверхности шпура, влияние анкера на состояние сплошности породного блока.

На первом этапе проведения исследования был выполнен ряд расчетов по определению напряженно-деформированного состояния породного массива примыкающего к проходческому, очистному и сопряжению этих забоев. В качестве основы анализа полученных результатов были выбраны эпюры интенсивности напряжений представленные на рис. 3.

Данные эпюры демонстрируют распределение упругопластических напряжений в породном массиве в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии выемочной выработки. На рис. 3, а изменение интенсивности напряжений в породном массиве вдоль выработки происходит незначительно. Влияние проходческого забоя на распределение напряжений ощущается на расстоянии до двух высот выработки в свету. Как почва, так и кровля выработки незначительно разгружаются. Это указывает на то, что установка анкеров сразу за плоскостью проходческого забоя, для данных горно-геологических условий является не эффективным решением. Однако, увеличение временного интервала при установке анкеров ограничено ростом трещин и пластических деформаций в кровле выработки. Потому, для эффективной установки анкерного крепления необходимо определить интервал времени в течении которого напряженно-деформированное состояние кровли выработки обеспечит наилучший режим работы анкеров в последующем.

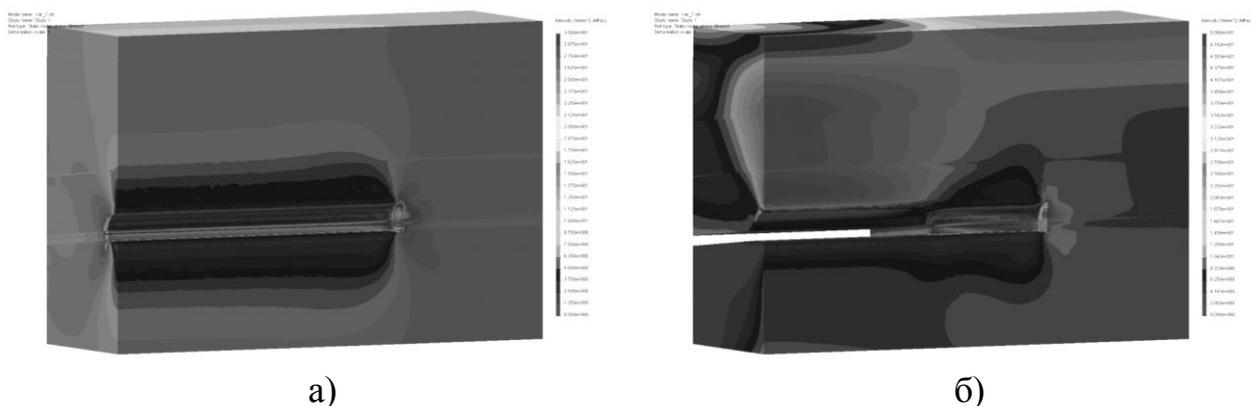


Рис. 3. Интенсивность напряжений породного массива при проведении проходческих и очистных работ на основании вычислительного эксперимента:  
а) для проходческого забоя б) для проходческого и очистного забоев

Наиболее сложные условия взаимодействия анкерного крепления и породного массива наблюдается в зоне сопряжения очистной и выемочной выработок (рис. 3, б). Непосредственно в области породного массива примыкающей к плоскости очистного забоя в кровли выемочной выработки наблюдается резкое увеличение градиента интенсивности напряжений. При этом изопараметрические поверхности интенсивности напряжений ориентированы под углом вверх, в сторону нетронутого породного массива. Это означает наличие различных условий функционирования анкерного крепи в кровли выемочной выработки в зоне влияния очистного забоя. Кроме того, в непосредственной кровле выработки формируется зона разгрузки, что указывает на условия формирования магистральных трещин непосредственно в своде выработки. Хотя интенсивность напряжений не увеличивается, динамика нагружения канатных и сталеполимерных анкеров расположенных в зоне влияния очистного забоя существенно изменяется. Оптимальный режим работы анкерного крепления в этих условиях формируется путем подбора оптимальных геометрических показателей установки канатных анкеров.

В целом полученная картина соответствует изменению напряженно-деформированного состояния геомеханической системы при учете динамике перемещений проходческого и очистного забоя. Моделирование динамических изменений геометрии сопряжения выработок позволило уточнить и определить аналитически параметры распределения напряжений в породном массиве при ведении горных работ.

При движении забоя выемочной выработки общая картина распределения напряжений определяется исходя из доминирующего положения вертикальных напряжений

$$\sigma_{\text{int}} > \sigma_y \succ |\sigma_x \quad \sigma_z|, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{int}}$  - интенсивность напряжений в породном массиве;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  - горизонтально ориентированные поперек выработки, вертикальные и ориентированные вдоль выработки напряжения.

Исходя из выражения 1 основными напряжениями в породном массиве формирующими усилия, воспринимаемые анкерной крепью, на этапе формирования выемочной выработки, являются вертикальные напряжения. Поэтому, при определении параметров установки анкеров, в рассматриваемых горно-геологических условиях, достаточно провести анализ абсолютных величин и градиентов этих напряжений в кровле выработки.

Граница влияния на напряженно-деформированное состояние кровли напряжений возникающих в зоне проходческих работ описывается функцией изопараметрической поверхности вида

$$f_{\text{lim}}(\bar{\sigma}_{\text{сд}}, l_b) = 0, \quad (2)$$

где  $\bar{\sigma}_{\zeta\grave{a}\acute{a}}$  - вектор максимальных напряжений в точке за плоскостью проходческого забоя;  $l_b$  - длина вектора в пространстве от точки максимума напряжений до ближайшей точки предельной изопараметрической поверхности.

Получаемые, в результате преобразования и вычисления, значения  $l_b$  позволяют выбрать минимально допустимую длину сталеполимерного анкера необходимую для поддержания кровли выработки. Это значение определяет геометрическое место точек поверхности объемной области, внутри которой, на начальном временном отрезке, происходит разупрочнение пород кровли.

Воздействие очистного забоя на распределение напряжений в породном массиве описывается исходя из доминирующего положения напряжений направленных вдоль оси выемочной выработки

$$\sigma_{\text{int}} \approx \sigma_z \succ |\sigma_x \quad \sigma_y|. \quad (3)$$

За счет движения очистного забоя вдоль выемочной выработки согласно выражению 3 происходит замещение доминирования вертикальных напряжений на доминирование горизонтальных напряжений направленных вдоль выработки. Эти изменения распространяются на область расчетной модели, размер которой определяется величиной градиента напряжений за плоскостью проходческого и очистного забоев.

Граница влияния на напряженно-деформированное состояние кровли выработки напряжений возникающих в зоне сопряжения проходческих и очистных работ определяется следующим образом

$$f_{\text{lim}}(\bar{\sigma}_{\zeta\grave{a}\acute{a}}, l_a, l_b) = f_b(\bar{\sigma}_{\zeta\grave{a}\acute{a}}, l_b) - f_a(\bar{\sigma}_{\zeta\grave{a}\acute{a}}, l_a) = 0, \quad (4)$$

где  $\bar{\sigma}_{\zeta\grave{a}\acute{a}}$  - вектор максимальных напряжений в точке за плоскостью проходческого и очистного забоев;  $l_a$ ,  $l_b$  - длина вектора в пространстве от точки максимума напряжений за плоскостью очистного и проходческого забоев до ближайшей точки предельной изопараметрической поверхности.

Анализ значений  $l_a$  и  $l_b$  устанавливает минимально допустимую длину канатного анкера исходя из условий взаимного влияния горного давления возникающего в сопряжении очистной и выемочной выработки. Таким образом, определяются эффективные длины сталеполимерных и канатных анкеров двухуровневого анкерного крепления, обеспечивающие устойчивое состояние кровли повторно используемой выработки на всем временном интервале ее эксплуатации.

Результаты проведения расчетов при различных временных интервалах и углах установки канатных анкеров с учетом движения очистного забоя приведены на рис. 4.

Простое сравнение представленных графиков на рис. 4 показывает, что наиболее эффективным временем установки канатных анкеров следует считать

пять суток после отхода проходческого забоя от плоскости установки двухуровневого анкерного крепления. Как видно, на рис. 4, б деформация кровли развивается наиболее медленно и хотя ранее установленные анкера (рис. 4, а) обеспечивают приемлемый уровень деформирования кровли, абсолютные показатели на 10 – 15 % уступают значениям, представленным на рис. 4, б. Рост деформаций на графике для варианта установки анкерного крепления спустя пятнадцать суток от отхода проходческого забоя (рис. 4, в) указывает на не эффективность выбранного временного интервала. Все три выбранных угла установки канатного анкера не обеспечивают достаточного влияния на деформирование кровли, что в рассматриваемых горно-геологических условиях приводит к обрушению свода выемочной выработки.

Анализ характера поведения канатных анкеров установленных под различными углами к горизонту на основании рис. 4, а и рис. 4, б позволяет утверждать, что анкера, установленные под одним и тем же углом, препятствуют деформированию свода выработки одинаковым образом. При этом наиболее эффективным следует считать установку канатного анкера под углом  $83^\circ$ . Анкера I устанавливаемые вертикально в свод выработки в каждом из рассматриваемых случаев (рис. 4, а - в) обеспечивают наименьшее сопротивление деформации свода выработки и потому, для рассмотренных горно-геологических условий их установка является не эффективной.

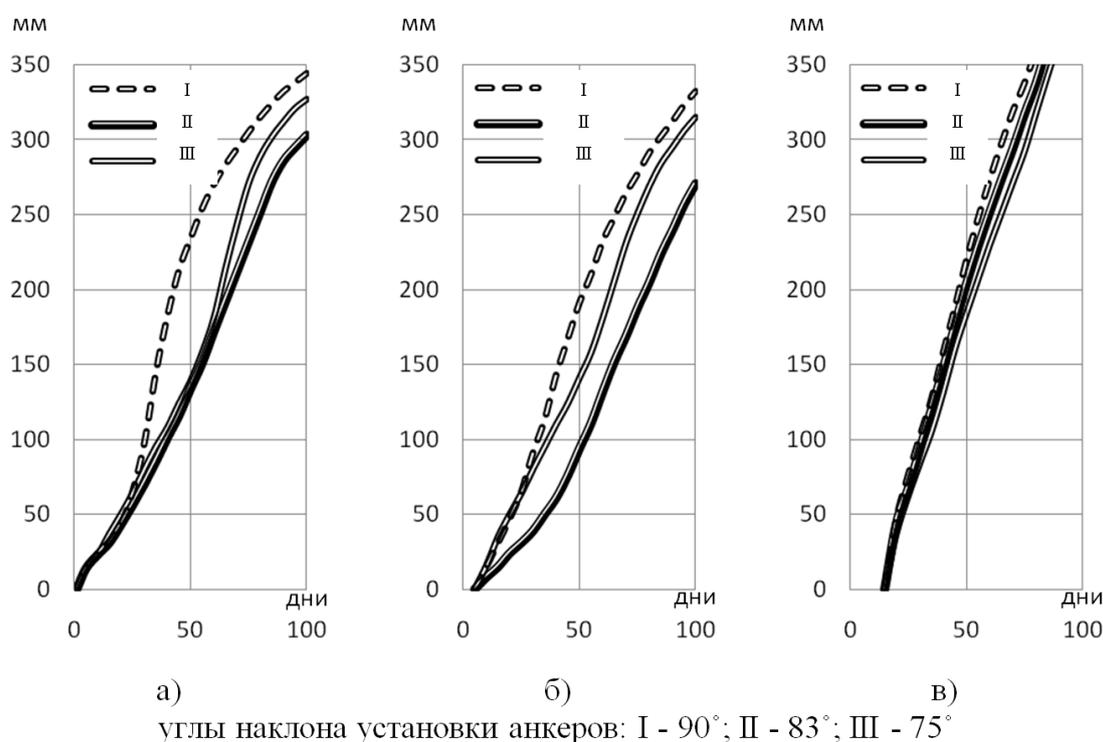


Рис. 4. Деформация кровли выемочной выработки при установке анкеров через: а) одни сутки; б) пять суток; в) пятнадцать суток после отхода проходческого забоя

Таким образом, проведен всесторонний анализ факторов влияющих на развитие деформаций свода выемочной выработки поддерживаемой двухуровневым анкерным креплением при движении вдоль нее очистного забоя. Параметрически определены условия изменения качества взаимодействия отдельных компонент геомеханической системы, что позволило получить математическое описание области допустимых решений для определения комбинаций временного интервала и угла наклона канатного анкера при проектировании двухуровневого анкерного крепления. Условие обеспечения устойчивости кровли выемочной выработки поддерживаемой двухуровневой анкерной системой при динамически изменяемых механических характеристиках геомеханической системы выглядит так

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \vartheta \left( \frac{G_I(t)}{\gamma H \cdot l_t} \right)^{1,73} - \frac{0,83 G_{III}(t)}{\vartheta \cdot \sigma'_y \cdot l_t^3} \right) dt \geq 1 \\ \left( h_t \frac{\sigma'_z}{\sigma'_y} + 4,3 l_t \cos \left( \frac{\pi}{3} \cdot \vartheta \right) \right) dt < 2,7 \end{array} \right. , \quad (5)$$

где  $\gamma H$  - величина давления породного столба;  $\vartheta$  - угол наклона канатного анкера к горизонту;  $G_I(t)$ ,  $G_{III}(t)$  - функции изменения во времени потоков энергии первого и третьего видов деформации берегов трещин;  $h_t$  - изменяемое во времени расстояние между плоскостью анкерного крепления и плоскостью очистного забоя,  $l_t$  - изменяемая во времени длина радиуса зоны трещинообразования, от центра поперечного сечения выработки;  $\sigma'_y$ ,  $\sigma'_z$  - приведенные максимумы вертикальных и горизонтальных напряжений за плоскостью очистного забоя.

В представленном исследовании не были рассмотрены вопросы взаимодействия сталеполлимерных и канатных анкеров при установке в одном двухуровневом анкерном крепление. Рассмотрение данной задачи будет выполнено при проведении последующих исследований предложенной геомеханической модели.

**Выводы.** Зависимость условий трещинообразования в кровле выработки вызванного реологией пород и подвигания очистного забоя от длины канатных анкеров и угла их установки вдоль оси выработки позволяет установить оптимальные параметры двухуровневой анкерной крепи, обеспечивающие стабильное состояние свода выемочной выработки во всех режимах ее эксплуатации. То есть, анализ воздействия на НДС кровли выработки условий динамического изменения свойств породного массива определяет взаимное расположение сталеполлимерных и канатных анкеров вдоль оси выработки, что обеспечивает со-

хранение ее эксплуатационных характеристик на всем временном интервале использования.

#### Перелік посилань

1. Bondarenko, V.I., Kuzmenko, O.M., Hriadushchyi, Iu.B., Haiduk, V.A., Kolokolov, O.V., Tabachenko, M.M., & Pochevov, V.M. (2005). Tekhnolohiia pidzemnoi rozrobky plastovykh rodovyshch korysnykh kopalyn. Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychyi universytet.
2. Byzylo, V., Koshka, O., Poymanov, S., & Malashkevych, D. (2015). Resource-saving technology of selective mining with gob backfilling. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 485-491.
3. <https://doi.org/10.1201/b19901-84>
4. Fomichov, V.V., Zuber, R.V., & Spivak, G.P. (2010). Features of computing design of interaction of anchor and rock of mountain massif. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 21-25.
5. Sotskov, V.A., Malashkevich, D.S., & Russkikh, V.V. (2016). Analiz vliyaniya chastichnoy zakladki vyrabotannogo prostranstva na NDS uglevmeshchayushchego massiva pri selektivnoy otrabotke tonkikh ugol'nykh plastov. *Heotekhnichna Mekhanika*, (129), 54-64.
6. Kovalevskaya, I., Fomichov, V., & Vyvcharenko, A. (2011). Optimization of frame-bolt support in the development workings, using computer modeling method. In *22<sup>nd</sup> World Mining Congress & Expo* (pp. 267-278). Istanbul, Turkey: Aydoğdu Ofset.
7. Sotskov, V., & Saleev, I. (2013). Investigation of the rock massif stress strain state in conditions of the drainage drift overworking. *Mining of Mineral Deposits*, 197-201.
8. <https://doi.org/10.1201/b16354-36>
9. KD 12.01.01.201-98. (1998). *Raspolozhenie, okhrana i podderzhanie gornykh vyrabotok pri otrabotke ugol'nykh plastov na shakhtakh*. Kiev: Tipografiya UkrNIMI.
10. Geleskul, M.N., & Karetnikov, V.N. (1982). *Spravochnik po krepleniyu ka-pital'nykh i podgotovitel'nykh gornykh vyrabotok*. Moskva: Nedra.

#### ABSTRACT

**Purpose.** Determine of optimum parameters for the installation of rope bolts in a two-level bolting support with a dynamic change of the rock massif condition.

**Methodology.** The simulation experiment consists four stages. Field and laboratory investigations are carried out at the first stage to determine the nonlinear mechanical characteristics of rock massif. The features behavior of steel-polymer and rope anchors are carried out at the second stage. The third stage consists in conducting a simulation experiment on the basis of the grid method for determining the stress-strain state of the geomechanical system of mine workings. The fourth stage is an analysis of the field results, laboratory and mathematical investigations and development of criteria for the optimal configuration of the roof bolting.

**Results.** The values of parameters describing the limiting surfaces of the impact on the SSS of geomechanical system of moving drifting and coal faces are obtained. The linear strains of steel-polymer and rope bolts working in similar mining and geological conditions are determined. The features of interaction between the rope bolt and the fractured rock are revealed. The criterion for choosing optimal angle of the rope bolt installation is established.

**Scientific novelty.** The value area of the parameters for installation of a two-level bolting support is determined, with taking into account of crack formation process under the influence of the increased rock pressure arising during the movement of drifting and coal faces.

**Practical implications.** Optimum installation parameters of bolts are allowed to provide keeping of operating characteristics for the excavation working located in the fractured rock massif over the whole time interval of its maintenance.

**Key words:** *crack formation, coal face, FEM, rock pressure, rock massif, rope bolts.*

УДК 622.831.24

© О.Е. Хоменко, М.Н. Кононенко, В.И. Ляшенко

## ЭВОЛЮЦИЯ ПРИНЦИПОВ ПОДДЕРЖАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

© O. Khomenko, M. Kononenko, V. Lyashenko

## EVOLUTION OF PRINCIPLES OF MINE WORKINGS SUPPORTING

Выполнен анализ результатов исследований по проведению, креплению и поддержанию подземных выработок, которые выполнялись в научно-исследовательских, проектно-конструкторских и высших учебных заведений Украины. Выявлены широко используемые и новые научно-производственные принципы, используемые при поддержании подземных выработок. Систематизированы установленные принципы по учреждениям, исследователям, годам создания и закладываемым сущностям.

Виконано аналіз результатів досліджень з проведення, кріплення і підтримання підземних виробок, які виконувалися в науково-дослідних, проектно-конструкторських та вищих навчальних закладах України. Виявлено широко використані та нові науково-виробничі принципи, які використані при підтриманні підземних виробок. Систематизовані встановлені принципи за установами, дослідниками, роками створення та вкладеного змісту.

**Введение.** Разработкой, апробированием и внедрением в производство эффективных технологических схем проведения, крепления и поддержания подземных выработок занимается ряд научно-исследовательских, проектно-конструкторских и высших учебных заведений Украины. Выполнение фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ в Украине осуществляет Институт геотехнической механики имени Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (г. Днепр), Научно-исследовательский горно-рудный институт Государственного ВУЗа «Криворожский национальный университет» и Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии» Министерства энергетики и угольной промышленности Украины (г. Желтые Воды). Кроме указанных НИИ подобные работы выполняют Государственный ВУЗ «Криворожский национальный университет» и Националь-