

appearance of local critical pressure in the surrounding massif during its deformation. The system of diamond deposits mining with ore shrinkage in mined-out spaces.

Originality. We have created a combination of axisymmetric computational model blocks of stress state of the cylindrical stope with axial compression and external pressure determining the stability of the kimberlite rock.

Practical value. We have developed the methodology of substantiation of geotechnology

parameters of mining of Ukrainian kimberlite deposits and guidelines for assessment of technologic parameters of stopes in kimberlite pipes.

Keywords: *kimberlite rock, cylindrical shell, elastoplastic model*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.О. Садовенком. Дата надходження рукопису 18.12.12.

УДК 622.831.244

**О.Е. Хоменко, канд. техн. наук, доц.,
Д.В. Мальцев**

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: HomenkoO@nmu.org.ua; m_dima@3g.ua

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ОЧИСТНЫХ КАМЕР НА СОСТОЯНИЕ ОТБИВАЕМЫХ СЛОЕВ УРАНОВОЙ РУДЫ

**O.Ye. Khomenko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
D.V. Maltsev**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine,
e-mail: HomenkoO@nmu.org.ua, m_dima@3g.ua”

LABORATORY RESEARCH OF INFLUENCE OF FACE AREA DIMENSIONS ON THE STATE OF URANIUM ORE LAYERS BEING BROKEN

Цель. Получить зависимости величин разрушения массива урановой залежи от размеров очистной камеры при помощи метода лабораторного моделирования на материалах, которые эквивалентны урановым рудам, залегающих в альбититах.

Методика. Представлена методика проведения лабораторных исследований на материалах, эквивалентных по своим свойствам альбититам, которая включала подбор эквивалентного материала, определение его физико-механических свойств, приготовление его полного объема и формирование модели на стенде, ее пригрузка и образование очистного пространства, а также фотофиксация деформаций в массиве. Изложен порядок определения критериев подобия лабораторной модели и натурального объекта.

Результаты. Выполнен анализ энергозатрат при добыче урановых руд в Украине, который показал необходимость их снижения. Обоснован выбор метода моделирования на эквивалентных материалах. Разработана методика проведения лабораторных экспериментов. Приведены результаты численной оценки процесса разрушения массива при поэтапном увеличении размеров очистного пространства камеры при моделировании процесса отбойки слоев руды. Установлены математические зависимости развития разрушений в массиве модели для буровых подэтажей, из которых отработывают залежь урановой руды.

Научная новизна. Заключается в выявлении закономерностей разрушения рудного массива на отбиваемые слои руды в зависимости от длины очистного пространства камер при отработке урановых залежей Украины.

Практическая значимость. Подтверждение характера кубических зависимостей, полученных по результатам теоретических исследований с помощью термодинамического метода, и натуральных – методом маркшейдерских съемок. Проверка сходимости результатов, полученных в лабораторных условиях, с теоретическими и натурными исследованиями оказалась достаточно высокой.

Ключевые слова: *добыча урановой руды, горное давление, физическое моделирование, эквивалентные материалы, критерии подобия, закономерности разрушения массива*

Постановка проблемы. Самые распространенные в мире энергоносители – это нефть, газ, уголь и уран. Украина в достаточной степени обеспечена только углем и ураном, и запасы урана составляют 4% от мировых. Это выводит нашу страну в десятку лидеров международного рейтинга обладателей уранового сырья с соответствующим балансом исполь-

зования энергии урана к остальным энергоносителям 46:54%. При этом разведанные запасы 20 месторождений урана возможно отработать только подземным способом. Однако низкое содержание урана в рудах и высокая энергоемкость производства формируют одни из самых высоких в мире цен на отечественное сырье и позволяют обеспечить топливом украинские АЭС всего на 35%. Наличие 2–3% годового роста

производства сохраняет достаточно высокий уровень дефицита уранового концентрата в стране.

Добычу урановых руд в Украине осуществляет ГП „Восточный горно-обогатительный комбинат“ с применением на шахтах камерных систем разработки с твердеющей закладкой и с широкомасштабным использованием на проходческих и очистных работах буровзрывного способа отбойки. Этот способ характеризуется высоким сейсмическим воздействием взрывных волн, динамическим влиянием ударно-воздушных волн и статическим разрушением массива под действием горного давления, что приводит к усложнению технологии очистных работ.

Можно выделить несколько негативных факторов, влияющих на технологичность добычи урановых руд на шахтах Украины. При разрушении напряженного массива происходит перерасход буровой стали, твердого сплава в буровом оборудовании, взрывчатых материалов и энергии. Затем, при нарушении эксплуатационных скважин, происходит снижение качества их зарядания и взрывания. Эти факторы влияют на выход объема негабаритного куска и снижают безопасность работ при бурении, зарядании, первичном и вторичном дроблении руды.

Основной причиной проявления указанных негативных факторов является напряженно-деформированное состояние (НДС) массива, которое проявляется в виде шелушения, трещинообразования, обрушения и, в конце концов, выполаживания контуров очистных камер и примыкающих к ним буровых выработок [1].

Одним из основных факторов, влияющих на себестоимость добычи руды, являются буровзрывные работы, в которых главным технологическим процессом выступают бурение и взрывание эксплуатационных скважин. Увеличение глубины разработки приводит к увеличению влияния НДС массива на затраты на первичное и вторичное дробление урановой руды.

Анализ последних исследований. Разработкой ресурсосберегающих технологий добычи руд с учетом НДС горных пород занималось большое число исследователей как в Украине, так и за рубежом. Так, например, этим вопросам посвящены работы, выполненные в Государственном ВУЗ „Национальный горный университет“, Борисенко С.Г., Шириним Л.Н., Кузьменко А.М., Кононенко М.Н.; в Государственном ВУЗ „Криворожский национальный университет: Капленко Ю.П., Андреевым Б.Н., Мутамбо В.П. и др. Базовыми исследованиями для работы являются результаты исследования Капленко Юрия Петровича, который принимал усредненное влияние НДС на параметры буровзрывных работ при отработке запасов очистной камеры, не дифференцируя их по стадиям отработки для разных слоев отработки камеры. Таким образом, вопрос более точного учета влияния НДС на отбиваемые слои руды в камере не изучался. Помимо этого, исследуемые в работе параметры разрушения массива выполняются для горно-геологических условий, отличающихся от Кривбасса.

А именно, для урановых руд, которые залегают в альбититах с прочностью 120–180 МПа и неявным разделением массива руды и породы.

Выделение нерешенной проблемы. После выполнения теоретических исследований, проведенных с помощью термодинамического метода, появилась необходимость проверки в лабораторных условиях устойчивости обнажений очистными камерами в зависимости от их формы, длины и высоты отбиваемых слоев массива [2].

Формулирование цели работы. Опираясь на результаты сравнительного анализа методов физического моделирования, был определен наиболее целесообразный метод лабораторных исследований, которым является моделирование на эквивалентных материалах. Метод физического моделирования на эквивалентных материалах, разработанный в 1936–1937 гг. во ВНИМИ Л.Н. Кузнецовым, получил дальнейшее развитие в ИГД им. А.А. Скочинского в работах А.М. Ильштейна. Этот метод выступает одним из наиболее доступных и хорошо зарекомендовавших себя и определен нами как наиболее эффективный для решения поставленных задач [1–2]. Целью физического моделирования на эквивалентных материалах являлось воспроизведение на моделях процесса, происходящего в натуральных условиях. Физическое моделирование открывает возможности качественного изучения процессов разрушения, которых не дают аналитические и натурные методы исследования. В то же время на моделях невозможно воспроизвести все детали моделируемых объектов, поэтому моделирование позволяет вести изучение процессов с определенной степенью упрощения и схематизации натуральных объектов, что существенно облегчает интерпретацию результатов промышленных наблюдений и измерений, позволяя с большей степенью обобщения проследить и уточнить механизм процессов, максимально полно изучить влияние на эти процессы действующих факторов.

Изложение основного материала. Одним из преимуществ метода моделирования на эквивалентных материалах является возможность измерения показателей, отражающих НДС массива в интересующих областях массива, которые в натуральных условиях осуществить практически невозможно ввиду труднодоступности участков обнажения массива очистных камер. При удовлетворении всем критериям подобия при моделировании на эквивалентных материалах: обеспечения геометрического подобия природы и модели; соответствия механических процессов и граничных условий, соблюдение граничных условий по торцам модели не представляется возможным. Однако, в силу известного принципа Сен-Венана, можно утверждать, что роль торцов становится заведомо малой на расстояниях от них, равных толщине модели. Поэтому, при отработке моделей, замеры величин смещений кровли и боков моделируемого очистного пространства являлись достоверными. Условия подобия соблюдали путем соответствия равенств:

– для внешних нагрузок, кН

$$P_M = \frac{\gamma_M l_M^3}{\gamma_H l_H^3} P_H,$$

где γ_H, γ_M – объемная масса материала натуре и модели соответственно;

– для процессов деформирования, кН

$$R_{сж.м} = \frac{l_M \gamma_M}{l_H \gamma_H} R_{сж.н};$$

$$R_{р.м} = \frac{l_M \gamma_M}{l_H \gamma_H} R_{р.н}.$$

Для соблюдения подобия упругих деформаций в массиве горных пород выполняли следующие условия

$$E_M = \frac{\gamma_M l_M}{\gamma_H l_H} E_H;$$

$$\nu_M = \nu_H,$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона.

Для соблюдения подобия пластической деформации массива пород выполняли следующее условие

$$\frac{\varepsilon_{п.м}}{(\varepsilon_y + \varepsilon_n)_м} = \frac{\varepsilon_{п.н}}{(\varepsilon_y + \varepsilon_n)_н}.$$

При этом

$$(\varepsilon_y + \varepsilon_n) = f(\sigma),$$

где ε_n и ε_y – пластическая и упругая относительные деформации.

Методика проведения моделирования включала следующие этапы:

1. Подбор эквивалентного материала, который соответствует альбититам.
2. Определение физико-механических свойств материала.
3. Приготовление полного объема материала и формирование модели на стенде.
4. Формирование, пригрузка модели и образование очистного пространства.
5. Фотофиксация деформаций в массиве модели.

Испытание эквивалентного материала начинали с проверки его на соответствие основным требованиям моделирования: количественное подобие физико-механических свойств эквивалентного и натурального материалов; качественное соответствие характера деформации эквивалентного и натурального материалов; технологичность в качестве и скорости изготовления эквивалентного материала; однородность, прочность и способность деформироваться материала по всему объему модели; постоянство свойств готового материала при изменении условий окружающей среды и в течение времени; доступность и дешевизна составляющих компонентов эквивалентного материала.

Подбор и испытания эквивалентного материала для изготовления моделей выполняли с целью изыскания составов смесей, которые не обладали бы длительными сроками схватывания и твердения, а по своим физико-механическим свойствам обеспечива-

ли бы подобие с моделируемыми горными породами. При этом безразмерные константы – коэффициенты Пуассона и углы внутреннего трения – должны численно совпадать в эквивалентном материале и горных породах в натуре [2].

Подбор состава эквивалентного материала является одним из основных вопросов физического моделирования. Широкий спектр физико-механических свойств горных пород, которые исследовались при аналитическом моделировании, весьма тяжело воспроизвести в лабораторных условиях. Поэтому моделирование производилось на эквивалентном материале № 7, свойства которого максимально приближались к урановым рудам – альбититовым. В состав эквивалентного материала №7 входят: кварцевый песок – 45%, молотый гранит – 35%, измельченная слюда – 10% и парафин – 10%. Результаты испытаний, принятого к моделированию материала, приведены в таблице.

Таблица

Основные физико-механические параметры натуре и эквивалентного материала №7

Характеристика материала	Натура	Коэф. подобия	Модель
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	13 – 18	0,046 – 0,044	0,6 – 0,8
Модуль Юнга, E , МПа	$3,22 \cdot 10^5$	0,013 – 0,0093	$0,042 – 0,03 \cdot 10^5$
Объемный вес, γ , т./м ³	2,6	0,62 – 0,73	1,6 – 1,9
Коэф. Пуассона, μ	0,33	1	0,33

При построении зависимости процесса деформирования эквивалентного материала принимались средние значения деформации материала (U) в серии опытов (рис. 1).

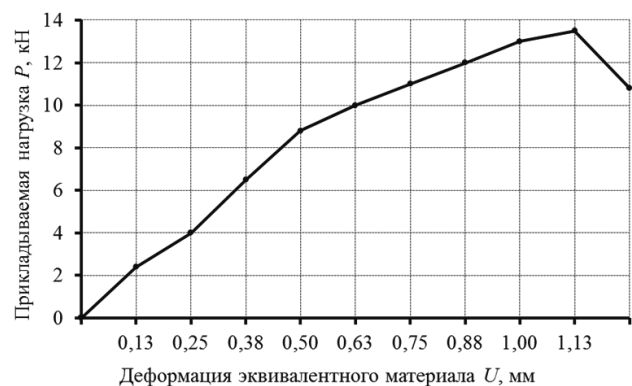


Рис. 1. Характер деформации эквивалентного материала при увеличении внешней нагрузки

Подбор материала производили путем определения его предела прочности на сжатие, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Определение физико-механических свойств материала выполняли по образцам, которые имели цилиндрическую форму с поперечным сечением 211 мм² и высотой 74 мм, с

помощью малогабаритного прессы. Пресс позволяет регистрировать соответствующие деформации и нагрузку на образцах. Он состоит из корпуса, штока, трех рабочих пластин, соединенных с индикаторами часового механизма ИЧ 10 МН. Характер деформации эквивалентного материала при увеличении внешней нагрузки имеет линейную зависимость. Для определения процесса деформирования эквивалентного материала принимались средние значения деформации материала в каждой серии опытов.

Приготовление эквивалентного материала выполняли в следующем порядке: кварцевый песок рассыпали тонким слоем и просушивали в течение 5–7 дней. С целью равномерной просушки, песок перемешивали несколько раз в сутки. Затем подготовленный таким образом песок просеивали через сито для удаления крупных фракций и мусора. Молотый гранит рассыпали тонким слоем и просушивали в течение 5 дней. Затем с помощью сита просушенный молотый гранит просеивали для удаления крупных фракций гранита. Слуду измельчали с помощью мельницы, а затем просеивали с помощью сита для получения необходимой фракции. Парафин натерли на терке и получали мелкоизмельченный парафин. Подготовленный кварцевый песок и молотый гранит смешивали и высыпали в сосуд. Затем измельченную слуду и мелко натертый парафин смешивали между собой. К полученной смеси добавляли смесь кварцевого песка и молотого гранита, тщательно перемешивали. Полученную смесь укладывали в металлические емкости с плотной крышкой и устанавливали на водяную баню. Смесь прогревали 3 дня по 4 часа, при этом каждые 40 минут перемешивали для равномерности нагревания.

Стенд физического моделирования состоит из: камеры размером 600×600 мм, прикрытой стенкой из оргстекла толщиной 30 мм; крепежных винтов и системы рычажных домкратов [3]. К верхней крышке крепили ребра жесткости, которые предохраняют от пучения оргстекла. Формирование модели осуществляли в рабочей камере стенда слоями толщиной до 5–10 см разогретого эквивалентного материала. Внутренняя поверхность рабочей камеры стенда перед формированием модели тщательно протирается графитовым порошком для уменьшения сил трения на контакте „эквивалентный материал – металл“. Затем привинчивается передняя прозрачная крышка стенда (рис. 2).

С целью создания монолитной модели производили закатку и вспушивание поверхности каждого укладываемого слоя. Уплотнение каждого слоя осуществляли с приложением статической нагрузки массой 200 Н. После полного формирования модели к ней в течение часа прикладывали нагрузку интенсивностью 0,2 МПа, что соответствует глубине заложения камеры, соответствующей 500 м. После снятия первоначальной нагрузки, отвинчивали стеклянную стенку стенда и на поверхности модели наносили прямоугольную мерную сетку с размером ячеек 20×20 мм. В центре или на фланге модели вырезали полость, моделирующую очистное пространство. Затем на каждой последующей модели производили увеличение горизонтального пролета камеры.

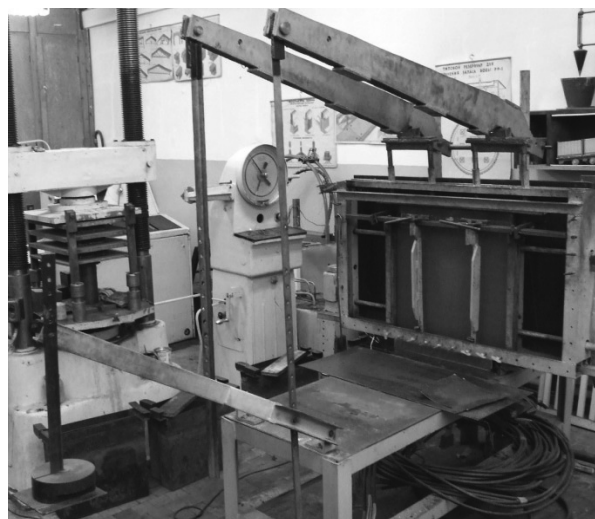


Рис. 2. Общий вид стенда физического моделирования на эквивалентных материалах

Геометрический масштаб моделирования был равным 1:250. В этом случае поперечное сечение очистного пространства имело максимальный размер 0,3 м. Влияние очистного пространства на окружающий массив носило локальный характер. Поэтому размер рабочей камеры исследовательского стенда может быть в пределах 0,6 × 0,6 × 0,03 м. При соблюдении граничных условий небольшой объем дает возможность сформировать и испытать за достаточно короткий срок большое число моделей при минимальном расходе материалов. При моделировании были исследованы очистные пространства при следующих этапах отработки запасов: при формировании отрезной щели, 15, 50 и 90% отработки запасов камеры соответственно. Этого достаточно для построения зависимостей деформаций массива по всем буровым горизонтам (рис. 3).

После очередного увеличения полости в эквивалентном материале устанавливаются передняя стенка стенда и ребра жесткости, а посредством домкратов массив нагружается. Нагрузка задавалась с интервалом в 700 Н каждые полчаса. Развивающиеся в массиве деформации контролировали по мерной сетке и регистрировали фотоаппаратом. Положение фотоаппарата было фиксированным на время всего эксперимента. Впоследствии, изучая при высоком (3–5-кратном) увеличении снимком, деформацию какого-либо выделенного элемента модели, как функцию внешней нагрузки (глубины) и размеров очистного пространства, строили соответствующую зависимость, качественно отражающую поведение массива модели вокруг очистной камеры.

Минимально необходимое количество испытаний каждого варианта модели определяли по формуле, шт.

$$n = t_{\alpha}^2 \left(\frac{\eta}{g} \right)^2,$$

где t_{α} – коэффициент Стьюдента; η – коэффициент вариации, %; g – допустимое отклонение, %.

Допустимое отклонение составляет 10%, тогда $t_{\alpha} = 1,64$. Достаточное количество испытаний для каж-

дого варианта составляет 2,69. Таким образом, учитывая высокую однородность эквивалентного материала, испытания каждого рассматриваемого варианта производили не менее 3 раз. Фактически, с учетом отладки процесса моделирования и числа продублированных вариантов, испытание одной и той же модели проводили 3–5 раз.

В шахтных условиях вертикальная или слабонаклонная плоскость вееров скважин пробурена в сторону отрезной щели. При этом линия очистного забоя имеет вертикальный почвоуступный вид [4, 5]. На модели смоделировать веера скважин не представляется возможным из-за весьма мелкого масштаба. На предприятии опережение верхнего подэтажа над нижним допускается на расстоянии не более 12 м, что дает возможность эффективно производить дробление и сброс в камеру отбитой горной массы.

Для того, чтобы приблизить к реальным условиям геометрию камеры, опережение верхнего подэтажа над нижним старались отстроить максимально приближенным. К тому же уступное расположение буровых штреков уменьшает эффект отслоения и отшелушивания массива руды в очистной камере.

Каждый взрыв проверялся согласно единых правил безопасности и требований комбината: не более 2–3 т. взрывчатого вещества (ВВ) на один массовый взрыв (проект подготовки и отработки очистной камеры) [6]. Каждый массовый взрыв индивидуальный и зависит от множества факторов: уровня подготовки камеры к взрыву; степени выпуска руды из камеры; взрывов смежных камер и др. Учитывая эти условия, принимаем усредненный вариант начальной стадии отработки очистной камеры (2–3 массовых взрыва) и получали второй этап моделирования (рис. 3, б).

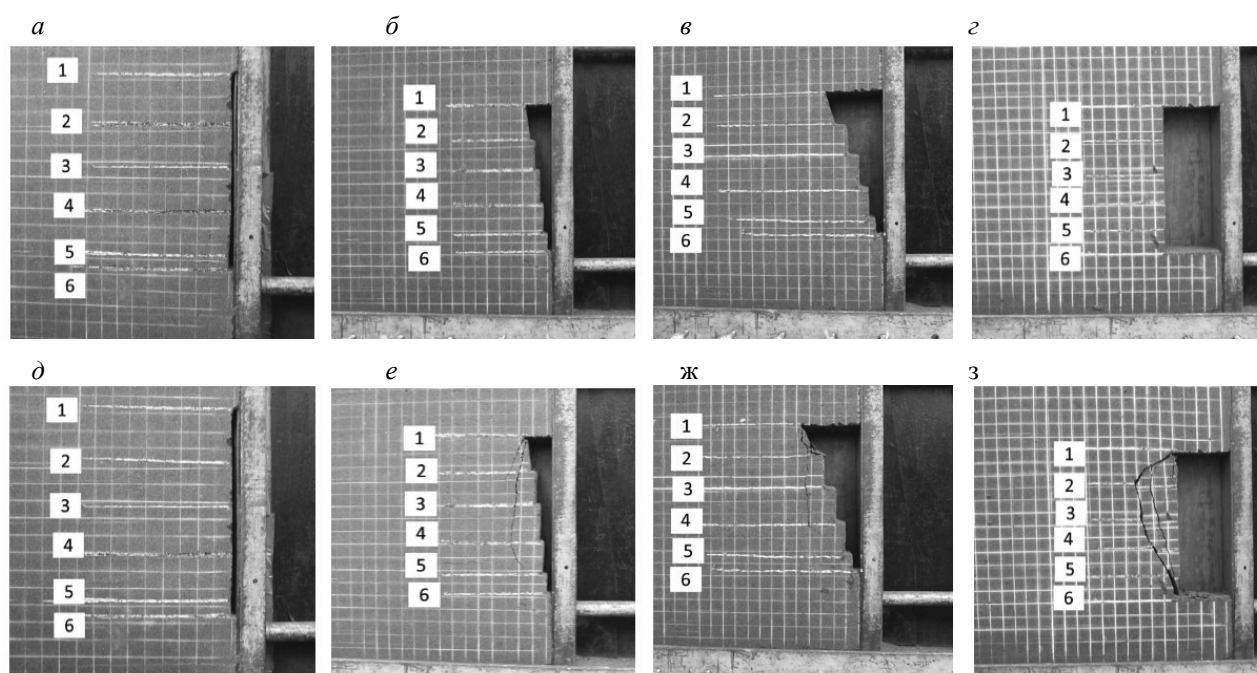


Рис. 3. Подготовленный (а–г) и разрушенный (д–з) массив модели по стадиям отработки запасов камеры: а), д) – отрезная щель; б), е) – 30%; в), ж) – 80%; г), з) – 100% от проектных размеров камеры соответственно

Области упругих деформаций, которые расположены в пределах очистной камеры по простиранию залежи на буровых горизонтах № 2, 3, 4, 5, достигают своих максимальных величин на буровых горизонтах № 2 и 3 – 28 мм, что соответствует 8,5 м согласно масштабу 1:250. Области упругих деформаций берут начало с нижнего бурового горизонта № 5, при 12 мм максимально увеличивают свои значения, на буровых горизонтах № 3 и 2 уходят в кровлю камеры на горизонте № 1. Форма областей упругих деформации – эллипсоидная.

После расширения отрезной выработки восстающего начинается подготовка и выполнение следующего массового взрыва с учетом коэффициента разрыхления и дальнейшей возможности выпуска руды из очистного пространства. Этот этап массового взрыва смоделирован с максимально допустимым

опережением верхнего подэтажа над нижним (рис. 3, в). Области упругих деформаций, расположенные в пределах влияния очистного пространства по простиранию залежи на буровых горизонтах № 2, 3, 4, 5, достигают своих максимальных величин на буровых горизонтах № 4, 3 – 32 мм, что соответствует в натуре 9,6 м согласно масштабу 1:250.

После завершения массовых взрывов, когда камеры очистной камеры достигают проектных размеров, приступают к возведению перемычек на буровых горизонтах, после чего заполняют камеру твердеющей смесью. Моделируя эту стадию отработки камеры, в которой явно прослеживается отслоение и отшелушивание вмещающих пород, производят возведение предохранительных и улавливающих перемычек. Этот этап представлен на рис. 3, г.

Области упругих деформаций, расположенные вне очистной камеры по простиранию залежи на уровне буровых горизонтов № 2, 3, 4 и 5, достигают своих максимальных величин на буровых горизонтах 4, 3 и 2 – 33 мм, что соответствует в натуре 9,9 м. Области упругих деформаций берут начало с уровня 5-го бурового горизонта с 12 мм, максимально увеличивая свое значение на буровых горизонтах № 3 и 4, уходя в кровлю камеры на горизонте № 1. Области деформаций, расположенные по простиранию залежи, увеличиваются с 10 до 32 мм. Характер увеличения областей деформаций в массиве, окружающем массив очистного пространства с увеличением размеров, можно наблюдать по развитию системы трещин (отслоений) на рис. 3.

Обработав фотографические данные лабораторных исследований, были получены зависимости развития нарушений массива модели в зависимости от длины камеры. Нарушения на модели увеличиваются с увеличением ширины камеры, что описывается степенными уравнениями для каждого бурового горизонта. На графике видно, что нарушения интенсивно увеличиваются после 60% отработки запасов камеры и отчетливо проявляются на 2, 3 и 4 буровых горизонтах.

После проведения аппроксимации значений упругих деформаций, при помощи программы Microsoft Excel, получены эмпирические уравнения зависимости величины деформации U от размеров очистной камеры $h_{\text{от}}$ и развития очистных работ по простиранию залежи l_k (рис. 4).

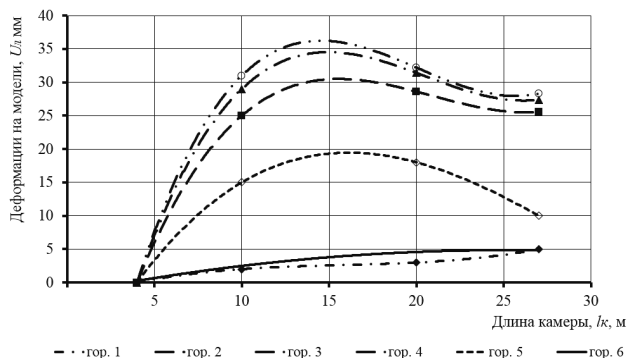


Рис. 4. Зависимости глубины разрушения (U) массива модели от длины очистной камеры

По действующим упругим деформациям в массиве модели, окружающем очистную камеру, происходит отслоение слоев руды. Для каждого бурового горизонта на определенной стадии развития параметры БВР различны, что и отображают эмпирические зависимости по результатам лабораторных исследований. Эмпирические зависимости, полученные с помощью программы Microsoft Excel, для каждого бурового горизонта, мм:

– № 1

$$U = 0,00003l_k^3 - 0,0047l_k^2 + 0,2677l_k - 2,8039;$$

– № 2

$$U = 0,0002l_k^3 - 0,0469l_k^2 + 3,0487l_k - 32,845;$$

– № 3

$$U = 0,0003l_k^3 - 0,0577l_k^2 + 3,6548l_k - 39,142;$$

– № 4

$$U = 0,0003l_k^3 - 0,0651l_k^2 + 4,025l_k - 42,869;$$

– № 5

$$U = 0,00006l_k^3 - 0,0194l_k^2 + 1,5472l_k - 17,33;$$

– № 6

$$U = 0,00003l_k^3 - 0,0056l_k^2 + 0,3587l_k - 3,8608.$$

Полученные эмпирические зависимости для буровых горизонтов 1 и 6 указывают на то, что они минимальным образом подвергнуты влиянию очистной камеры, и, если подставить l_k в диапазоне от 0 до 55 м, мы получим выражение, стремящееся к нулю. Максимальное влияние очистного пространства относится к буровым горизонтам № 2, 3 и 4 после формирования и расширения отрезной восстающей выработки. При моделировании на эквивалентных материалах показано влияние очистного пространства на деформирование массива модели в виде степенной зависимости. Общий вид уравнения имеет вид

$$U = alk^3 - blk^2 + clk - d, R^2 = 0,98\%.$$

Выводы. В результате выполнения лабораторных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Размеры областей упругих деформаций массива вокруг очистного пространства при моделировании показали зависимость от глубины заложения H , размеров очистной камеры $h_{\text{от}}$ и степени развития очистных работ по простиранию залежи l_k . Главным образом, на развитие областей упругих деформаций влияют размеры очистного пространства $h_{\text{от}}$ и степень развития очистных работ по простиранию залежи l_k .

2. Результаты моделирования областей упругих деформации U , в окружающем очистное пространство массиве с фиксированными глубиной заложения камеры H и высотой очистной камеры $h_{\text{от}}$, а также переменной длиной камеры по простиранию l_k , описываются степенными зависимостями. Полученные зависимости показывают, что с увеличением очистного пространства камеры области упругих деформаций на буровых горизонтах изменяются по степенной зависимости, которая имеет общий вид $U(H, h_{\text{от}} = \text{const}) = al_k^3 - bl_k^2 + cl_k - d$.

Список литературы / References

1. Геомеханика. Т. 2. Геомеханические процессы: учебник / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, А.Н. Шашенко, В.Н. Борисов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 249 с.
Baklashov, I.V., Kartoziya, B.A., Shashenko, A.N. and Borisov, V.N. (2004), *Geomekhanicheskiye protsessy* [Geomechanics. Geomechanical Processes], Manual, Moscow State University Press, Moscow, Russia.
2. Шашенко О.М. Механіка гірських порід / Шашенко О.М. – Дніпропетровськ: НГА України, 2002. – 302 с.
Shashenko, O.M. (2002), *Mekhanika hirs'kykh porid* [Mechanics of Rocks], NМУ, Dnipropetrovsk, Ukraine.
3. Хоменко О.Е. Моделирование на эквивалентных материалах выработанного пространства рудных шахт [Текст] / О.Е. Хоменко, В.В. Русских, М.Н. Ко-

ноненко // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2004. – №8. – С. 23–25.

Khomenko, O.Ye., Russkikh, V.V. and Kononenko, M.M. (2004), "Modeling on equivalent materials of mined out spaces of ore mines", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.8, pp. 23–25.

4. Хоменко О.Є. К обоснованию рациональной технологии буровзрывных работ в условиях шахт ГП „ВостГОК“ [Текст] / О.Є. Хоменко, Д.В. Мальцев // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2005. – №10. – С. 3–6.

Khomenko, O.Ye. and Maltsev, D.V. (2005), "On substantiation of the rational technology of blasting in mines of State Enterprise "VostGok", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.10, pp. 3–6.

5. Хоменко О.Є. Технология буровзрывных работ в условиях Ватутинского урановорудного месторождения [Текст] / О.Є. Хоменко, Д.В. Мальцев // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2007. – №1. – С. 13–16.

Khomenko, O.Ye. and Maltsev, D.V. (2007), "Drilling and blasting operations technology in Vatutinsky uranium ore deposit", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.1, pp. 13–16.

6. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом; 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 223 с.

Yedinye pravila bezopasnosti pri razrabotke rudnykh, nerudnykh i rossypnykh mestorozhdeniy podzemnym sposobom (1977), [Common Safety Rules for Underground Mining of Metallic and Non-Metallic Deposits and Placers], Nedra, Moscow, Russia.

Мета. Отримати залежності величин руйнування масиву уранового покладу від розмірів очисної камери за допомогою методу лабораторного моделювання на матеріалах, які еквівалентні урановим рудам, що залягають в альбітитах.

Методика. Представлено методику проведення лабораторних досліджень на матеріалах, еквівалентних за своїми властивостями альбітитах, що включала підбір еквівалентного матеріалу, визначення його фізико-механічних властивостей, приготування його повного об'єму й формування моделі на стенді, її пригрузка та утворення очисного простору, а також фотофіксація деформацій у масиві. Викладено порядок визначення критеріїв подібності лабораторної моделі та натурального об'єкту.

Результати. Виконано аналіз енерговитрат при видобутку уранових руд в Україні, що показав необхідність їх зниження. Обґрунтовано вибір методу моделювання на еквівалентних матеріалах. Розроблено методику проведення лабораторних експериментів. Наведено результати чисельної оцінки процесу руйнування масиву при поетапному збільшенні розмірів очисного простору камери при моделюванні процесу відбійки шарів руди. Встановлено математичні залежності розвитку руйнувань у масиві моделі для буров-

вих підповерхів, з яких відпрацьовують поклад уранової руди.

Наукова новизна. Полягає у виявленні закономірностей руйнування рудного масиву на шари руди, що відбиваються, залежно від довжини очисного простору камер при відпрацюванні уранових покладів України.

Практична значимість. Підтвердження характеру кубічних залежностей, отриманих за результатами теоретичних досліджень за допомогою термодинамічного методу, і натурних – методом маркшейдерських зйомок. Перевірка збіжності результатів, отриманих у лабораторних умовах, з теоретичними та натурними дослідженнями виявилася досить високою.

Ключові слова: видобуток уранової руди, гірничий тиск, фізичне моделювання, еквівалентні матеріали, критерії подібності, закономірності руйнування масиву

Purpose. To determine the dependence of uranium deposit massif destruction on the dimensions of face area using the laboratory modeling on the materials which are equivalent to uranium ores occurring in albitites.

Methodology. The represented methodology of laboratory studies of face area on the materials, equivalent to albitites includes: selection of an equivalent material, testing of physical and mechanical properties of the material, preparing the full volume of equivalent material and forming of the model on the stand, loading of the model and formation of the face area, photofixation of deformation occurred in the massif model. The way of determination of the similarity of laboratory model and the real object has shown.

Findings. Power consumption for the extraction of uranium ore in Ukraine has been analyzed. The method of modeling on equivalent materials has been substantiated. The methodology for laboratory experiments has been developed. Results of the numeric evaluation of the massif destruction by gradual enlarging of the face area of the stope during simulation of the process of breaking of ore layers have been obtained. The mathematical relations of destruction progress in the massif model have been determined for drilling substages where the uranium ore have been mined.

Originality. We have defined regularities of the massif destruction depending on the length of the face area of stope for development of uranium deposits in Ukraine.

Practical value. We have verified the correlation of dependences obtained by theoretical research by energy method and full-sized studies made by mine surveying method. The verification of the results showed high level of precision.

Keywords: uranium ore mining, rock pressure, physical modeling, equivalent materials, similarity criteria, mechanisms of massif destruction

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Д.В. Рудаковим. Дата надходження рукопису 27.11.12.