

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ОЧИСТНОГО ПРОСТРАНСТВА НА НДС МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ КАМЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ РАЗРАБОТКИ В КРЕПКИХ ПОРОДАХ

Изложена методика проведения лабораторных исследований с помощью эквивалентных материалов. Приведены результаты разрушения массива в камере. Сделаны выводы по полученным результатам лабораторных исследований и возможность его применения как косвенного способа определения НДС массива.

Викладена методика проведення лабораторних досліджень за допомогою еквівалентних матеріалів. Наведені результати руйнування масиву в камері. Зроблені висновки за отриманими результатами лабораторних досліджень та можливість його застосування як не прямого способу визначення НДС масиву.

The method of laboratory research using equivalent materials is presented. The results of the destruction of the rock mass in chamber are shown. Base on the findings of the laboratory tests, conclusions are drawn about the possibility of its usage to calculate strain-stress distribution.

**Актуальность.** Добыча руд (железных и урановых) подземным способом на шахтах Украины благополучно осуществляется посредством камерных систем разработки. При этом только урановые руды залегают в крепких породах. На текущий момент детально разведано 12 урановых эндогенных месторождений, которые образуют Восточную, Центральную и Северо-Западную рудоносные зоны, каждая из которых представляет собой серию рудных залежей [1]. Но разрабатываются только три месторождения: Ватугинское, Новоконстантиновское и Центральное. Крепость руд и вмещающих пород здесь колеблется довольно в широких пределах: от 120 до 180 Мпа на одноосное сжатие с плотностью 2,65 – 2,67 г/см<sup>3</sup>. Отработку рудных залежей производят при помощи камерных систем разработки с закладкой пустот твердеющими смесями. Для исследуемого Ватугинского месторождения (ш. «Смолинская») спроектирована и реализуется камерная система разработки подэтажными ортами и штреками с поочередной отработкой блоков по простиранию залежи и заполнением очистного пространства твердеющей смесью [1]. На ее основе и будут выполнены лабораторные исследования влияния размеров очистного пространства на напряженно-деформированное состояние (НДС) окружающего массива. Как известно, увеличение глубины разработки приводит к изменению влияния НДС на ведение очистных работ и, как следствие, изменение объемов вторичного дробления, взрывчатых веществ (ВВ), средств инициирования зарядов и др. В результате этого становится актуальным прогноз ведения очистных работ в таких условиях. На помощь приходит моделирование на эквивалентных материалах. Наряду с этим, изменение параметров разрушения горного массива с учетом НДС может обосновано снизить затраты на буровзрывные работы (БВР). Таким образом, лабораторные исследования влияния размеров очистного пространства с учетом НДС массива имеет актуальное научное значение.

**Объектом исследования** является методика проведения лабораторного исследования влияния размеров очистного пространства на изменение НДС окружающего массива.

**Цель исследования** проведение лабораторного моделирования изменения состояния НДС окружающего камеру массива на эквивалентных материалах для камерных систем разработки в крепких породах.

**Изложение результатов.** Можно выделить несколько основных методов физического моделирования, которые применимы для описанных типов руд – центробежного моделирования, оптический метод и на эквивалентных материалах. Сравнительный анализ этих методов поспособствовал выделению последнего, являющегося наиболее доступным и не менее эффективным. Основная сложность во время его применения – подбор эквивалентного материала в соответствии с основными физико-механическими свойствами исследуемых пород. Однако именно это и позволит провести более достоверные лабораторные исследования.

Физическое моделирование на эквивалентных материалах широко применяется для исследования горного давления в очистных и подготовительных выработках при подземной разработке месторождений, для изучения вопросов пучения пород и сдвижения массивов, а также других физических процессов протекающих в массиве пород [2, 3]. Сущность метода заключается в том, что на моделях, при соблюдении условий подобия, изучаются физические процессы, а результаты исследований используются для разработки теории процесса. В его основе лежит теория механического подобия Ньютона, которая описывает геометрическое, кинематическое и динамическое подобия. При этом существует возможность измерения показаний, отражающих напряженно-деформированное состояние массива горных пород в интересующих областях, которые в натуральных условиях выполнить практически невозможно ввиду труднодоступности участков массива. Соблюдая геометрическое подобие и граничные условия появляется возможность сформировать и испытать, за достаточно короткий срок, большое число моделей. Недостаток метода – достаточно высокая стоимость эквивалентного материала и трудоемкость его приготовления.

Очистные работы в условиях предприятия осуществляются в три этапа: подсечка и отрезка запасов камеры, очистная выемка. Они предусматривают отработку запасов в две очереди (камеры первой и второй очереди) с отработкой в нисходящем порядке, где прием отбитой горной массы производится на нижележащем горизонте. Очистные работы в камерах начинаются с образования подсечки камеры и формирования отрезной щели на всю её высоту. Подсечка камеры и отрезная щель осуществляется из нижних выработок путем взрывания восходящих вееров скважин.

Выполнение моделирования на эквивалентных материалах предлагается выполнить для основных стадий отработки камерных запасов, при этом степень отработки камеры характеризует такую стадию отработки, которая бы максимально была приближена к реальным условиям. Учитывая это, сформируем методику проведения физического моделирования для определения напряжений

вокруг очистных камер: подбор, приготовление и испытание эквивалентного материала; формирование модели; нагружение модели; проведение экспериментов.

Для испытания эквивалентного материала выполняется проверка 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 материала деформироваться по всему объему модели; постоянство свойств готового материала при изменении условий окружающей среды и течения времени; доступность составляющих компонентов эквивалентного материала.

Итак, примем геометрический масштаб моделирования равным 1:250. В этом случае максимальный размер поперечного сечения выработанного пространства будет достигать 30 см. Предполагаем, что влияние выработанного пространства на окружающий массив будет иметь локальный характер, поскольку это расстояние равно 4 – 5 радиусам напряжения, а размер рабочей камеры плоского исследовательского стенда составляет  $0,6 \times 0,6 \times 0,03$  м. При условии удовлетворения всех критериев подобия для эквивалентных материалов и обеспечении геометрического подобия натуры и модели совпадение механических процессов можно приступать к моделированию. Соблюдение же граничных условий по торцам модели не представляется возможным, однако в силу известного принципа Сен-Венана можно утверждать, что роль торцов становится заведомо малой поскольку расстояние от них соотносится с толщиной модели. Поэтому замеры величин смещений кровли и боков будут достоверными.

Следующим этапом является подбор и испытание эквивалентного материала для модели, который не обладал бы длительным сроком схватывания и твердения, а по своим физико-механическим свойствам обеспечивал бы подобие с горными породами. При этом безразмерные константы – коэффициенты Пуассона и углы внутреннего трения – должны численно совпадать в эквивалентном материале и натуральных горных породах [3]. Подбор эквивалентного материала производим путем определения его предела прочности на сжатие, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Определение физико-механических свойств материала выполняем по образцам, которые имеют цилиндрическую форму с поперечным сечением  $211 \text{ мм}^2$  и высотой 74 мм, с помощью малогабаритного пресса, который бы позволял регистрировать соответствующую деформацию и фиксировать нагрузку на образцы. Широкий спектр физико-механических свойств горных пород, весьма тяжело воспроизвести в лабораторных условиях. Поэтому моделирование производится на эквивалентном материале №7, свойства которого максимально приближаются к гранитовым рудам (магматитовым, альбититовым). В состав эквивалентного материала №7 входят: кварцевый песок – 30 %, молотый гранит – 35 %, чугунная стружка – 15 %, измельченная слюда – 10 % и парафин – 10 %. При исследовании такого

материала выявлено, что характер его деформации, при увеличении внешней нагрузки, имеет линейную зависимость, поэтому для определения процесса его деформирования принимается среднее значения в серии.

Приготовление эквивалентного материала выполняется в следующем порядке: кварцевый песок рассыпается тонким слоем и высушивается в течение 5 – 6 дней. С целью равномерной просушки песок мешается несколько раз в сутки. Затем полученный песок просеивается через сито для удаления крупных фракций и мусора. Параллельно измельчается гранит и рассыпается тонким слоем для подобного просушивания в течении 5 – 8 дней. Затем, аналогично, с помощью сита, просеивается для удаления крупных фракций. Далее подготавливается чугунная стружка путем его истирания на наждачном станке и просеиванием через сито для удаления крупных частиц. Затем подготавливается слюда путем измельчения ее с помощью мельницы и просеивания на сите для получения необходимой фракции. Натирается парафин до максимально мелкой возможной фракции. Подготовленный кварцевый песок и молотый гранит смешиваются между собой и высыпаются в сосуд. Затем чугунная стружка, измельченная слюда и парафин смешиваются между собой. Далее к полученной смеси добавляется смесь кварцевого песка и молотого гранита, все тщательно перемешивается. Полученная материал укладывается в металлическую емкость с плотной крышкой и ставится на водяную баню. Смесь прогревается 3 дня по 4 часа, при этом каждые 40 мин перемешивается для равномерности нагревания. Полученный эквивалентный материал проверяется на соответствие основным характеристикам прочности, то есть временному сопротивлению пород на сжатие  $R_{сж}$  и растяжение  $R_p$ . После чего можно приступать к моделированию, которое производится на стенде моделирования горного давления (рис. 1).

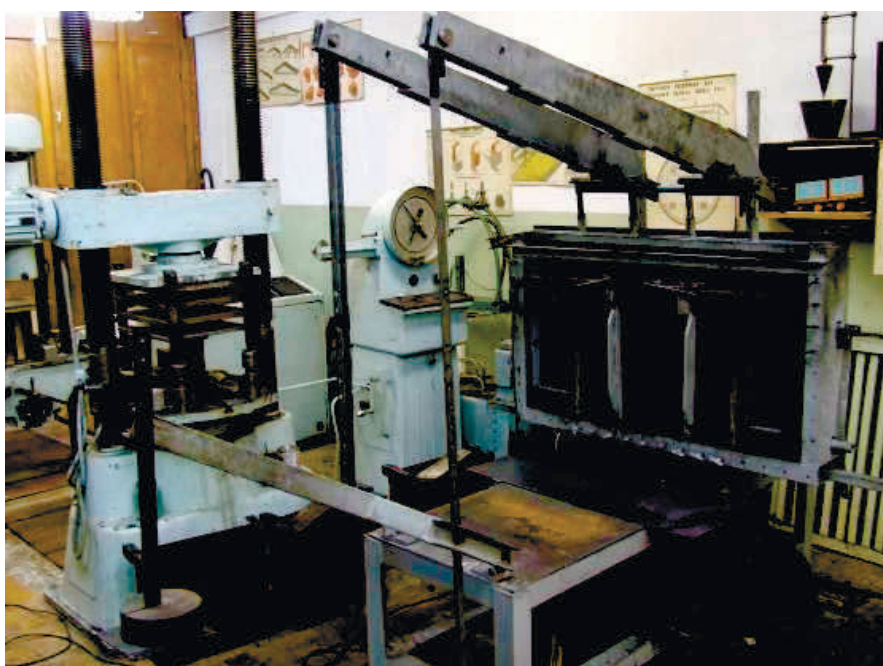


Рис. 1. Общий вид стенда для моделирования на эквивалентных материалах

Как было сказано ранее стенд имеет размеры 600×600×30 мм, прикрытой толстой 30-ти миллиметровой прозрачной стенкой из оргстекла с одной стороны и металлическим листом – с другой; крепежных винтов и системы рычажных домкратов. К верхней крышке крепятся ребра жесткости, предохраняющие выпучивание оргстекла.

Формирование модели осуществляется в рабочей камере стенда слоями толщиной до 5 – 10 мм 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 крепится передняя крышка стенда из оргстекла. К верхней кромке крышки крепится ребро жесткости для предотвращения ее выпучивания. С целью создания монолитной модели производится закатка каждого слоя с последующим мелким вспушиванием поверхности для лучшего контакта между ними. Уплотнение каждого слоя осуществляется посредством приложения статической нагрузки массой 200 Н. После полного формирования модели к ней в течение часа прикладывается нагрузка интенсивностью 0,2 МПа, что соответствует глубине заложения камеры 500 – 600 м. После снятия первоначальной нагрузки отвинчивается прозрачная стенка стенда и на поверхности модели наносится прямоугольная мерная сетка 20×20 мм. В центре модели вырезается полость, которая моделирует очистную камеру. Затем на каждой последующей модели производится увеличение горизонтального размера камеры по описанной технологии. После очередного увеличения размера камеры в эквивалентном материале устанавливаются передняя съемная стенка, ребра жесткости и посредством домкратов массив нагружается. Нагрузка наращивается по 700 Н каждые 30 минут и на протяжении всего времени проведения эксперимента идет регистрация фотоаппаратом, находящийся в фиксированном положении. Впоследствии, по результатам смещения сетки, строится соответствующая зависимость, которая качественно и количественно должна отражать изменения НДС массива в окрестности очистной камеры. Поскольку данное моделирование выполняется без дополнительных датчиков, определяющих напряженное состояние в конкретных точках, будут учитываться деформации модели как основной результат. После соответствующих подготовительных работ поэтапно проводится моделирование.

Сначала, следуя технологии, эксперимент проводится на ранней стадии формирования очистной камеры – отрезной щели (рис. 2). На рис. 2 (1) видно, что влияние отрезной щели на прилегающее пространство камеры не значительно для всех буровых горизонтов. В производственных условиях, одновременно с образованием отрезной щели и подсечки в блоке, выполняется разбуривание камеры. Отрезная щель формируется снизу-вверх путем последовательного взрывания параллельных скважин на отрезной восстающей. Подсечка в блоке ведется из штрека вторичного дробления и нижнего бурового горизонта посредством взрывания восходящих вееров глубоких скважин. На модели подсечка и веер скважин не вырезаются из-за сложности исполнения и сомнительной целесообразности показывать и учитывать это. После образования отрез-

ной щели производится отбойка запасов руды посредством взрывания вееров восходящих скважин или штанговых шпуров, пробуренных из подэтажных штреков. В шахтных условиях плоскость вееров скважин и поверхность очистного забоя сохраняются вертикальными что и перенесено на модель. Опережение отработки верхнего бурового горизонта над нижним – допускается до 12 м, что дает возможность эффективно производить дробление и сброс отбитой горной массы. Поэтому переносим этот параметр на модель с таким же значением. Зная, что каждый массовый взрыв регулируется едиными правилами безопасности, внутренними требованиями предприятия, коэффициентами разрыхления пород и иными параметрами мы учитываем это и получаем второй этап для моделирования (рис. 2 (2)). Из него видно, что области деформаций, расположены в пределах очистной камеры и сконцентрированы на уровне 2 – 5 буровых горизонтов. Где области деформаций достигают своих максимальных значений на уровне 2 и 3 буровых горизонтов – 28 мм (8,5 м в натуре). Области упругих деформаций начинают формироваться с 5-го бурового горизонта от 12 мм и максимально увеличивая свое значение на 3 и 2, уходят в кровлю камеры и затухают, формируя, со смещением вниз, эллипсоидные очертания упругих деформации.

Далее, в условиях предприятия, после расширения отрезного восстающего, начинается подготовка и проведение следующего массового взрыва, где учитывается коэффициент разрыхления и возможности выпуска руды. Этот этап смоделирован и показан на рис. 2 (3). С него видно, что в окрестности 2 – 5 буровых горизонтов уже более явно прослеживаются деформации, которые достигают своих максимальных значений на уровне 3 и 4 буровых горизонтов – 32 мм (9,6 м в натуре). Характер распространения деформаций повторяет рис. 2 (2) наращивая отслоения и сохраняя эллипсоидную форму, но со смещением вниз.

После завершения очистных работ, когда размеры камеры достигают проектных размеров, технология отработки предполагает возведение заградительных перемычек во избежание попадания закладочной смеси в выработки, приступают к закладочным работам. Во время моделирования этой стадии более явно видны отслоения и отшелушивание материала модели (рис. 2 (4)). Здесь деформации распространяются уже за пределы очистной камеры по всей ее высоте достигая 33 мм (9,9 м в натуре) с сохранением характера эллипсоидной формы с легким смещением вверх от горизонтального центра камеры. Эта стадия моделирования не пригодна для определения разрушений в камере, поскольку мы видим разрушения за ее пределами, но она позволяет более точно построить зависимость их развития.

Кратко подытожив полученные результаты можно сказать, что деформации распространяются в плоскости залежи на всю мощность модели и достигают 32 мм формируя эллипсоидную форму с последовательным смещением вверх и вниз от горизонтального центра камеры. Поскольку по полученным изображениям можно определить только смещения, то именно по ним и будет выполнен анализ и построение соответствующего графика (рис. 3). После его построения и по-

лучения конкретных уравнений зависимостей величины деформации  $U$  можно провести анализ влияния на НДС массива. Уравнения изменения величины деформации для каждого бурового горизонта представлены ниже.

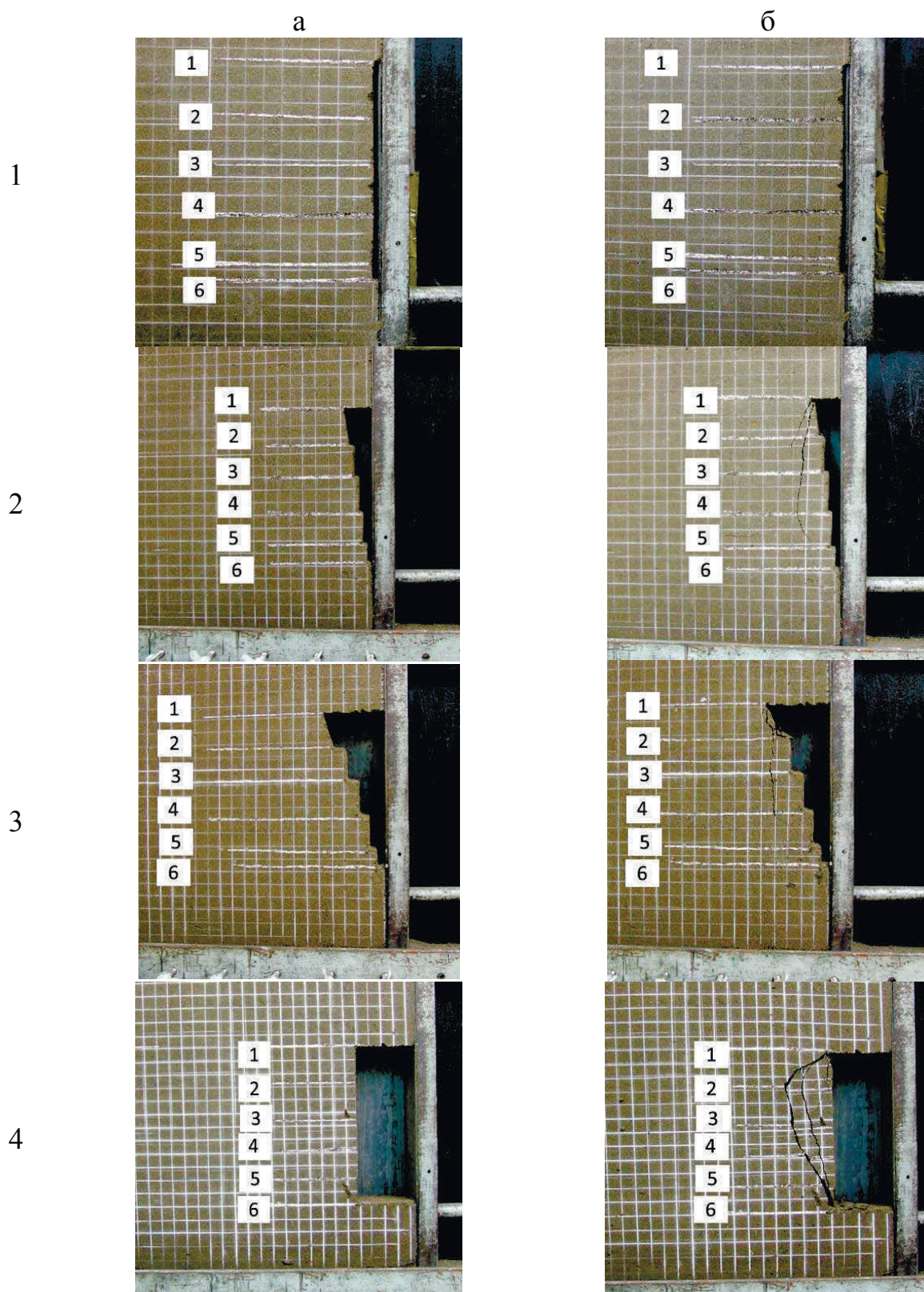


Рис. 2. Массив модели вокруг камеры до (а) и после нагружения (б) модели

Горизонт 1

$$U_1 = 0,00003l_k^3 - 0,0047l_k^2 + 0,2677l_k - 2,8039, \text{ мм, при } R^2 = 99 \%$$

Горизонт 2

$$U_2 = 0,0002l_k^3 - 0,0469l_k^2 + 3,0487l_k - 32,845, \text{ мм, при } R^2 = 99 \%$$

Горизонт 3

$$U_3 = 0,0003l_k^3 - 0,0577l_k^2 + 3,6548l_k - 39,142, \text{ мм, при } R^2 = 99 \%$$

Горизонт 4

$$U_4 = 0,0003l_k^3 - 0,0651l_k^2 + 4,025l_k - 42,869, \text{ мм, при } R^2 = 99 \%$$

Горизонт 5

$$U_5 = 0,00006l_k^3 - 0,0194l_k^2 + 1,5472l_k - 17,33, \text{ мм, при } R^2 = 99 \%$$

Горизонт 6

$$U_6 = 0,00003l_k^3 - 0,0056l_k^2 + 0,3587l_k - 3,8608, \text{ мм, при } R^2 = 99 \%$$

Обобщив уравнения распределения упругих деформаций по каждому горизонту получим вид:  $U = al_k^3 - bl_k^2 + cl_k - d$ .

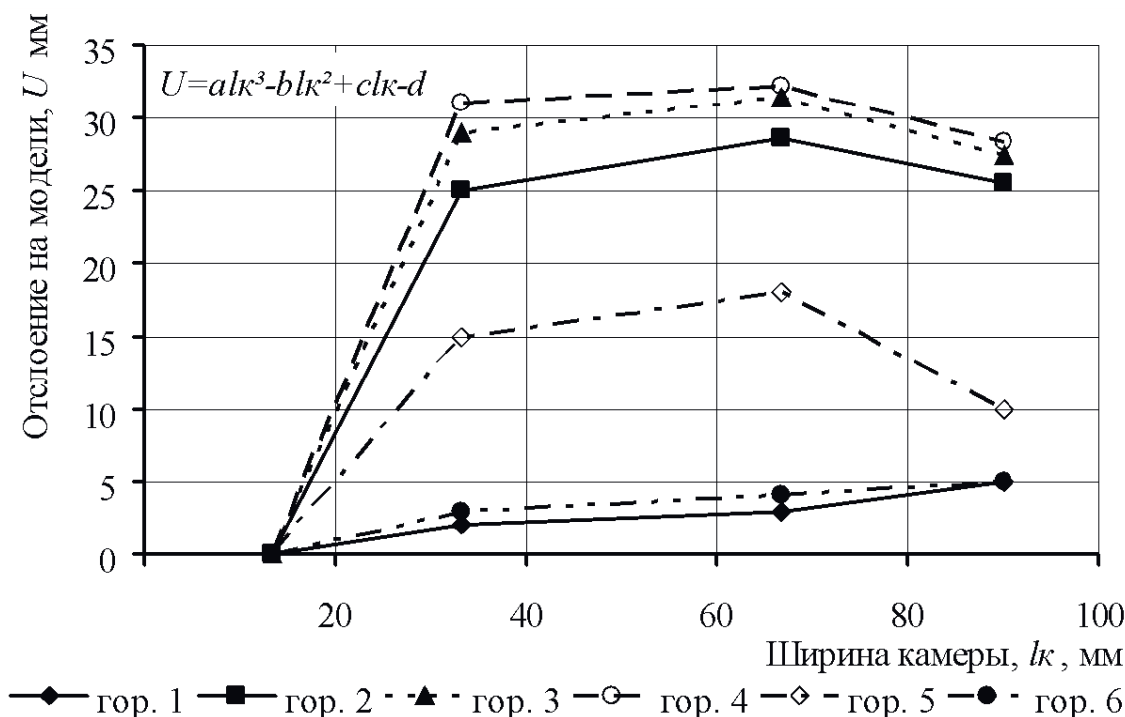


Рис. 3. Области деформации  $U$ , в зависимости от глубины заложения  $H$ , высоты очистной камеры  $h_{ол}$  и степени развития очистных работ по ширине камеры  $l_k$

После анализа полученных зависимостей для буровых горизонтов 1 и 6 становится очевидным, что они минимально подвергнуты влиянию выработанного пространства и, если подставить  $l_k$  в выражение, то мы получим деформацию стремящуюся к нулю. При этом максимальное влияние размеров выработанного пространства ощущается на 2, 3 и 4 буровых горизонтах после формирования и расширения отрезного восстающего.



По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Величина упругих деформаций массива вокруг очистного пространства зависит от глубины заложения  $H$  камеры, ее высоты  $h_{обл}$  и от степени развития очистных работ  $l_k$ . Главным образом на развитие деформаций влияют размеры камеры и степень развития очистных работ. Полученные эмпирическим путем зависимости показывают, что с увеличением очистного пространства камеры области упругих деформаций на каждом горизонте индивидуально изменяются по степенной зависимости  $U = al_k^3 - bl_k^2 + cl_k - d$ .

2. Исследована качественная и количественная характеристика деформаций с помощью физического метода моделирования на эквивалентных материалах, что говорит о возможности корректировки параметров буровзрывных работ в сторону увеличения в области 2, 3 и 4 буровых горизонтов при 60 – 100 % отработки запасов камеры. При этом влияние на отработку камер второй очереди не учитывается, поскольку в этом случае мы будем иметь наложение упругих деформаций.

3. Только одного лабораторного моделирования изменения размеров очистной камеры на НДС массива недостаточно, нужно провести сравнение и уточнение полученных результатов с теоретическим и промышленным исследованиями соответственно. Но уже сейчас можно сказать, что есть корреляция с результатами, приведенными в работах [4, 5].

#### Список литературы

1. Мальцев Д.В. Обоснование параметров буровзрывных работ при разрушении массива ураносодержащих руд: дис. ... к-та техн. наук: 05.15.02: – Д., 2013. – 177 с. защищена 26.04.2013; утв. 04.07.2013 / Д.В. Мальцев – Днепропетровск: ГВУЗ НГУ, 2002. – 177 с.
2. Кузнецов Г.Н. Изучение проявления горного давления на моделях / Г.Н. Кузнецов, М.Н. Бунько, А.А. Филиппов [и др.]. – М.: Углетехиздат, 1959. – 283 с.
3. Изучение проявлений горного давления на моделях / М.Н. Кузнецов, М.Н. Будько, А.А. Филиппова и др. – М.: Углетехиздат, 1959. – 239 с.
4. Хоменко О.Е. Ресурсосберегающая технология буровзрывных работ для условий Ватутинского урановорудного месторождения / О.Е. Хоменко, Д.В. Мальцев // Науковий вісник НГУ. – 2007. – №. 1. – С. 13 – 16.
5. Мальцев Д.В. Изучение напряженно-деформированного состояния массива урановых руд термодинамическим методом. Міжн. наук.-практ. конф. «Школа підземної розробки» 13 – 19 вересня 2009 р. – С. 600 – 614.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ковалевською І.А.  
Надійшла до редакції 17.10.2014*