

**Practical value.** The energy research method has been created for determining the shape and size of the thermodynamic balance zones, the conditions of transforming the different energy zones into the misbalance state as well as the number of such zones in the protective capsule formed in the rock around excavations.

**Keywords:** *ore extraction, zonal disintegration of rock, synergetic method of research*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Д.В. Рудаковим. Дата надходження рукопису 21.06.12.*

УДК 622.28

**В.В. Фомичёв, канд. техн. наук, доц.**

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: fomichev@inbox.ru

## ПРЕДПОСЫЛКИ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ РАМНО-АНКЕРНОЙ КРЕПИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕДЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СРЕД

**V.V. Fomichev, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: fomichev@inbox.ru

## PRE-CONDITIONS OF CREATION OF FRAME AND ANCHOR BOLT SUPPORT COMPUTATIONAL MODELS TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR DESCRIPTIONS OF PHYSICAL ENVIRONMENT

**Цель.** Создание оптимизационной расчетной модели для обеспечения проектирования новых типов крепи подготовительных выработок на шахтах Западного Донбасса.

**Методика.** Дешевизна построения математических моделей, простота реализации в них различных систем нагрузок сделали этот вид анализа напряженно-деформированного состояния наиболее широко применимым. При построении расчетной модели всегда прибегают, в той или иной степени, к упрощению исходного объекта. Новые виды крепи и рост напряжений в горном массиве требуют при оценке собственной устойчивости учета все большего числа факторов, имеющих нелинейную природу. Адекватное моделирование податливости рамной крепи связано с возможностью учета в расчетной модели больших перемещений. Численное моделирование должно обеспечивать физическое отображение работы анкера по поддержанию пород кровли выработки в момент и после частичного разупрочнения пород по контуру выработки. Напряженно-деформированное состояние крепи, в значительной степени, зависит от изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива, окружающего выработку. Такие изменения происходят в результате проведения или погашения горных выработок, проявления реологических свойств горных пород и т.п. Последовательное проведение расчетов в различных комбинациях подобных свойств и характеристик позволяет определить критичность тех или иных показателей расчетной модели, в значительной степени, влияющих на качество выполняемых экспериментов.

**Результаты.** Получены характеристики влияния точности описания объектов и процессов горного производства при проектировании несущих конструкций, применяемых для охраны подготовительных выработок в условиях шахт Западного Донбасса.

**Научная новизна.** Разработан алгоритм взаимного влияния на напряженно-деформированное состояние системы „крепь выработки – горный массив“ нелинейных механических и геометрических характеристик, изменяемых во времени. Создано математическое описание области возможных допустимых решений для задач рассматриваемого класса.

**Практическая значимость.** Применение описываемых подходов обеспечивает повышение адекватности вычислительного эксперимента при определении оптимальных характеристик охраны подготовительных выработок на шахтах Западного Донбасса.

**Ключевые слова:** *выработка, горный массив, анкер, моделирование объекта, нелинейная характеристика, численный метод*

**Постановка проблемы.** В современных условиях эксплуатации шахт Западного Донбасса одним из основных факторов, влияющих на себестоимость добычи угля, являются затраты на поддержание подготовительных выработок. Рост глубины разработки

угольных пластов приводит к тому, что условия функционирования таких выработок усложняются. Но оценка их устойчивости, зачастую, выполняется на основе критериев, сформулированных для других комбинаций горно-геологических факторов. Таким образом, встает вопрос: насколько эффективны, с точки зрения определения оптимальных показателей,

широко применяемые методологии расчета качественных и количественных показателей крепи подготовительной выработки?

**Целью** статьи является создание оптимизационной расчетной модели для обеспечения проектирования новых типов крепи подготовительных выработок на шахтах Западного Донбасса.

**Изложение основного материала.** Простейшим способом оценки прочностных показателей материала является эксперимент на его сопротивление одноосному сжатию или растяжению. Такие эксперименты можно проводить в натуральных и лабораторных условиях или с помощью численного моделирования. Однако, для оценки устойчивости конструкции необходимо выполнять ее масштабное моделирование в геометрическом и физическом смыслах. При этом саму модель необходимо подвергать различным комбинациям внешних нагрузок, что неминуемо сказывается на ее поведении при проведении дальнейших стадий исследования.

Дешевизна построения математических моделей, простота реализации в них различных систем нагрузок сделали этот вид анализа напряженно-деформированного состояния наиболее широко применимым. Но, при построении расчетной модели всегда прибегают, в той или иной степени, к упрощению исходного объекта. Это упрощение может не влиять на точность получаемых результатов, вносить незначительные, с точки зрения последующего анализа результатов, ошибки или в корне изменять распределение напряжений и деформаций получаемых в результате расчетов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При относительно небольших глубинах проведения горных работ, большинство, связанных с нелинейным поведением материалов, факторов, влияющих на устойчивость выработки, не могли значительно повлиять на конечную картину распределения напряжений и деформаций в зоне подготовительной выработки [1]. Поэтому расчеты, выполняемые в линейной постановке, широко использовались для формирования нормативно-методической базы крепления подготовительных выработок. Более того, воспринимаемое крепью горное давление можно было легко и с большим коэффициентом запаса прочности компенсировать увеличением площади поперечного сечения рамной крепи.

Увеличение глубины разработки и повышение роли экономической эффективности, как фактора управления производством, потребовали изменения подхода к анализу и оптимизации показателей взаимного влияния крепи выработки и приконтурных горных пород. Новые виды крепи [2] и рост напряжений в горном массиве требуют при оценке собственной устойчивости учета все большего числа факторов, имеющих нелинейную природу. О том, как и в какой степени, такие факторы влияют на результаты вычислительного эксперимента, будет показано на следующих примерах.

Подготовительные выработки в шахтах имеют относительно непродолжительный срок эксплуатации. Однако, в течение этого срока на выработку влияют разнообразные горно-геологические и технологические

факторы. Эти факторы воздействуют на выработку и элементы ее крепи на разных временных интервалах. В результате, в системе „крепь выработки – горный массив“ формируется сложная, неоднородная во времени комбинация внутренних и внешних усилий.

**Не решенные ранее части проблемы.** Когда прочностные характеристики пород достаточно однородны, воздействие геологических факторов относительно незначительно, единственным внешним усилием, формирующим НДС системы „крепь выработки – горный массив“, можно считать гравитационную постоянную. Но в результате накопления и перераспределения внутренней энергии системы реальная картина напряжений и ее упругий аналог значительно различаются [3].

**Цель.** Простейшим методом увеличения адекватности выполняемых расчетов следует считать учет факторов разупрочнения и разрушения окружающих выработку пород, а также динамику поведения податливой крепи [4]. Изменение объема пород, окружающих выработку и находящихся в предельном и запредельном состоянии, приводит к перераспределению нагрузки на крепь выработки и, следовательно, изменяет общую картину НДС системы „крепь выработки – горный массив“.

Как известно, формирование зоны предельного равновесия изменяет общую площадь несущей поверхности, что, в свою очередь, снижает удельное сопротивление горному давлению. При расчете в упругой постановке невозможно учесть этот фактор, без внесения в расчетную модель априори выбранной геометрической фигуры, моделирующей материал с пониженными прочностными характеристиками. Такой расчет уже имеет высокую степень субъективности и не позволяет получить адекватный результат. Таким образом, можно утверждать, что, для условий Западного Донбасса, проведение вычислительных экспериментов в упругой постановке искусственно вносит погрешность в величину получаемого горного давления в пределах 15–30% [4].

**Изложение основного материала.** Без учета запредельного поведения материалов, местоположение максимальных градиентов напряжений в горном массиве будет иным и, следовательно, изменятся зоны трещинообразования на контуре выработки. В этом случае, получаемое решение нельзя использовать для поиска оптимальной комбинации „сечение выработки – применяемая крепь“. Полученный результат фактически является приближением нулевого порядка, для которого любая из выбираемых комбинаций „сечение – крепь“ может быть оптимальной.

Теперь перейдем к рассмотрению влияния податливости рамной крепи на распределение напряжений и деформаций в системе „крепь выработки – горный массив“. Применение узла податливости в конструкции рамной крепи позволило в значительной степени поднять ее эксплуатационные характеристики. Однако, этот узел как фактор, влияющий на НДС системы, усложнил физику процесса, протекающего в реальных условиях [3]. Конструктивная особенность дан-

ного элемента крепи при высокоточном моделировании (рис. 1, а) в значительной степени увеличивает вычислительные затраты и снижает устойчивость получаемых решений. Поэтому применяется упрощенная модель этого элемента (рис. 1, б), которая обеспечивает и сплошность модели крепи, и возможность больших перемещений ее элементов.

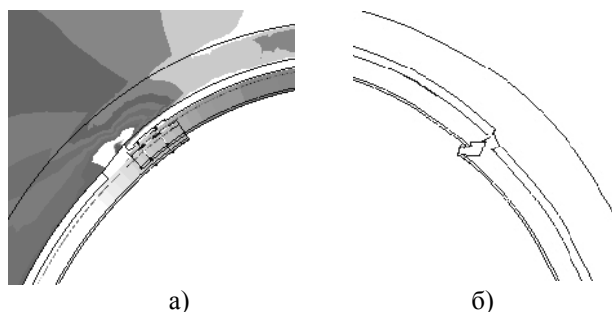


Рис. 1. Моделирование узла податливости рамной крепи: а) геометрически точная модель; б) модель узла, обеспечивающая его подвижность без учета динамики

Таким образом, моделирование податливости рамной крепи связано с возможностью учета в расчетной модели больших перемещений. Это достигается за счет моделирования узла податливости, который в расчетной модели представлен вставкой из материала, обладающего низкими показателями сопротивления сжимающим усилиям. На рис. 1, б хорошо видны перемещения верхняка рамной крепи, который опустился вниз и одновременно вдавил модель узла податливости в боковую стойку. В результате перемещение точек свода выработки составило до 330 мм [4], что, в свою очередь, приводит к увеличению зоны предельного состояния пород, образующих свод выработки.

Другим элементом рамно-анкерной крепи, расчет которого в упругой постановке не дает необходимых результатов, является анкер. Проведение ряда экспериментально-тестовых расчетов [5] и моделирование на эквивалентных материалах показали отсутствие физически ощутимого влияния анкеров на общую картину распределения напряжений при решении задач в упругой постановке.

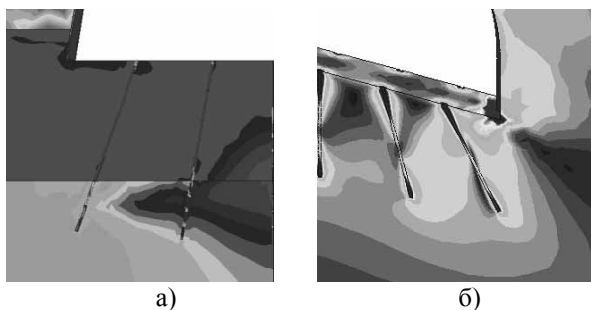


Рис. 2. Поведение анкеров при выполнении расчетов в: а) упругой постановке; б) в упруго-пластической постановке

Собственно, расчеты систем „анкер-порода“ в упругой постановке (рис. 2, а), с заменой тела анкера систе-

мой усилий и другими способами эмулирования грузонесущей функции анкера, приводит только к формированию локальных зон высокого градиента напряжений вдоль шпура, но совершенно не изменяет общую картину распределения напряжений и перемещений по контуру выработки. И, наоборот, в упругопластической модели (рис. 2, б) работа анкера по компенсации разрушающих пород напряжений сразу видна, поскольку в данной постановке величина перемещений элементов анкера и окружающей породы разнятся в разы.

Натурные наблюдения за анкерами, устанавливаемыми в кровле подготовительных выработок, и их численное моделирование позволяют утверждать, что основная работа анкера по поддержанию пород кровли выработки наступает в момент частичного разупрочнения пород по контуру выработки [5]. Условия работы анкеров в физически и геометрически нелинейной среде наиболее точно описывают их поведение в реальных условиях эксплуатации.

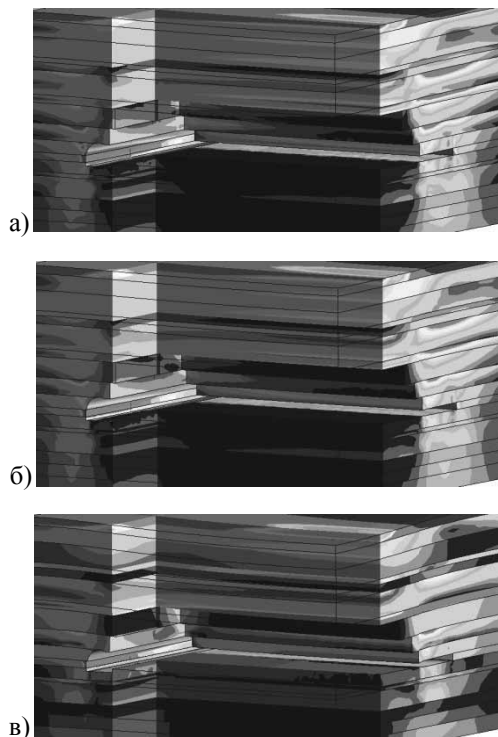


Рис. 3. Моделирование сопряжения откаточного штрека и очистного забоя: а) упругопластический расчет; б) расчет с учетом реологии (10 часов); в) расчет с учетом реологии (90 часов)

Все вышесказанное относится к конструктивным элементам крепи выработки. Однако, функционирование самой крепи, в значительной степени, зависит от изменения НДС горного массива. А эти изменения, в свою очередь, могут происходить в результате проведения или погашения горных выработок, проявления реологических свойств горных пород и т.п. Основопологающим фактором для учета в расчетной модели влияния подобных изменений становится фактор времени.

Ярким примером влияния реологических свойств горных пород на изменение НДС горного массива яв-

ляется серия расчетов, проведенная для ш. „Степная“ ПАО „Павлоградуголь“. Результаты расчетов показывают как изменяется распределение напряжений и перемещений в зоне сопряжения откаточного штрека и очистного забоя (рис. 3) во времени. На рис. 3, а представлена картина интенсивности напряжений, полученная для задачи, решенной в упругопластической постановке. Для этого варианта решения характерны наибольшие значения напряжений и минимальные величины абсолютных перемещений. Расчет, выполненный с учетом реологии в пределах десяти часов реального времени, показал, что абсолютные перемещения в модели возросли незначительно, а вот картина распределения напряжений претерпела как качественные, так и количественные изменения (рис. 3, б). Наконец, спустя 90-то часов наблюдаем значительный рост перемещений в кровле и почве очистного забоя (рис. 3, в), с перераспределением нагрузки по породным слоям модели. Можно сказать, что формируется следующий этап обрушения пород.

Проявление влияния сопряжений выработок также носит, зачастую, локализованный во времени характер. В зависимости от взаимных размеров выработок и продолжительности существования, такое влияние на НДС системы может иметь как незначительное (например, сопряжение откаточного штрека и бокового ходка), так и весьма ощутимое воздействие (пример см. рис. 3, в). Конечно, любое сопряжение очистного забоя с подготовительной выработкой – это сразу комбинация изменения геометрии и прочностных характеристик приконтурных горных пород.

Исходя из вышеперечисленного, расчет НДС в зоне влияния очистных работ, для выработок с рамно-анкерной крепью, в условиях шахт Западного Донбасса, может быть выполнен только с учетом таких факторов, как: конструктивная податливость крепи; большие перемещения контура горного массива; релаксация напряжений в результате учета реологических свойств пород и, наконец, взаимное влияние горных выработок. В этом случае компенсация усилий и геометрических параметров расчетной области позволит получить средневзвешенную, а, следовательно, наиболее вероятную картину НДС в зоне расположения реального объекта.

Анализ результатов расчетов и опыта их применения в условиях реального производства позволил сформировать обобщенную качественную модель прогнозирования показателей оптимальности выполняемых расчетов (рис. 4). Суть данной модели заключается в комплексном сравнении четырех приведенных показателей расчета с выбранной или получаемой физической и математической точности описания реального объекта или процесса в процентах. Из представленного графика видно, что оптимальная эффективность вычислительных экспериментов лежит в области, где точность описания реальных объектов составляет от 70 до 90%.

**Выводы.** Стоимость расчета и граница приемлемых результатов не зависят от методологии проведения вычислительного эксперимента и являются

внешними технологическими параметрами, выбор которых осуществляется на основе доступности вычислительных мощностей и проектных требований к анализируемой конструкции. Адекватность расчета и эффективность получаемых решений – это косвенно связанные показатели, ограничивающие на графике (рис. 4.) зону возможных результатов, получаемых в ходе вычислительного эксперимента.

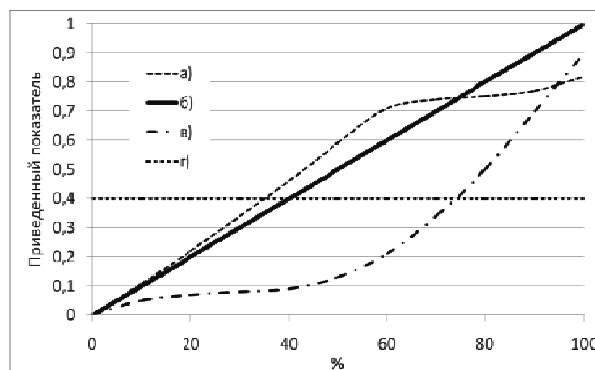


Рис. 4. Влияние точности описания реального объекта в расчетной модели на параметры вычислительного эксперимента: а) адекватность расчета; б) стоимость расчета; в) эффективность получаемых решений; г) граница приемлемых результатов

**Выводы.** Таким образом, при проведении вычислительного эксперимента, для поиска оптимального способа поддержания подготовительной выработки на всем временном отрезке ее эксплуатации, необходимо учитывать: реологические свойства пород; условия изменения контакта объектов расчетной модели; нелинейную связь напряжений и деформаций, а также изменение геометрии расчетной области во времени.

#### Список литературы / References

1. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга I. Допредельная стадия деформирования системы „порода-крепь“ / Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Фомичёв В.В. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – Ч.1. – 172 с.  
Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Simanovich, G.A. and Fomichev, V.V. (2006), *Kompyuternoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya melkosloistogo gornogo massiva vokrug plastovoy vyrabotki. Kniga 1. Dopredelnaya stadiya deformirovaniya sistemy "poroda-krep"* [Computer Simulation of the Stress Deformed State of Finely Stratified Rock Massif Around the Workings. Book 1st. The State Preceding Deformation of the "Rock-Lining" System], Part 1, System Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine.
2. Развитие научных основ повышения устойчивости горных выработок шахт Западного Донбасса / Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Мартовицкий А.В., Фомичёв В.В. – Днепропетровск: Лізунов-Прес, 2010. – 340 с.

Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Martovitsky, A.V., and Fomichev, V.V. (2010), *Razvitiye nauchnykh osnov povysheniya ustoychivosti gornyykh vyrabotok shakht Zapadnogo Donbassa* [Development of Scientific Basis of Improvement of Excavation Pits Stability in the Western Donbass], Lizunov-Pres, Dnipropetrovsk, Ukraine.

3. Методы расчета перемещений и упрочнения при контурных пород горных выработок шахт Западного Донбасса / [В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др.] – Днепропетровск: ТОВ „Підприємство „Дріант“, 2010. – 328 с.

Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A. and Simanovich, G.A. (2010), *Metody rascheta peremeshcheniy i uprochneniya prikonturnykh porod gornyykh vyrabotok shakht Zapadnogo Donbassa* [Methods for Calculation of the Displacement and Strengthening of the Marginal Rocks in Mining Pits of the Western Donbass], TOV "Pidpriemstvo "Driant", Dnipropetrovsk, Ukraine.

4. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга II. Предельное и запредельное состояние системы „порода – крепь“ / Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Фомичёв В.В. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – Ч. II. – 198 с.

Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Simanovich, G.A. and Fomichev, V.V. (2007), *Kompyuternoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya melkosloistogo gornogo massiva vokrug plastovoy vyrabotki. Kniga 2. Predelnoye i zapredelnoye sostoyaniye sistemy "poroda-krep"* [Computer Simulation of the Stress Deformed State of Finely Stratified Rock Massif Around the Workings. Book 2nd. Deformed State of the "Rock-Lining" System] Part 2, System Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine.

5. Фомичов В.В. Особенности обчислювального моделювання взаємодії анкера і порід гірського масиву / Фомичов В.В., Зубер Р.В., Сівак Г.П. // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2010. – № 6. – С. 21–25.

Fomichev, V.V., Zuber, R.V., Sivak, G.P. (2010), "Features of computational modeling of interaction between rock anchor and rock", *Naukovyi vistnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.6, pp. 21–25.

6. Ковалевская И.А. Оптимизация работы рамно-анкерной крепи в подготовительных выработках с использованием метода компьютерного моделирования / Ковалевская И.А., Фомичев В.В., Овчаренко А. // 22 World Mining Congress & Expo (11–16 сентября) – Стамбул, 2011. – Том I. – С. 267–278

Kovalevskaya, I.A., Fomichev, V.V. and Ovcharenko, A. (2011), "Optimization of frame-bolt support in the development workings, using computer modeling method", *the 22nd World Mining Congress & Expo*, Istanbul, September 11–16, 2011, Vol.1, pp. 267–278.

**Мета.** Створення оптимізаційної розрахункової моделі для забезпечення проектування нових типів кріплення підготовчих виробок у шахтах Західного Донбасу.

**Методика.** Дешевизна побудови математичних моделей, простота реалізації в них різних систем навантажень зробили цей вид аналізу напружено-

деформованого стану найбільш широко застосовуваним. При побудові розрахункової моделі завжди вдаються, у тій чи іншій мірі, до спрощення вихідного об'єкта. Нові види кріплення й зростання напруги в гірському масиві вимагають при оцінці власної стійкості обліку все більшого числа факторів, що мають нелінійну природу. Адекватне моделювання податливості рамного кріплення пов'язано з можливістю обліку в розрахунковій моделі великих переміщень. Чисельне моделювання повинно забезпечувати фізичне відображення роботи анкера з підтримання порід кривлі виробки в момент і після часткового знеміцнення порід по контуру виробки. Напружено-деформований стан кріплення, у значній мірі, залежать від зміни напружено-деформованого стану (НДС) гірського масиву, що оточує виробку. Такі зміни відбуваються в результаті проведення або погашення гірничих виробок, прояву реологічних властивостей гірських порід і т.п. Послідовне проведення розрахунків у різних комбінаціях подібних властивостей і характеристик дозволяє визначити критичність тих чи інших показників розрахункової моделі, що, у значній мірі, впливають на якість виконуваних експериментів.

**Результати.** Отримано характеристики впливу точності опису об'єктів і процесів гірничого виробництва при проектуванні несучих конструкцій, що застосовуються для охорони підготовчих виробок в умовах шахт Західного Донбасу.

**Наукова новизна.** Розроблено алгоритм взаємного впливу на напружено-деформований стан системи „кріплення виробки – гірський масив“ нелінійних механічних та геометричних характеристик, що змінюються у часі. Створено математичний опис області можливих допустимих рішень для задач розглянутого класу.

**Практична значимість.** Застосування описуваних підходів забезпечує підвищення адекватності обчислювального експерименту при визначенні оптимальних характеристик охорони підготовчих виробок на шахтах Західного Донбасу.

**Ключові слова:** виробка, гірський масив, анкер, моделювання об'єкта, нелінійна характеристика, чисельний метод

**Purpose.** To create an optimization calculation model for designing new types of lining for development workings of the Western Donbass mines.

**Methodology.** The cheapness of the construction of mathematical model and easiness of its implementation for simulating different loading systems has made this type of deflected mode analysis the high-usage tool. When constructing the computational model we always simplify the original object. But the implementation of new types of support and growth of stresses in the rock massif require taking into account an increasing number of factors which have nonlinear nature when evaluating the stability. Adequate modeling of the frame support flexibility is connected with possibility of integration in the computational model of significant displacements. Numerical simulation should represent the physical work made by an anchor to maintain the roof strata in the moment of partial softening of rocks along working contour and after it. The deflected mode of the lining depends on the change of stressed state of sur-

rounding rocks. These changes occur as a result of excavation or its termination, appearance of rheological features of rocks, etc. A consistent calculation of various combinations of these properties and characteristics allows determining the criticality of the certain indices of computational model that substantially affects the quality of the experiments.

**Findings.** The characteristics of the influence of the mining processes and objects description accuracy for the designing of support structures used for maintenance of development workings in the Western Donbass mines have been received.

**Originality.** An algorithm of the influence of variable non-linear mechanical and geometrical characteristics on

the stress-strain state of the ‘support – rock strata’ system has been obtained. The mathematical description of the range of possible feasible solutions of problems of the class has been created.

**Practical value.** Application of the described approaches enhances the adequacy of computer simulation which determines the optimum characteristics of development workings in the Western Donbass mines.

**Keywords:** *development, rock massif, anchor, modeling object, nonlinear characteristics, numerical method*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Бондаренком. Дата надходження рукопису 28.11.11.*

УДК 622.271

А.А. Бондаренко, канд. техн. наук, доц.,  
Е.С. Запара, канд. техн. наук, доц.

Государственное высшее учебное заведение  
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: zaparaec@rambler.ru

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ВСАСЫВАНИЯ ПУЛЬПЫ В ПОДВОДНОМ ЗАБОЕ

А.А. Bondarenko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
Ye.S. Zapara, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

State Higher Educational Institution “National Mining University”,  
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: zaparaec@rambler.ru

## LAWS OF DETERMINATION OF FINE MATERIALS SUCTION LIMITS IN SUBMARINE SUCTION DREDGE FACE

**Цель.** Установление закономерностей для определения границ всасывания пульпы и скорости всасывающего потока на границе зоны всасывания подводного забоя, при которой частицы грунта находятся в равновесии.

**Методика.** Применена теория переноса единичных частиц зернистого материала двухфазным гетерогенным потоком в пограничной области между забоем осадочных отложений и водной средой. Рассмотрен поток пульпы, направленный от забоя к всасывающему патрубку землесосного снаряда, сформированный при движении жидкости из неограниченного пространства.

**Результаты.** В результате рассмотрения процесса всасывания пульпы единичным всасывающим патрубком в подводном забое, получена аналитическая зависимость для определения расстояния от всасывающего патрубка до сечения, в котором скорость всасывания равна скорости, при которой частицы находятся в равновесном состоянии. Для определения границ зоны всасывания подводного забоя составлено условие равновесного состояния частицы, получен вид записи действующих на нее сил, записано дифференциальное уравнение, описывающее движение частицы, находящейся на поверхности зоны всасывания. В результате решения дифференциального уравнения получена зависимость для определения скорости всасывающего потока на границе зоны всасывания подводного забоя, при которой частица, под действием силы тяжести, Архимеда и скоростного напора, находится в равновесии.

**Научная новизна.** Разработана математическая модель движения частицы по образующей зоны всасывания подводного забоя. Подводный забой землесосного снаряда впервые рассматривается как область, ограниченная зоной всасывания взвешенного грунта.

**Практическая значимость.** Получены аналитические зависимости для определения скорости всасывающего потока на границе зоны всасывания подводного забоя, при которой обеспечивается равновесное состояние частицы, а также радиуса всасывания пульпы. Зависимости позволяют установить границы области всасывания пульпы в подводном забое, а значит определить объем добычи грунта с одного установа исполнительного органа земснаряда.

**Ключевые слова:** *земснаряд, подводный забой, размыв, всасывание, скорость всасывания, радиус всасывания*

**Постановка проблемы.** Определение границ всасывания пульпы в подводном забое землесосного снаряда является важной задачей, позволяющей установить рациональные параметры системы подготовки грунта и приготовления пульпы к всасыванию и даль-

нейшему транспортированию. Выбор рациональных параметров системы размыва грунта в подводном забое земснаряда позволяет рационализировать процесс добычи грунта, то есть увеличить производительность всасывания путем увеличения мощности системы размыва или минимизировать потери грунта в неограниченное пространство путем снижения ее мощности.