

Выводы

1. На базе натуральных наблюдений разработана модель деформирования горных пород и предложен графоаналитический способ определения нагрузки на крепь подготовительной выработки после прохода лавы в условиях шахт ПАО ДТЭК «Павлоградуголь»

2. Сформирована идеализированная схема крепления краевой части лавы для шахт ПАО ДТЭК «Павлоградуголь».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатников А.А. Поддержание подготовительных выработок с использованием рамно-анкерного крепления / А.А. Булатников // Проблеми гірничої технології. – Красноармійськ, КП ДонНТУ, 2010 р. – с. 82-86.
2. Зборщик М. П. Повторное использование участковых выработок – неотложная задача угольных шахт / М.П. Зборщик // Уголь Украины. – 2011. – №1.
3. Колоколов О.В. О порядке отработки весьма сближенных пластов в слабых вмещающих породах / О.В. Колоколов, Н.А. Лубенец, Ю.М. Халимендик // Уголь Украины, №1, 1994. – с. 10-13.
4. J. Khalymendyk. Substantiation of rope anchors length in the conditions of mines in the Western Donbas Coal Region / J. Khalymendyk, V. Chervatuk, S. Eremin. - Rockbolting and rock mechanics in mining. VGE Verlag GmbH, 2012. - p. 285-292.
5. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г.Л. Фисенко. - М.: «Недра», 1976. – 272 с.
6. Шашенко А. Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
7. Ларченко В.Г. Механизм сдвижения толщи горных пород над движущимся очистным забоем / В.Г. Ларченко // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1979. – №7. – с. 22-26.
8. Писаренко Г.С. Сопrotивление материалов. Учебник для ВУЗов / Г.С. Писаренко.– Киев: Вища школа, 1979. – 696 с.
9. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони: СОУ 10.1.00185790.011:2007. Мінвуглепром України. – К., 2007. – 113 с.

УДК 622.281.74.04:622.261

Инженер С.А Лещинский
(ИГТМ НАН Украины)

РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНКЕРНОЙ КРЕПИ И ПОРОДНОГО МАССИВА

Розроблена кінцево-елементна модель взаємодії елементів анкерного кріплення із врахуванням нової інтерпретації контактної взаємодії. Проведена верифікація отриманої моделі із емпіричними даними стендових випробувань анкерної шайби. Наведена тестова модель анкерного кріплення в умовах навантаження. Отримана картина розподілу переміщень у тестовій моделі.

CALCULATION OF SYNERGY OF THE ELEMENTS OF ANCHORING AND ROCK MASSIFE

The finite element model of the synergy of elements of anchoring taking into account of new interpretations of the contact interaction was developed. The verification of the resulting model with empirical data of test bench of anchor shime was done. The test model of anchoring under loading was given . The resulting pattern of distribution of displacements in the test model was obtained.

Обеспечение устойчивости закрепленной анкерами горной выработки достигается оптимальным функционированием всех составляющих анкерной крепи в конкретных горно-геологических условиях.

Одним из важнейших элементов анкерной крепи является шайба, норматив-

ные требования к которой определены в [1]. В соответствии с положениями этого документа, анкерная шайба предназначена для прижатия ограждения к поверхности выработки, нормализованной передачи предварительной и рабочей нагрузки между гайкой и горными породами, блокирования самопроизвольного развинчивания гайки, предупреждения свыше нормативного углубления анкерной гайки в шпур при эксплуатации анкерной крепи. Конструктивные элементы анкерной шайбы должны обеспечивать предупреждение ее продавливания гайкой на весь срок эксплуатации анкерного крепления выработки, восприятие рабочей нагрузки всей ее рабочей (контактирующей с горной породой) поверхностью без ее изгибания и без отклонения хвостовика анкера [1].

Однако, в процессе эксплуатации выработки с анкерной крепью, указанные требования к шайбе зачастую не обеспечиваются. Природой таких отклонений является потеря устойчивости приконтурных пород горной выработки вследствие малоизученного в настоящее время негативного влияния совокупности факторов, к которым относятся динамическая природа напряженно-деформированного состояния приконтурного массива, геометрические параметры анкерной шайбы и особенности принципов ее взаимодействия с приконтурной породой.

Поэтому актуальной является задача разработки математических моделей и методов исследования этих факторов в их совокупности с целью оптимизации параметров взаимодействия анкерной шайбы и приконтурного массива. В результате этого будут уточнены нормативные требования к шайбе и другим элементам анкерной крепи, что, в конечном итоге, позволит обеспечить повышение устойчивости горной выработки с анкерной крепью в процессе ее эксплуатации.

На первом этапе ставится задача исследования процесса деформирования анкерной шайбы при ее взаимодействии с поверхностью контура горной выработки под действием нагрузки, обусловленной напряженно-деформированным состоянием приконтурного массива.

Поставленная задача решается на основе численного моделирования с применением метода конечных элементов. Для моделирования взаимодействия анкерной шайбы и приконтурного массива применяется аппарат контактной задачи теории упругости. Наиболее известным аналитическим решением аналогичной задачи является задача о вдавливании жесткого штампа в неоднородное упругое основание, где жесткий штамп является абстрагированной моделью шайбы, а неоднородное упругое основание – моделью горной породы. В качестве воздействия напряженно-деформированного состояния приконтурного массива выступает адекватная внешняя нагрузка, приложенная к штампу.

Постановка этой задачи, в терминах теории упругости, заключается в следующем [2].

Недеформируемый круглый штамп вдавливается в верхнюю грань Γ упругого неоднородного полупространства силой P . С полупространством связана цилиндрическая система координат (r, φ, z) . Силы трения между штампом и полупространством предполагаются отсутствующими. Вне штампа полупространство не загружено. Штамп представляет собой осесимметричное тело с попе-

речным сечением ($r \leq a$) и поверхностью основания $z=\psi(r)$.

Расчетная схема моделирования вдавливания штампа в упругую неоднородную плоскость приведена на рис. 1.

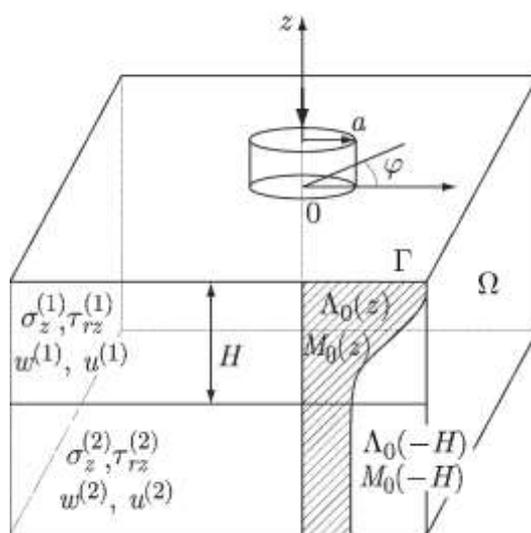


Рис. 1 - Расчетная схема моделирования вдавливания штампа в упругую неоднородную плоскость

Поставленная задача сводится к решению интегрального уравнения вида:

$$\int_0^1 \tau(\rho) \rho d\rho \int_0^\infty L(u)(\gamma) J_0(ur\lambda^{-1}) J_0(u\rho\lambda^{-1}) du = \lambda \theta_0(0) f(r)$$

$$\theta_0(y) = 2M(y)(\Lambda(y) + M(y))(\Lambda(y) + 2M(y))^{-1}$$

В дальнейшем для разрешения указанного интегрального уравнения будет необходимо численное отыскание и аппроксимация трансформанты ядра интегрального уравнения [2].

Перейдем от абстрактной постановки к поставленной выше технологической задаче о деформировании анкерной шайбы в условиях горной выработки. При этом имеем:

а) анкерная шайба, в качестве модели которой выступает «штамп», описывается следующими параметрами:

1) геометрические параметры и характеристики – диаметр, толщина, кривизна поверхности, начальная площадь и контур контакта;

2) физико-механические параметры – константы материала шайбы (модуль Юнга, коэффициент Пуассона);

б) горная порода, в качестве модели которой выступает «неоднородное упругое основание», описывается следующими параметрами:

1) геометрические параметры и характеристики – начальная площадь и контур контакта;

2) физико-механические параметры - константы материала породы (модуль

Юнга, коэффициент Пуассона);

в) напряженно-деформированного состояние приконтурного массива, воздействующее на шайбу, описывается параметрами:

- 1) область приложения нагрузки;
- 2) интенсивность нагрузки.

Приведенные параметры являются входными данными для поставленной технологической задачи.

Граничными условиями задачи являются:

- геометрические ограничения на перемещения области приложения гайки к шайбе;
- кинематические ограничения на движение породы как основания;
- выполнение условия «сплошности» деформаций.

Выходными данными модели являются – перемещения, деформации, напряжения.

Однако, применительно к рассматриваемой технологической задаче, аналитическая модель в рамках аппарата контактной задачи теории упругости, имеет ряд существенных недостатков:

- наложены жесткие ограничения на геометрию штампа, что не дает возможности провести сравнительный анализ и оптимизировать геометрию шайбы;
- рассматриваемый штамп недеформируем, следовательно, нет возможности отследить напряженно-деформированное состояние шайбы;
- аналитическое и численное отыскание трансформанты ядра несет большую математическую сложность.

На основании вышесказанного возникла необходимость в разработке уточненной модели контактной задачи теории упругости, применительно к поставленной задаче о деформировании анкерной шайбы в условиях горной выработки.

Для наиболее близкого к реальному моделирования взаимодействия шайбы и породы была разработана уточненная модель контакта в трехмерной формулировке.

Основополагающим разрешающим параметром для модели контакта является геометрическая конфигурация системы контакта (совокупность координат контактных плоскостей и их касательные вектора)

Модель контакта в трехмерной формулировке основывается на описании поворота точки подчиненной (менее жесткой поверхности), т.е предполагается что в дальнейшем более жесткая шайба будет обладать доминирующей зоной контакта, а порода будет иметь подчиненную к ней зону контакта.

Перемещения точки описывается уравнением:

$$p(\xi_1, \xi_2) = x_0 + \xi_1 v_1 + \xi_2 v_2$$

где x_0 - начальная точка и ее касательные вектора, v_1 и v_2 - функции координат

нат узлов доминирующей (более жесткой) поверхности $X_1, x_2 \dots x_n$, \mathbf{P} - вектор линии доминирующей поверхности, ξ_1, ξ_2 - параметры функции(вектора) p .

Линеаризуя уравнения виртуальных перемещений получаем:

$$h\mathbf{n} = p(\xi_1, \xi_2) - \mathbf{x}_{N+1}$$

$$\delta h\mathbf{n} + h\delta\mathbf{n} = \delta\mathbf{x}_0 + \delta\xi_1 v_1 + \xi_1 \delta v_1 + \delta\xi_2 v_2 + \xi_2 \delta v_2 - \delta\mathbf{u}_{N+1}$$

где $\delta\mathbf{x}_0 = f(\delta x_1, \dots, \delta x_n)$, $\delta v_i = g_i(\delta x_1, \dots, \delta x_n)$, \mathbf{n} - нормаль контакта, h - зазор между областями контакта.

Получим выражение для δh через \mathbf{n} :

$$\delta h = -\mathbf{n}(\delta\mathbf{u}_{N+1} - \delta\mathbf{x}_0 - \xi_1 \delta v_1 - \xi_2 \delta v_2)$$

Используя замену $t_1 = v_1 / \|v_1\|$ и принимая $h = 0$ получаем в вариационной постановке перемещение первой поверхности контакта:

$$\delta s_1 \stackrel{def}{=} \delta\xi_1 v_1 t_1 = t_1 (\delta\mathbf{u}_{N+1} - \delta\mathbf{x}_0 - \xi_1 \delta v_1 - \xi_2 \delta v_2)$$

Аналогично, при условии $t_2 = v_2 / \|v_2\|$ и $h = 0$ получим для второй поверхности контакта:

$$\delta s_2 \stackrel{def}{=} \delta\xi_2 v_2 t_2 = t_2 (\delta\mathbf{u}_{N+1} - \delta\mathbf{x}_0 - \xi_1 \delta v_1 - \xi_2 \delta v_2)$$

Таким образом, на основе предложенной уточненной модели контактной задачи теории упругости, разработана численная модель совместного процесса деформирования анкерной шайбы и приконтурного породного массива с применением метода конечных элементов, которая позволяет определить перемещения, деформации, напряжения в любой точке исследуемого объекта.

Модель позволяет исследовать конструктивные параметры анкерной шайбы, процессы контактного взаимодействия между шайбой и поверхностью контура горной выработки, процессы передачи предварительной и рабочей нагрузки между гайкой и шайбой, условия блокирования самопроизвольного свинчивания гайки, а также решать ряд других задач с целью обеспечения соответствия параметров шайбы нормативным требованиям [1].

Для верификации описанной модели, при одинаковых исходных данных, были проведены численные расчеты перемещений в шайбе и породе под действием нагрузок, параллельно со стендовыми испытаниями шайбы. Расчет был проведен на основе МКЭ.

В стендовых испытаниях порода (аргиллит) была помещена в цилиндриче-

скую емкость размерами 200 x 200 мм, на нее уложена плоская стальная шайба с размерами 133 x 6 мм и с помощью пресса и гайки моделировалось взаимодействие элементов крепи с породой. Нагружение проводилось в пределах от 0 до 10 тонн. Для каждого значения нагрузок (с шагом 1 тонна) фиксировались перемещения в шайбе и породе .

Конечно-элементная модель шайбы и породы, примененная для численных расчетов перемещений в шайбе и породе под действием нагрузок, проиллюстрирована на рис. 2:

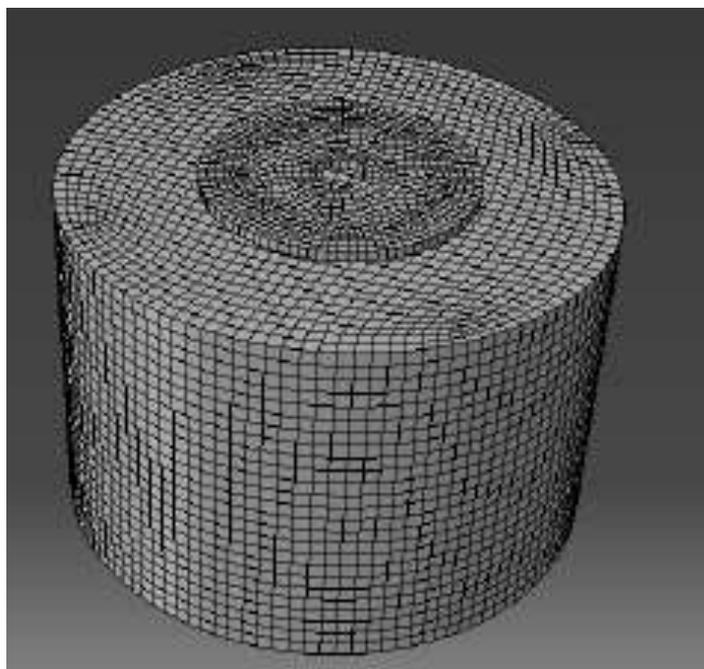


Рис. 2 – Конечно-элементная модель шайбы и породы

Для стали модуль Юнга - $2 \cdot 10^{11}$ МПа и коэффициент Пуассона - 0.3, для породы модуль Юнга - $8 \cdot 10^9$ МПа и коэффициент Пуассона - 0.3.

В процессе численных расчетов нагружение моделировалось аналогично испытательному - пошагово от 0 до 10 тонн с шагом 1 тонна. Для каждого значения нагрузок рассчитывались перемещения в шайбе и породе. Полученные результаты проиллюстрированы на рис. 3.

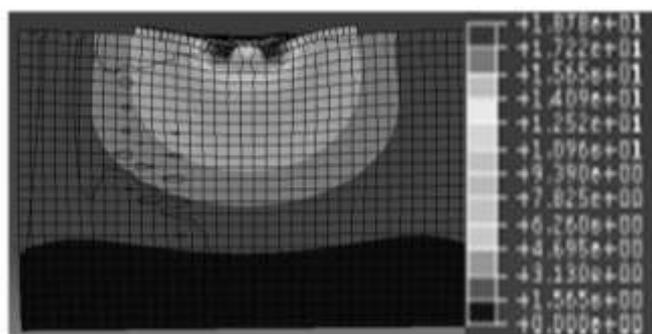


Рис. 3 - Распределение перемещений в шайбе и породе при нагрузке 10 т.

Результаты моделирования совпадают с результатами стендовых испытаний с максимальным отклонением, не превышающем 5% (см. рис. 4)

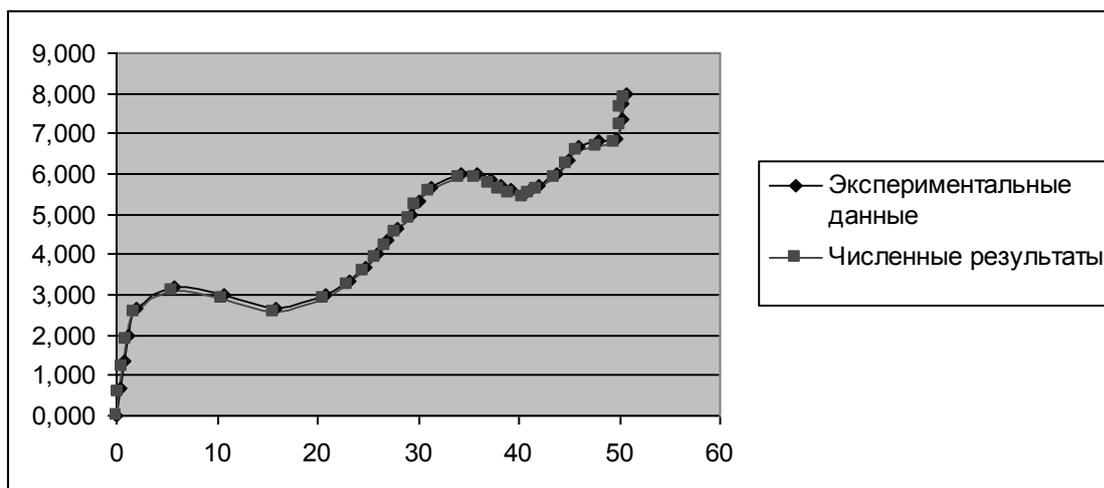


Рис. 4- Диаграмма «нагрузка-деформации» для экспериментальных и численных данных

Это свидетельствует о высокой степени адекватности модели и доказывает возможность ее применения для исследования как отдельных элементов анкерной крепи, так и для моделирования работы конструкции анкерной крепи в целом в различных горно-геологических условиях. На основании данных, полученных благодаря данной модели, возможна разработка прочностных и оптимизационных критериев работы анкерной крепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги: СОУ 10.1.05411357.010:2008.- 83 с.
2. Контактные задачи теории упругости / С.М. Айзикович, В.М. Александров, А. В. Белоконь, Л. И. Крнев - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 240 с.

Д-р техн. наук С. И. Скипочка,
канд. техн. наук В. Н. Сергиенко
(ИГТМ НАН Украины)
инж. В. Б. Усаченко
(НПП Технополис «Экоиндустрия»)

ОБ АППАРАТУРНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ДИАГНОСТИКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА УЧАСТКАХ С ОПАСНОСТЬЮ ОБРУШЕНИЯ

Показано актуальність прогнозу обвалень земної поверхні над відпрацьованим підземним простором. Описано конструкцію експериментального зразка апаратури «Опір-3». Апаратура призначена для низькочастотної електророзвідки ґрунтової товщі методом опору на глибині до 100 м.

ABOUT APPARATUS PROVIDING OF DIAGNOSTICS OF SURFACE ON AREAS WITH DANGER OF COLLAPSE

Actuality of prognosis of collapse of surface above used underground space is shown. The construction of experimental type of apparatus "Opir-3" is described. Apparatus is intended for low-frequency electrometric of the ground layer by the method of resistance on a depth to 100 m.

Деформации земной поверхности над выработанным пространством – неотъемлемая особенность подземной добычи полезных ископаемых. Масштабы потенциальной опасности от присутствия в зоне хозяйственной деятельности человека искусственных подземных полостей определяются их размерами и глубиной заложения. Особо опасны камерные системы разработки без закладки. С их использованием в Украине отрабатывают месторождения каменной и калийной солей, железной и урановой руд. При этом высота камер может достигать 50 м, а в отдельных случаях и больше. Потеря устойчивости камер приводит к катастрофическим последствиям, как под землей, так и на земной поверхности. Сведения о некоторых крупных авариях на горнодобывающих предприятиях Украины, повлекших обрушение земной поверхности, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Крупнейшие аварии на шахтах и рудниках Украины с обрушением земной поверхности

Предприятие	Год	Последствия аварии
ОАО «Ориана» (добыча калийных руд)	1987	Провал в жилом районе г. Калуша, разрушивший 63 дома.
Солотвинский соляной рудник	2005	Провал на земной поверхности диаметром 35 и глубиной 30 м.
Железорудная шахта им. Орджоникидзе	2010	Обрушение земной поверхности на площади 16 га. Погиб один человек. Разрушены инженерные коммуникации.
ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог»	2011	Провал на земной поверхности размером 50 x 70 м. Техногенное землетрясение силой 3,9 балла в черте территории г. Кривой Рог.

В меньших масштабах подобные явления наблюдаются также при отработке мощных залежей сырья для строительной промышленности (пильные известня-