

# РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 658: 622.272

**Н.И. Ступник<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф.,  
**В.А. Калиниченко<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф.,  
**М.Б. Федько<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц.,  
**Е.Г. Мирченко<sup>2</sup>**

1 – Государственное высшее учебное заведение „Криворожский национальный университет“, г. Кривой Рог, Украина  
2 – ГП „ВостГОК“, ш. „Смолинская“, г. Кривой Рог, Украина

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ТЕХНОЛОГИЮ ОТБОЙКИ УРАНОВЫХ РУД

**N.I. Stupnik<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
**V.A. Kalinichenko<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
**M.B. Fedko<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
**Ye.G. Mirchenko<sup>2</sup>**

1 – State Higher Educational Institution “Kryvyi Rig National University”, Kryvyi Rig, Ukraine  
2 – State Enterprise “VostGOK”, mine “Smolinskaya”, Krivoy Rog, Ukraine

## INFLUENCE OF ROCK MASSIF STRESS-STRAIN STATE ON URANIUM ORE BREAKING TECHNOLOGY

**Цель.** Исследование влияния напряженно-деформированного состояния массива горных пород на технологию отбойки урановых руд и совершенствование параметров буровзрывных работ в условиях шахт ГП „ВостГОК“.

**Методика.** Использование общенаучных и специальных методов исследования: методы математического, статистического и графического моделирования; метод системного подхода; метод экономико-математического моделирования.

**Результаты.** В результате проведенных исследований установлено, что существенное влияние на показатели взрывной отбойки массива оказывают условия производства взрывных работ, а именно: совместное воздействие на обрушаемый участок массива статического и динамического полей напряжений, которые имеют как естественную природу и вызваны геологическим строением обрушаемого участка, величиной горного давления, так и создаваемых искусственно, путем целенаправленного воздействия на массив за счет применения различных технических решений. Это позволяет значительно повысить эффективность отбойки за счет улучшения качества дробления руды, уменьшения расхода взрывчатых веществ (ВВ), повышения производительности труда рабочих и т.д.

**Научная новизна.** Установлено, что при подземной отбойке урановых руд в условиях узкого очистного пространства скважины, в большинстве случаев, располагаются в зоне действия повышенных сжимающих напряжений. При этом увеличивается сопротивление отрыву обрушаемого взрывом слоя по контуру очистного пространства, что приводит к неполной отбойке обрушаемого взрывом слоя или к прострелу скважин. В этом случае фактический удельный расход ВВ на отбойку больше по сравнению с оптимальным. При отбойке в условиях широкого очистного пространства, когда скважины расположены в зоне разгрузки, сопротивление разрушению руды взрывом уменьшается, что обуславливает соответствующее снижение энергетических затрат на обрушение.

**Практическая значимость.** При определении параметров буровзрывных работ (БВР) для подземной отработки урановых месторождений рекомендовано использовать усовершенствованную методику проф. Ю.П. Капленко, которая учитывает напряженно-деформированное состояние массива, что позволяет улучшить качество дробления руды при ее отбойке.

**Ключевые слова:** *напряженно-деформированное состояние массива, отбойка, скважины, урановые месторождения*

**Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими задачами.** Горные породы в массиве находятся в напряженном состоянии под действием веса налегающих пород, а в ряде районов и других сил, обусловленных тектоническими нарушениями,

перемещением участков земной коры и происходящих в ней тепловых процессов. До проведения в массиве выработок между частицами горных пород существует равновесие. При проведении выработок в массиве это равновесие нарушается, в результате чего возникают силы, вызывающие деформацию горных пород, окружающих эти выработки.

© Ступник Н.И., Калиниченко В.А., Федько М.Б., Мирченко Е.Г., 2013

Решение задач о напряженно-деформированном состоянии элементов систем разработки и вмещающих их массивов горных пород осуществляется различными методами механики горных пород. Эффективность каждого метода определяется его применимостью к конкретным инженерно-геологическим и горнотехническим условиям разработки месторождений полезных ископаемых.

Наиболее широко используется группа математических методов – аналитические методы теории упругости. Их достоинство заключается в том, что они дают реальную основу для понимания главных механизмов геомеханических процессов, вызываемых образованием обнажений. Основной недостаток – очень высокая степень идеализации (однородные изотропные или анизотропные массивы с простейшей геометрией подземных конструкций), вследствие которой утрачиваются некоторые существенные особенности конкретных породных массивов.

В настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) является наиболее универсальным из численных методов решения практических задач механики горных пород. Он позволяет исследовать задачи при широком круге предположений, в том числе и исследование влияния напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород на технологию отбойки урановых руд.

**Анализ исследований и публикаций.** Метод конечных элементов относится к вариационным методам и, с математической точки зрения, представляет собой обобщение метода Рэлея-Ритца-Галеркина, что показано в работах Г. Стренга и Дж. Фикса. Сущность метода заключается в аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью конечных элементов, имеющей ограниченное число степеней свободы. Элементы соединяются в узлах и между ними определенным образом устанавливается взаимосвязь.

Математическая теория МКЭ с систематическим изложением конечноэлементных представлений произвольных функций, определенных на пространствах любой конечной размерности, развита в работах Ф. Сьярле. Процедуру вывода основных зависимостей МКЭ и его применение к решению задач теории упругости можно найти в работах [1–3].

Исследования НДС горных пород в массиве откоса приведено в работе [4]. Авторами установлено, что проведение горных выработок, создание обнажений как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях нарушает первоначальное напряженное состояние горных пород, и в массиве происходит перераспределение поля напряжений.

Результаты исследований влияния напряженно-деформированного состояния массива на эффективность отбойки руды при очистной выемке также приведены в работе [5]. Автор отмечает, что параметры буровзрывных работ при отбойке руды определяются на основании равенства между сопротивлением массива разрушению и энергетическими затратами взрывчатых веществ (ВВ) на преодоление этого со-

противления. При этом основным показателем, характеризующим физико-механические свойства рудного массива, является коэффициент крепости пород по М.М. Протодяконову, а энергетические затраты ВВ оцениваются величиной удельного расхода вещества на отбойку  $q$ .

**Постановка задачи.** Целью работы является исследование влияния напряженно-деформированного состояния массива горных пород на технологию отбойки урановых руд.

**Изложение материала и результаты.** В горном массиве поле напряжений обусловлено давлением толщ налегающих пород и наведенными очистными работами зон его концентрации и деконцентрации (стационарного опорного давления и разгрузки).

Следовательно, максимальная компонента поля напряжений в горном массиве определяется из выражения

$$\sigma_{max} = K \cdot \gamma \cdot H,$$

где  $H$  – глубина горных работ, м;  $\gamma$  – приведенный объемный вес налегающих пород, т./м<sup>3</sup>;  $K$  – коэффициент напряжений, наведенный очистными работами.

Расчеты выполнялись для усредненных физико-механических характеристик урановых руд, отрабатываемых на шахтах ГП „ВостГОК“, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Усредненные физико-механические характеристики урановых руд ГП „ВостГОК“

№ п/п	Характеристика	Величина
1	Модуль упругости	42*10 <sup>9</sup> Н/м <sup>2</sup>
2	Коэффициент Пуассона	0,3
3	Модуль сдвига	29*10 <sup>9</sup> Н/м <sup>2</sup>
4	Удельный вес	2660 кг/м <sup>3</sup>
5	Предел прочности на растяжение	3*10 <sup>6</sup> Н/м <sup>2</sup>
6	Предел прочности на сжатие	52*10 <sup>6</sup> Н/м <sup>2</sup>

Для указанных условий расчетные горизонтальные напряжения в массиве горных пород будут равны  $\sigma_x = 0,5 \cdot K \cdot \gamma \cdot H = 0,5 \cdot 1,6 \cdot 2,66 \cdot 600 = 1296$  т./м<sup>2</sup> = 12710000 Н/м<sup>2</sup>.

Тогда расчетные вертикальные напряжения составят  $\sigma_y = K \cdot \gamma \cdot H = 1,6 \cdot 2,66 \cdot 600 = 2592$  т./м<sup>2</sup> = 25920000 Н/м<sup>2</sup>.

Для исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород, в зависимости от способа отбойки камерного запаса при очистной выемке урановых руд, применялся метод конечных элементов, который был реализован на базе программного обеспечения SolidWorks.

Общий вид конечноэлементной модели для одного из исследуемых вариантов отбойки (базового) представлен на рис. 1.

Моделирование выполняли для следующих параметров: высота камеры – 80м; высота бурового подэтажа (уступа) – 20м; горизонтальная мощность залежи – 15м; угол падения рудного тела – 70°.

Общее количество узлов в конечноэлементной модели составило 12701; суммарное количество элементов – 7733; число степеней свободы – 33612.

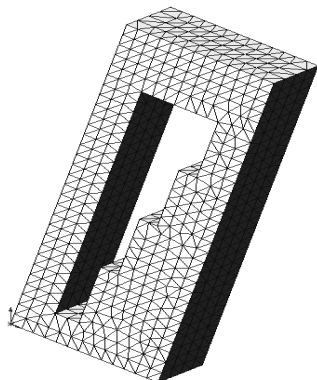


Рис. 1. Общий вид конечноэлементной модели для базового варианта отбойки урановых руд

Для исследования напряженно-деформированного состояния рудного массива было промоделировано 4 варианта отработки камерного запаса, которые отличаются между собой последовательностью отбойки скважинных зарядов на подэтажах:

1. Последовательная почвоуступная отбойка с опережением выемки руды на вышележащих подэтажах.

2. Последовательная послойная отбойка камерного запаса на всю высоту камеры.

3. Послойная отбойка камерного запаса на всю высоту камеры с опережающим взрыванием в каждом слое скважинных зарядов на нижнем и верхнем буровых подэтажах.

4. Отработка камеры спаренными слоями с первоочередной выемкой верхней части камерного запаса и опережающей подсечкой при отбойке каждого слоя.

Распределение поля напряжений, в окружающем выработанное пространство массиве горных пород, при последовательной подэтажной отбойке камерного запаса вертикальными слоями с почвоуступной линией очистного забоя приведено на рис. 2.

Поскольку такой способ отработки камерного запаса является доминирующим на шахтах ГП „ВостГОК“, то он был принят в качестве базового.

Вначале проанализируем общую картину распределения поля напряжений в окружающем камеру массиве на примере этого варианта.

Как видно на рис. 2, зона растягивающих напряжений приурочена к относительно небольшому участку центральной части горизонтального обнажения потолочины. Развитие областей пониженных напряжений характерно за пределами зоны растягивающих напряжений в массиве потолочины, в центральной части вертикального обнажения рудного массива на всю высоту камеры (левая часть рисунка) и в верхней части каждого уступа. Зоны сжимающих напряжений приурочены к углам камеры, в глубине массива, за преде-

лами области пониженных напряжений, а далее следует область, характерная для напряжений, близких к исходным. Такая картина распределения поля напряжений вполне соответствует тем закономерностям, которые были установлены другими исследователями. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов и возможности использования данной программы для установления закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния массива при различных способах ведения работ.

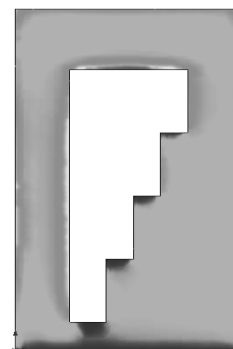


Рис. 2. Распределение поля напряжений в массиве в варианте с последовательной почвоуступной выемкой камерного запаса и опережающей отбойкой руды на верхних подэтажах

Что касается собственно анализа поля напряжений на участках, подлежащих отбойке, то на рис. 2 видно, что, при небольших площадях вертикальных обнажений рудного массива, на каждом из подэтажей на верхних уступах (а по мере отработки уступов – то и на нижележащих) будет преобладать зона повышенных сжимающих напряжений, которая ухудшает условия работы скважинных зарядов. Таким образом, при отбойке необходимо будет затратить энергию не только на преодоление сил сцепления, характерных для прочностных характеристик данной горной породы, а дополнительно еще и сжимающих напряжений, которые в этом случае упрочняют массив. При использовании методики определения параметров БВР, которая не учитывает данный фактор, это приводит к ухудшению качества дробления руды при отбойке, т.е. повышенному выходу негабаритных кусков.

В результате проведенных исследований установлено, что существенное влияние на показатели взрывной отбойки массива оказывают условия производства взрывных работ, а именно: совместное воздействие на обрушаемый участок массива статического и динамического полей напряжений, которые имеют как естественную природу и вызваны геологическим строением обрушаемого участка, величиной горного давления, так и создаваемых искусственно, путем целенаправленного воздействия на массив за счет применения различных технических решений. Это позволяет значительно повысить эффективность отбойки за счет улучшения качества дробления руды, уменьшения расхода ВВ, повышения производительности труда рабочих и т.д.

Как было установлено в ходе моделирования, при используемой в настоящее время технологии отработки камерного запаса с поэтажной отбойкой руды вертикальными слоями и почвоуступной выемкой (базовый вариант), в подлежащих обрушению участках рудного массива будут преобладать повышенные сжимающие напряжения, ухудшающие условия работы скважинных зарядов и отрицательно сказывающиеся как на показателях отбойки, так и на эффективности добычи руды по системе разработки в целом. Прямым подтверждением этого является (согласно производственным данным) довольно высокий удельный расход ВВ на отбойку (в среднем 0,87 кг/т.), выход негабарита (около 9%) и, как следствие, очень высокий расход ВВ на вторичное дробление (порядка 180–200 г/т.), а также довольно невысокая производительность вибровыпуска руды (около 320–350 т./смену).

При использовании данного способа отработки улучшения условий работы зарядов, а, следовательно, и качества дробления руды, можно достичь путем применения волновой и врубовых схем их короткозамедленного взрывания, которые позволяют, за счет создания дополнительных поверхностей обнажения рудного массива, уменьшить „зажим“ (что особенно актуально при небольшой выемочной мощности), а также использовать эффект соударения кусков горной массы, что способствует дополнительному их дроблению.

Остальные рассмотренные способы отработки камерного запаса для улучшения условий работы скважинных зарядов предполагают опережающую отрезку или подсечку подлежащей обрушению части массива, что приводит к изменению его напряженно-деформированного состояния.

Известно, что скорость изменения НДС массива равна скорости распространения в нем волн напряжений, т.е. скорости звука в данных горных породах. Величину опережения взрывания нижнего или верхнего уступа (подэтажа) по отношению к отбойке участка, подлежащего разгрузке, можно определить по формуле

$$t = \frac{H_y}{C_s},$$

где  $H_y$  – высота участка массива, подлежащего разгрузке, м;  $C_s$  – поперечная составляющая скорости распространения упругих волн в массиве, м/с.

Так, например, при опережающей подсечке участка массива высотой  $H_y$  около 40–50 м и  $C_s=3600...3800$  м/с, это время составит порядка 11...14 миллисекунд. Таким образом, опережения при отбойке нижнего подэтажа в 20 мс при производстве массового взрыва будет вполне достаточно для того, чтобы в подсекаемом массиве произошло перераспределение поля напряжений и перевести его в зону пониженных или растягивающих напряжений, ослабляющих прочностные свойства массива и улучшающих условия работы скважинных зарядов.

При втором способе отработки камерного запаса массовым взрывом отбивают один веер глубоких скважин на всю высоту камеры. При этом, с опережением отбивают 2–3 центральных подэтажа, массив

которых находится в зоне пониженных напряжений, и в последнюю очередь (с замедлением 20–50 мс) – производится отбойка нижнего и верхнего буровых подэтажей. При отбойке центральных подэтажей возможно использование как волновой, так и порядной схем инициирования зарядов. При отбойке нижнего и верхнего подэтажей целесообразно применение диагональных схем взрывания с развитием очередности инициирования зарядов от угловых частей этих подэтажей, граничащих с центральной частью массива (т.е. отбитых с опережением), где уже сформируются зоны пониженных напряжений, соответственно, в направлении к днищу камеры на нижнем подэтаже и к потолочине – на верхнем.

При послышной отбойке массива одиночными веерами скважин на всю высоту камеры, но с опережающей подсечкой с отрезкой каждого слоя (третий вариант), в первую очередь, с опережением 20–50 мс, взрывают нижний и верхний буровые подэтажи (с использованием волновой или клиновых схем инициирования зарядов в них), с последующим обрушением центральных подэтажей. При этом инициирование скважинных зарядов в них возможно как порядное, так и диагональное, с развитием фронта от угловых частей этого массива к его центру.

При применении четвертого способа отработки, т.е. последовательной отбойке спаренными слоями (веерами) сначала верхних, а затем нижних буровых подэтажей, рекомендуется следующее.

При отработке верхней части камерного запаса вначале с опережением отбивают нижний (для этой части) буровой подэтаж с применением порядной или волновой схем инициирования в нем скважинных зарядов, после чего обрушают верхний буровой подэтаж с использованием диагональной (снизу вверх) схемы взрывания.

При отработке нижней части камерного запаса также с опережением отбивают нижний буровой подэтаж, но с использованием волновой или клиновых схем инициирования скважинных зарядов, после чего обрушают верхний буровой подэтаж с использованием порядной или диагональной схем взрывания.

**Выводы.** При отбойке руды в условиях узкого очистного пространства скважины, в большинстве случаев, располагаются в зоне действия повышенных сжимающих напряжений. При этом увеличивается сопротивление отрыву обрушаемого взрывом слоя по контуру очистного пространства, что приводит к неполной отбойке обрушаемого взрывом слоя или к прострелу скважин. В этом случае фактический удельный расход ВВ на отбойку больше по сравнению с оптимальным.

При отбойке в условиях широкого очистного пространства, когда скважины расположены в зоне разгрузки, сопротивление разрушению руды взрывом уменьшается, что обуславливает соответствующее снижение энергетических затрат на обрушение.

Кроме вышеуказанного, при определении параметров БВР для конкретных условий желательнее использовать усовершенствованную авторами методику д.т.н., проф. Ю.П. Капленко [8], которая позволяет

учесть напряженно-деформированное состояние массива, что также положительно отразится на улучшении качества дробления руды при ее отбойке.

### Список литературы / References

1. Жуков С.А. Технологические проблемы выработанных пространств подземных рудников / С.А. Жуков, В.А. Калиниченко – Кривой Рог: Минерал, 2007. – 163 с.  
Zhukov, S.A. and Kalinichenko, V.A. (2007), *Tekhnologicheskiye problemy vyrabotannykh prostranstv podzemnykh rudnikov* [Technological Problems of Mined Out Spaces in Underground Ore Mine], Mineral, Krivoy Rog, Ukraine
2. Калиниченко В.А. Исследования напряженно-деформированного состояния комбинированных искусственных массивов / В.А. Калиниченко // Материали міжнародної науково-практичної конференції „Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості – 2006”. Додатковий випуск. – Кривий Ріг, 2006. – С. 155–156.  
Kalinichenko, V.A. (2006), “Study of stressed state of complex artificial massif”, *Proc. of the Conf. “Sustainable development of mining and metallurgical industries – 2006”*, Kyvvi Rih, Additional issue, pp. 155–156.
3. Кузьменко А.М. Состояние массива горных пород вокруг очистного забоя в зонах интенсивной трещиноватости / А.М. Кузьменко // Научный вестник Национального горничого университета. – Днепропетровськ, 2007. – №6. – С. 22–24.  
Kuzmenko, A.M. (2007), “State of massif around production face in zones with fractured rock”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.6, pp. 22–24.
4. Калиниченко В.А. Аналитическое определение напряженно-деформированного состояния горного массива вокруг „пионер-камеры“ лежащего бока / В.А. Калиниченко // Научный вестник Национального горничого университета. – Днепропетровськ, 2007. – №12. – С. 19–23.  
Kalinichenko, V.A. (2007), “Analytical determination of stressed state of massif around ‘pioneer-room’ of bottom layer”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.12, pp. 19–23.
5. Капленко Ю.П. Влияние напряженного состояния горного массива горногеологических условий на параметры обнажений и форму очистных камер / Ю.П. Капленко, В.В. Цариковский // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КТУ. – 2005. – Вып.88. – С. 21–24.  
Kaplenko, Yu.P. and Tsarikovskiy, V.V. (2005), “Influence of stressed state of massif on parameters of disclosure and dimensions of production rooms”, *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy*, KTU, Krivoy Rog, Issue 88, pp. 21–24.
6. Капленко Ю.П. Методические указания по определению оптимальных параметров БВР / Капленко Ю.П. – Кривой Рог: КТУ, 2008. – 52 с.  
Kaplenko, Yu.P. (2008), *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu optimalnykh parametrov BVR* [Guidance

on Determination of the Optimum Parameters for Drilling and Blasting Process] KTU, Krivoy Rog, Ukraine.

**Мета.** Дослідження впливу напружено-деформованого стану масиву гірських порід на технологію відбійки уранових руд та вдосконалення параметрів буро вибухових робіт в умовах шахт ДП „СхідГЗК”.

**Методика.** Використання загальнонаукових і спеціальних методів дослідження: методи математичного, статистичного та графічного моделювання; метод системного підходу, метод економіко-математичного моделювання.

**Результати.** У результаті проведених досліджень встановлено, що істотний вплив на показники вибухової відбійки масиву здійснюють умови проведення підричних робіт, а саме: спільний вплив на ділянку, що відбивається, масиву статичного та динамічного полів напружень, які мають як природну природу та викликані геологічною будовою ділянки, що відбивається, величиною гірського тиску, так і створюваних штучно шляхом цілеспрямованого впливу на масив за рахунок застосування різних технічних рішень. Це дозволяє значно підвищити ефективність відбійки за рахунок поліпшення якості дроблення руди, зменшення витрат вибухових речовин (ВР), підвищення продуктивності праці робітників та ін.

**Наукова новизна.** Встановлено, що при підземній відбійці уранових руд в умовах вузького очисного простору свердловини, у більшості випадків, розташовуються в зоні дії підвищених стискаючих напруг. При цьому збільшується опір відриву шару, що відбивається вибухом, по контуру очисного простору, що призводить до неповної відбійки шару руди або до прострілу свердловин. У цьому випадку фактична питома витрата ВР на відбійку більше, у порівнянні з оптимальною.

При відбійці в умовах широкого очисного простору, коли свердловини розташовані в зоні розвантаження, опір руйнуванню руди вибухом зменшується, що зумовлює відповідне зниження енергетичних витрат на обвалення.

**Практична значимість.** При визначенні параметрів буровибухових робіт (БВР) для підземного видобутку уранових родовищ рекомендовано використовувати вдосконалену методику проф. Ю.П. Капленка, яка враховує напружено-деформований стан масиву, що дозволяє поліпшити якість дроблення руди при її відбійці.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан масиву, відбійка, свердловини, уранові родовища

**Purpose.** To study the influence of the stress-strain state of rock on the technology of uranium ore breaking and improve the drilling and blasting operations in the mines of State Enterprise “VostGOK”.

**Methodology.** We have used the following research methods: methods of mathematical, statistical and graphical simulation, method of systematic approach, method of economic and mathematical modeling.

**Findings.** As a result of the studies we found out that the following blasting conditions affect the drilling and

blasting performance significantly: combined effect of static and dynamic stress fields both natural (caused by the geological structure of the undermined area or the rock pressure behavior) and man-made (created by means of various technical solutions). This can make breaking more efficient through improvement of the quality of ore crushing, reducing the consumption of explosives, increasing productivity of workers, etc.

**Originality.** We have found out that when breaking underground uranium ore in the narrow space the wells, commonly, are located in the points affected by the high compressive stress. This increases the resistance of the layer affected by blasting, and it causes incomplete breaking of ore or well shooting. In this case the actual specific consumption of explosives during breaking exceeds the optimum.

When breaking process is carried out in wide area and wells are located in the unstressed place the resistance of ore to explosion is reduced. This reduces the amount of energy spent on breaking.

**Practical value.** During determining the parameters of the drilling and blasting operations for underground mining of uranium ore deposits we recommend to use improved method of Professor Yu.P. Kaplenko, which takes into account the stress-strain state of the massif, and improves the quality of ore reduction during the breaking.

**Keywords:** *stress-strain state of massif, breaking, well, uranium deposit*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Б.М. Андрєєвим. Дата надходження рукопису 20.11.12.*

УДК 622.28: 624.07: 624.012.45: 624.9: 69.07

**Г.Г. Литвинский, д-р техн. наук, проф.,  
Э.В. Фесенко, канд. техн. наук, доц.**

Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Украина, e-mail: fesenkoed@gmail.com

## ТЕОРИЯ РАСЧЕТА ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПИ

**G.G. Litvinsky, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
E.V. Fesenko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor**

Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine,  
e-mail: fesenkoed@gmail.com

## THEORY OF CALCULATION OF CONCRETE-FILLED-STEEL-TUBE (CFST) OF MINING SUPPORT

**Цель.** Разработать теорию расчёта несущей способности трубобетонных элементов (ТБЭ) по первому предельному состоянию при их произвольном нагружении нормальной силой и изгибающим моментом, установить закономерности совместной работы стальной трубы и твердеющего состава.

**Методика.** Для адекватного представления совместной работы металла и бетонного заполнителя в трубобетоне использовано условие их совместного деформирования на участках контакта с помощью аналитической и численной математических моделей. Основным отличием методики является учёт различных типов напряженно-деформированного состояния (НДС) стали и бетона в трубобетоне при наступлении предельных состояний на крайних волокнах стальной обоймы.

**Результаты.** В результате установлены три различных типа НДС в трубобетоне, выявлены особенности наступления предельного состояния для каждого типа. Предложена расчётная схема распределения внутренних усилий в трубобетонном элементе при его произвольном внешнем нагружении и, на основе физически обоснованной модели взаимодействия бетона и стальной трубы, исследована несущая способность трубобетона. Установлены закономерности перехода одного типа предельного состояния в другое по мере изменения внешнего нагружения ТБЭ, заданного в виде отношения нормальной силы к изгибающему моменту. Разработан метод расчета несущей способности трубобетона. Получены аналитические зависимости для расчета предельных соотношений внешних нагрузок для трех типов НДС.

**Научная новизна.** Впервые разработана аналитическая теория прочности сжато-изогнутых трубобетонных элементов при любом соотношении внешних нагрузок в первом предельном состоянии. Теория охватывает произвольные сочетания механических свойств и геометрических параметров твердеющего заполнителя и стальной обоймы. Установлено наличие трех различных типов НДС в ТБЭ. Впервые предложена обобщенная диаграмма предельных усилий в ТБЭ в виде зависимости предельно допустимых моментов от продольной сжимающей силы.

**Практическая значимость.** Разработанная аналитическая теория позволяет достоверно рассчитывать прочность различных ТБЭ по первому предельному состоянию, что необходимо для их применения в строительных конструкциях промышленного и гражданского назначения, поверхностного комплекса горных предприятий и подземной крепи горных выработок.

**Ключевые слова:** *трубобетон, нагружение, прочность, модель, предельное состояние*

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** Эффективность промышленного и гражданского строи-

тельства во многом зависит от снижения материалоемкости и стоимости применяемых строительных материалов, конструктивных элементов.

© Литвинский Г.Г., Фесенко Э.В., 2013