

С.В. Борщевский, д-р техн. наук, проф.  
А.А. Бородуля, канд. техн. наук,  
Е.Е. Головнева, канд. техн. наук  
(ДонНТУ)

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТОЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЙ**

У результаті лабораторних експериментів отримано залежність поздовжньої і поперечної деформації від стискуючого напруження до межі міцності на одновісний стиск, обґрунтована доцільність застосування анкерного кріплення, що входить до складу постійного на ділянках стволів над сопряженнями.

## **LABORATORY STUDIES STRAIN-POWER PERFORMANCE VERTICAL SHAFTS IN SURROUNDINGS PAIRING**

As a result of laboratory experiments, the dependence of the longitudinal and transverse strain from compressive stress to tensile strength, uniaxial compression, the expediency of the application of roof bolting, part of the permanent plots in trunks of conjugation.

Вертикальные стволы горнодобывающих предприятий сооружают в комплексе с сопрягающимися и прилегающими к ним горными выработками. В табл.1.1 приведен перечень основных выработок, прилегающих к стволу [1].

Форма и размеры поперечного сечения приствольных выработок и камер могут быть различны (табл. 1), их выбор производится в зависимости от места заложения, физико-механических свойств вмещающих пород, назначения предполагаемого оборудования.

Проведение сопряжений стволов с околоствольными дворами имеет следующие особенности: значительные площади обнажения пород в связи с большими пролетами и высотой сопряжений, ведение буровзрывных работ, что значительно ослабляет массив пород в районе узла сопряжения, а также большой объем работ по возведению бетонных и железобетонных конструкций.

Указанные особенности, при отсутствии надлежащего обоснования направления проведения горизонтальной части сопряжения по отношению к залеганию вмещающих пород, ухудшают условия работы при строительстве и эксплуатации крепи участков стволов над сопряжением.

К настоящему времени накоплены весомые знания об условиях эксплуатации угольного бассейна в Донбассе и особенностях проявления горного давления в шахтах, в т.ч. на сопряжениях вертикальных стволов. К геомеханическим особенностям региона относятся следующие факторы [2]:

- высокая литолого-геомеханическая неоднородность продуктивной толщи при региональном, локальном и очаговом снижении показателей прочностных свойств пород;

- формирование больших зон разрушения вокруг выработок в условиях высокой дезинтеграции пород и асимметрии разгрузки массива по контуру;

- зональное разрушение пород вглубь массива и по длине выработки, вызывающее высокую деструктивную пластичность пород, большие их смещения в полость выработки и асимметрию нагрузок на крепь;
- увеличение глубины заложения выработок.

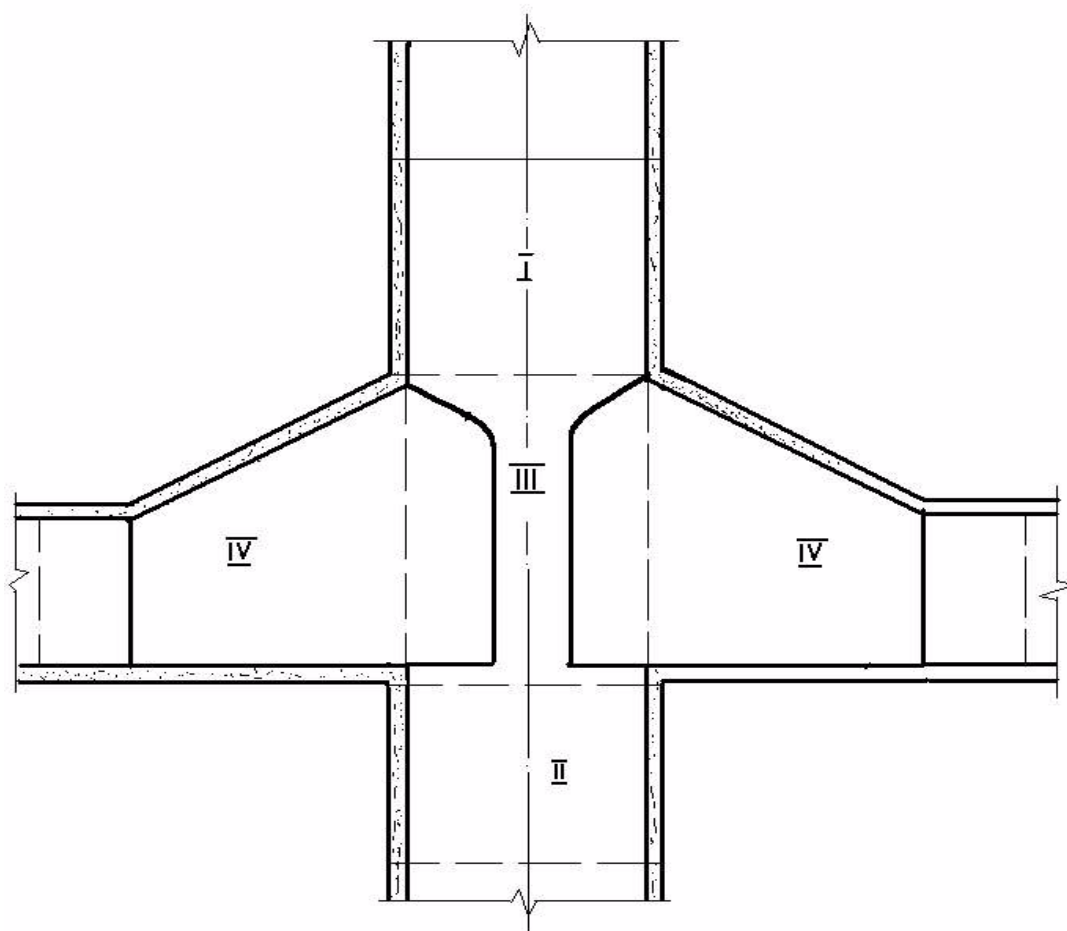
Таблица 1 – Основные сопрягающиеся или прилегающие к стволу выработки

Типы стволов	Выработки и камеры	Глубина заложения	Направление проведения	Геометрические характеристики
Все виды стволов	Калориферные и вентиляционные выработки	Устье ствола	Выбирается в соответствии с поверхностным комплексом	Форма сечения - прямоугольная; площадь сечения: 2-20м <sup>2</sup> .
	Перекачные и редукционные камеры, вентиляционные ходки и сбойки, камеры зумфого водоотлива и кабельных муфт.	Более 500 м	Определяется назначением, видом и расположением оборудования	Форма и стены прямые, свод пологий или плоский, высота 6,5...9,2 м, размеры в плане 2..5x3..6 м.
Главные	Камеры загрузочных устройств. Ходки для чистки зумпфа, дробильно-бункерный комплекс (горнорудные предприятия)	Более 800 м	Выбирается в соответствии с транспортными и технологическими схемами шахт	Форма – прямоугольные стены, пологий свод. Размеры по высоте до 17м, в плане – до 6x7 м.
Вспомогательные, воздухоподающие, вентиляционные	Сопряжения с околоствольными дворами, водотрубные ходки	Более 800 м	Согласно СНиП, в крест простирающихся пород	Форма – арочная с полуциркульным сводом, незамкнутая с прямыми стенами или арочная с обратным сводом, площадью сечения в свету до 40 м <sup>2</sup>

Этими фундаментальными особенностями массива определяются направления поиска и создания охранных систем горных выработок. Основные принципы, которые следует положить в основу их разработки, должны быть связаны с обеспечением повышения устойчивости породного массива с учетом особенностей и стадий развития в нем фронта разрушения, т.е. следует обеспечить объемное упрочнение пород.

Особенности же деформаций прилегающих к стволам пород в районе сопряжения приводят к необходимости использования, для повышения их устойчивости, специальных регулятивных элементов крепи.

По степени нагруженности и напряженно-деформированного состояния крепи сопряжения с горизонтальными выработками околовствольного двора выделяют четыре зоны [3] (рис.1):



- I – зона примыкания ствола к горизонтальной выработке;
- II – то же, к почве горизонтальной выработки;
- III – зона наиболее ослабленного сечения сопряжения;
- IV – зона наиболее ослабленного сечения горизонтальной выработки.

Рис. 1 – Схема расположения характерных зон сопряжения

Протяженность I и II зон принимается равной  $5 r_0$ , где  $r_0$  - радиус ствола в свету. Поскольку радиус большинства стволов, находящихся в эксплуатации, составляет не более 4,20 м - протяженность I и II зон для них составляет 21 м. При проведении обследований [4, 5, 6], для единообразия, протяженность I и II зон была принята равной 20 м для всех условий, по данным практики значительно занижено. Протяженность IV, согласно исследованиям УкрНИМИ зоны составляет 30...50 м. Отметим, что хотя зоны III и IV не являются предметом исследования данной работы, их состояние, конструктивные особенности, различные геотехнические характеристики взаимосвязаны с зонами I и II, и оказывают на них влияние. Состояние крепи обследованных сопряжений в ряде слу-

чаев не соответствовало предъявляемым к ним требованиям.

Известны результаты исследований процесса хрупкого разрушения породного массива в окрестности сопряжения «ствол – горизонт», расположенного в однородном изотропном массиве [1].

Учитывая сильную неоднородность продуктивных толщ Донбасса, в работе [2] было выделено два базовых варианта сочетания пород (слабый слой в прочных породах и прочный слой в слабых породах) при трех основных литотипах (песчаник, алевролит, аргилит), а заложение сопряжения ствола с горизонтом производят в прочных слоях пород, то при моделировании было принято второе сочетание породных слоев (прочный слой в слабых породах). При этом в прочном слое моделировалась горизонтальная сопрягающаяся со стволом выработка.

Описанный в настоящей статье объект исследований имеет следующие отличительные особенности. В данном случае: 1) породный массив моделируется не одним, а тремя слоями различной жесткости. 2) рассматриваются варианты наклонного расположения слоев; 3) рассматриваются варианты расположения горизонтальной выработки под различными углами к простиранию пород, с использованием анкеров и без.

Для моделирования использовался метод эквивалентных материалов [3,4]. Конструкция модели в общих чертах представлена на рис. 1. Она представляет собой куб с размерами граней 0,1 м. В вертикальной плоскости куб состоит из трех слоев: внутреннего, являющегося более жестким, и наружных, более податливых. Предполагается полное сцепление между слоями. Прочностные свойства и жесткость внутреннего слоя выше, чем верхнего и нижнего. Сквозное цилиндрическое отверстие, проходящее через жесткий слой, моделирует околоствольную выработку. Такое же, ортогональное к выработке отверстие, проходящее по оси симметрии куба, моделирует вертикальный ствол. Диаметры отверстий равны 0,01 м. Угол наклона слоев составляет порядка  $10^\circ$ .

Для получения достоверных значений, используя теорию вероятностей [5], необходимое количество образцов  $n=18$ .

В качестве прототипа модели взято сопряжение ствола, расположенное в слое песчаника. Смежные с ним породные слои представлены песчаными сланцами. Жесткий слой на модели выполнен из песчано-цементной смеси (П:Ц=1:1), а податливые – из песчано-цементно-гипсовой (П:Ц:Г=1:1:1) смеси, при этом отношение В/Ц=0,4. Анкерная крепь моделировалась проволокой  $\varnothing 0,5$  мм длиной 5 мм. Проволока устанавливалась со стороны горизонтального отверстия, по 3 шт в вертикальном и горизонтальном рядах.

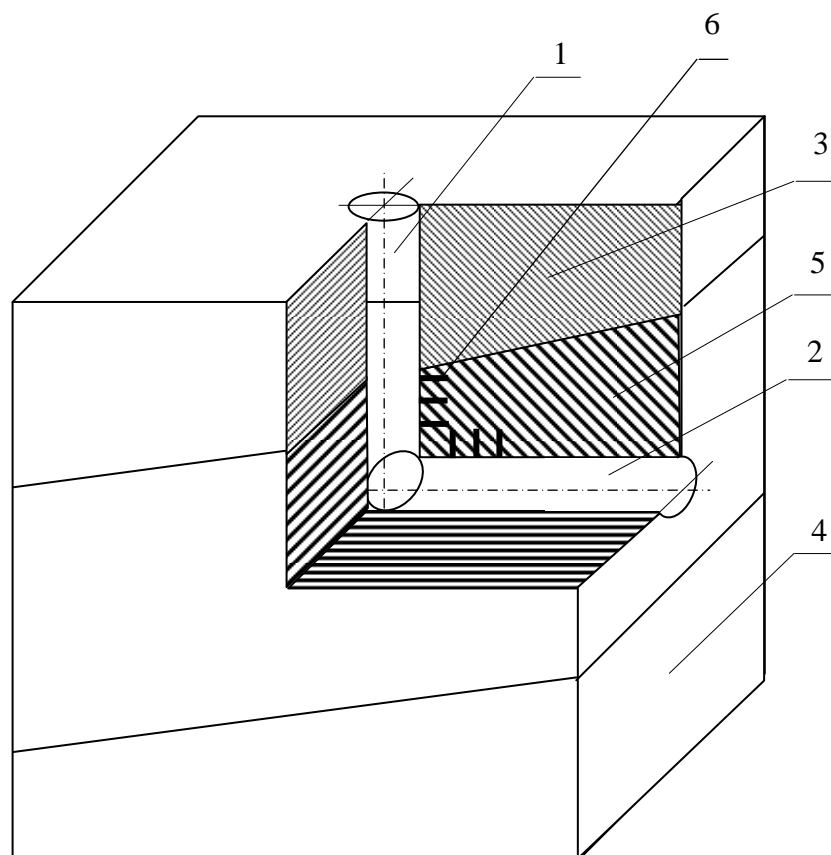
Испытания проводились после набора прочности смеси в образцах, т.е. на ранее чем через 28 суток. Данные о свойствах материалов в натуральных условиях и на модели представлены в табл.2.

Для корректной интерпретации результатов испытаний модель из эквивалентных материалов должна соответствовать критериям подобия. Для упругой области безусловно должно выполняться условие динамического подобия [6]. При испытании модели нагружением, приводящим к разрушению, дополни-

тельно должно обеспечиваться определенное соотношение между прочностными характеристиками пород в натуре и материалов слоев модели. Выполнение указанных критериев достаточно для оценки явления разрушения в качественном плане.

Для качественной оценки явления разрушения соблюдались условия динамического подобия и подобие процессов деформирования:

$$\frac{\sigma_{сж.н}}{\sigma_{сж.м}} = \frac{\sigma_{р.н}}{\sigma_{р.м}} = \frac{E_n}{E_m} \cdot \frac{\left( a_p \times a_t^2 \right)}{\left( a_p \times a_l^4 \right)} = 1 .$$



- 1,2 – отверстия, моделирующие вертикальный ствол и горизонтальную выработку;  
3, 4 – податливые слои; 5 – жесткий слой; 6 – проволока, моделирующая анкера

Рис. 2. – Конструкция модели для изучения хрупкого разрушения породного массива в окрестности сопряжения «ствол-горизонт», расположенного в жестком промежуточном слое:

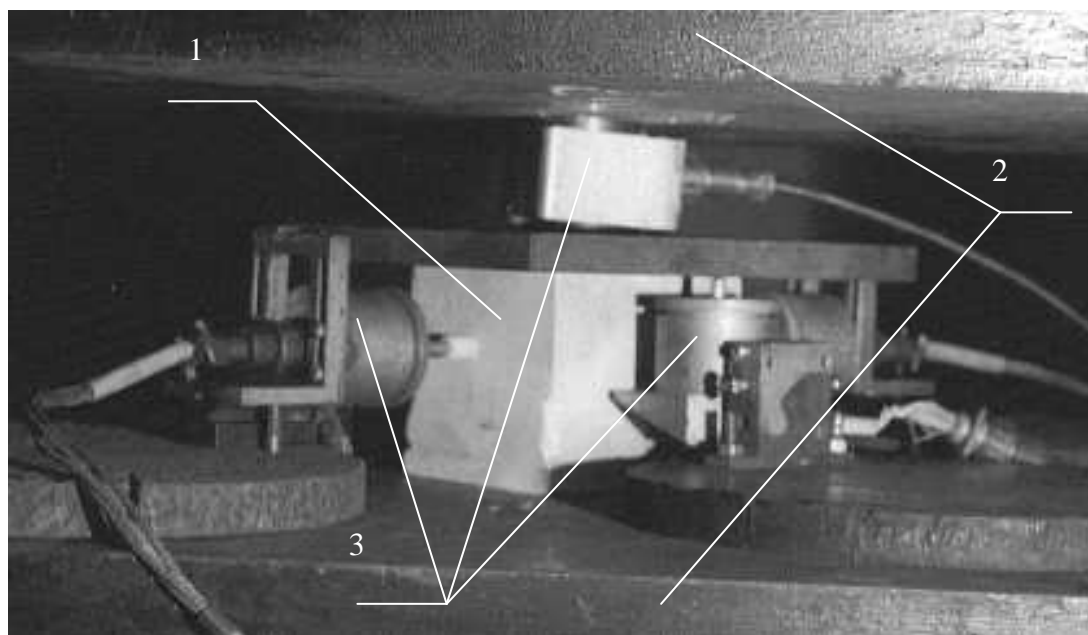
Однако, оценить количественно зону разрушений достаточно сложно с учетом того, что материалы должны удовлетворять условию жесткого сцепления между слоями, а также диаметр ствола в натуральных условиях принят 5м, дополнительно возникает техническая проблема регистрации довольно малых трещин, образующих зону разрушения. Поэтому в данном эксперименте речь идет только о качественной стороне явления.

Таблица 2 – Сравнительная таблица физико-механических свойств слоев породного массива и модели

Параметр	Для массива		Для модели	
	жесткий слой	податливый слой	жесткий слой	податливый слой
диаметр выработки $d$ , м	5,0	5,0	$10^{-2}$	$10^{-2}$
время действия нагрузки $t$ , с	$10^6$	$10^6$	$10^2$	$10^2$
плотность $\rho$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	2,7	2,5	2,3	2,0
прочность на одноосное сжатие $\sigma_{сж.}$ , МПа	57	36	22	14
прочность на растяжение $\sigma_r$ , Мпа	6,8	5,1	2,7	2,0
модуль Юнга $E$ , ГПа	32	24	13	9,3

Схема и вид установки (П-500) для испытаний моделей представлена на рис. 3, 4.

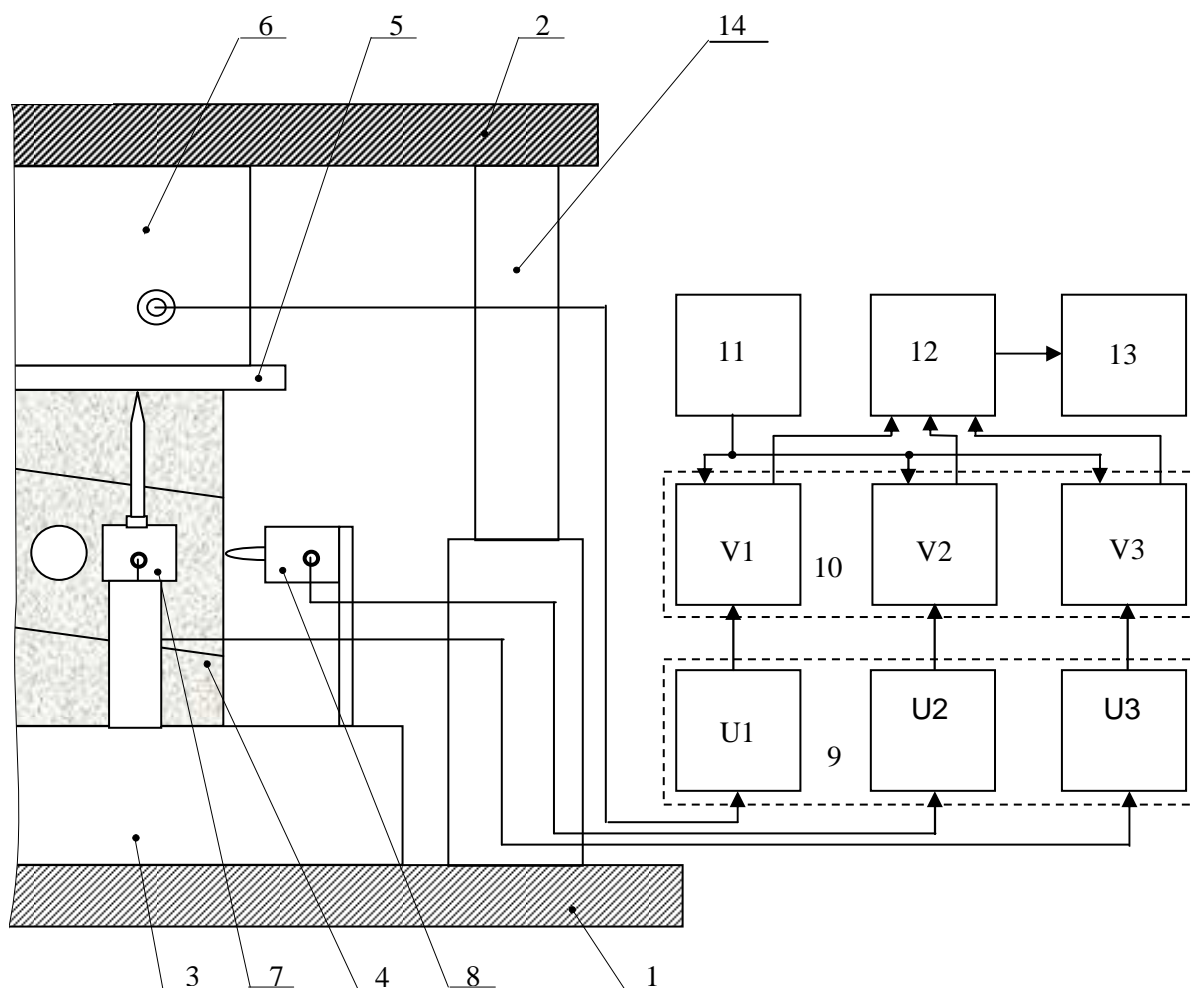
На нижней плите пресса 1 установлены гидродомкраты 14 и платформа 3 с датчиками. В исходном состоянии гидродомкраты обеспечивают распор плит пресса с усилием около 1,2 МН. На платформе 3 соосно с центром нижней плиты 1 и верхней плиты 2 располагается испытываемый образец 4. Между верхней плитой пресса и образцом установлен тензометрический силоизмеритель 6.



1 – испытуемый образец; 2 – плиты пресса П-500; 3 – измерительные датчики

Рис. 3 – Общий вид установки испытания образцов

На платформе смонтированы тензометрические датчики измерения вертикальных 7 и горизонтальных 8 деформаций. Выход тензометрического силоизмерителя 6 через аналоговый усилитель 9 подключен к вертикальным ходам «У» самопишущих вольтметров 10.



1 – нижняя плита прессы; 2 – верхняя плита прессы; 3 – платформа с датчиками; 4 – модель; 5 – промежуточный диск; 6 – силоизмеритель; 7 – датчик вертикальной деформации; 8 – датчик горизонтальной деформации; 9 – блок аналоговых усилителей; 10 – блок цифровых вольтметров; 11 – тактовый генератор; 12 – транскриптор; 13 – цифropечатающее устройство; 14 – гидродомкрат.

Рис. 4 – Схема определения деформационных характеристик моделей

Горизонтальный выход «X» потенциометра 10 соединен через аналоговый усилитель 9, транскриптор 12 и цифropечатающее устройство 13 с выходом датчиков вертикальной 7 и горизонтальной 8 деформации.

Жесткий характер нагружения моделей обеспечивается гидродомкратами. Первичными регистрируемыми параметрами является сжимающее усилие  $F$ , а также абсолютная продольная деформация  $\Delta h$  и абсолютная поперечная деформация  $\Delta b$ . Для анализа осуществляют расчет удельных характеристик: действующего напряжения  $\sigma$ , а также относительных деформаций: продольной  $\varepsilon_{пр}$  и поперечной  $\varepsilon_{поп}$ .

Характерный вид полных кривых деформирования модели в продольном и поперечном направлениях представлен на рис. 5.

Для напряжений, не превышающих  $0,7\sigma_{сж.}$ , деформирование в первом приближении можно считать упругим, после чего начинается интенсивное разви-

тие микротрещин, способствующее прогрессирующему росту нелинейных деформаций в обоих направлениях. На участке за пределом деформирования наблюдается асимптотическое выполаживание кривой. По положению асимптоты оценивается значение остаточной прочности  $\sigma_{ост}$ .

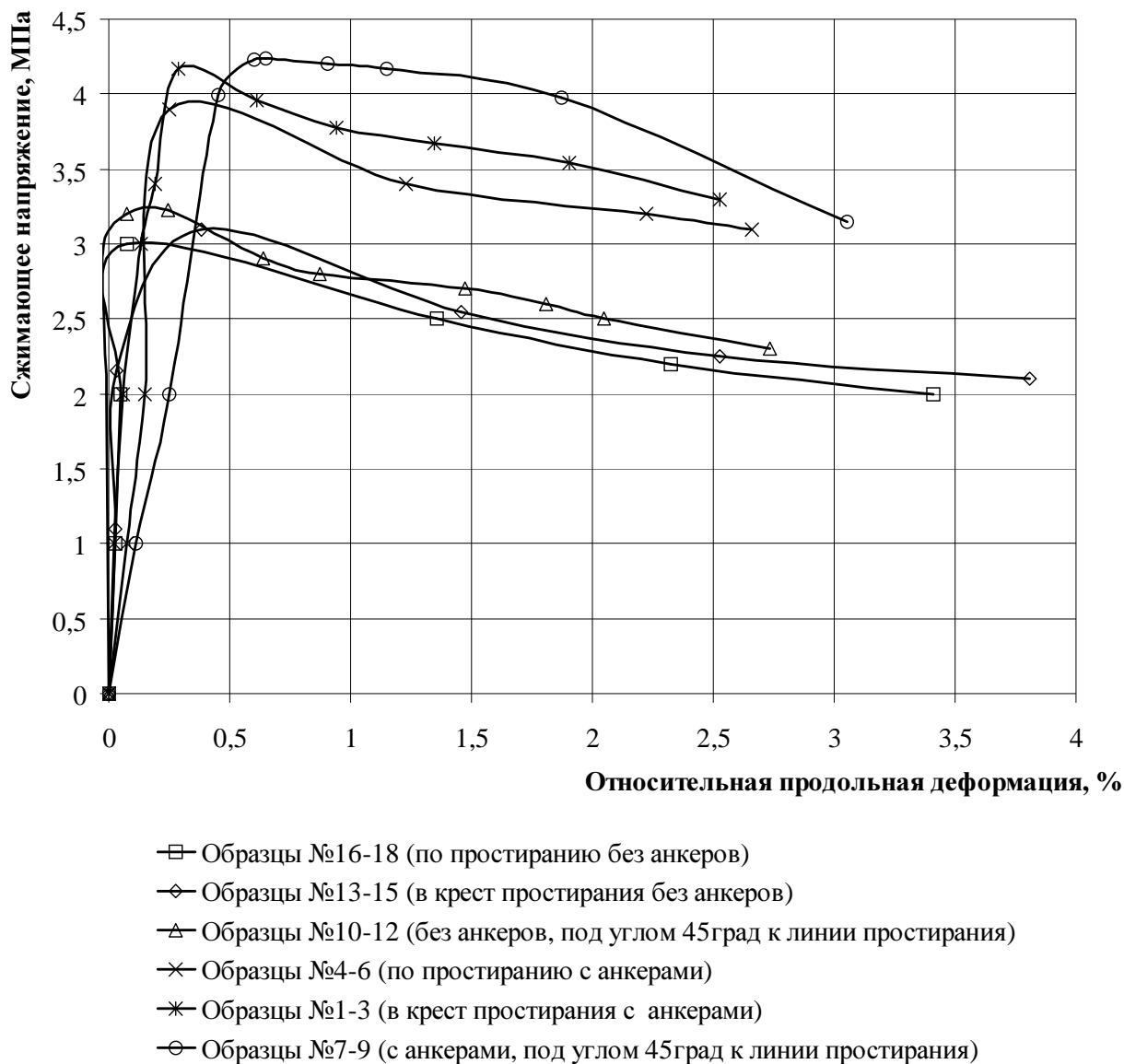
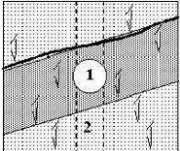
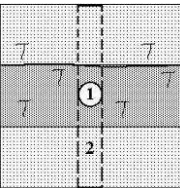
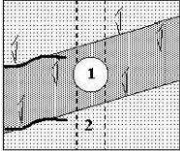
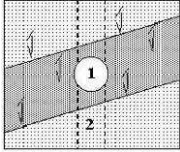
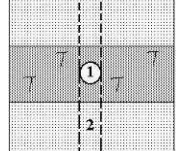
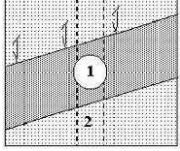


Рис. 5 – Характерный вид зависимости относительной продольной деформации от сжимающего напряжения до предела прочности на одноосное сжатие

По сравнению с классическими диаграммами упругого деформирования породных образцов для исследуемых моделей наблюдается более высокая степень нелинейности. Очевидно, она связана с особенностями взаимодействия смежных слоев различной жесткости, сцепление которых и на практике не является идеальным. Проведено визуальное обследование состояния моделей после завершения испытаний на прессе. Характер внешних проявлений процесса разрушения моделей представлены в табл. 3.



Таблица 3 – Характер разрушения моделей

Номер модели	Расположение горизонтального отверстия по отношению к напластованию	Наиболее характерные схемы разрушения (1 – ствол; 2 – выработка)	Описание характера разрушения модели
16...18	По простиранию без анкеров		отрыв верхнего слоя от среднего; вертикальные трещины отрыва во всех трех слоях
13...15	В крест простирания без анкеров		отрыв верхнего слоя от среднего; вертикальные трещины отрыва в верхнем и среднем слое
10...12	Под углом 45° к линии простирания без анкеров		вертикальные трещины отрыва в верхнем и среднем слое
4...6	По простиранию с анкерами		вертикальные трещины отрыва в верхнем и среднем слоях
1...3	В крест простирания с анкерами		вертикальные трещины отрыва в среднем слое
7...9	Под углом 45° к линии простирания с анкерами		вертикальные трещины отрыва в верхнем слое

Результаты лабораторных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. По прочностному критерию все варианты расположения горизонтальной выработки в наклонном жестком слое примерно равноценны, поскольку разрушающие модель напряжения соизмеримы и находятся в пределах естественных для подобных испытаний ошибок;

2. Образцы, моделирующие комбинированную анкерно-бетонную крепь, находятся в наиболее выгодном положении по сопротивляемости к разрушению в сравнении с обычными образцами без анкеров, так как в этом случае происходит блокирование развития отрывно-сдвиговых деформаций, возникающих в результате разрыва слоев, путем перехода в сдвигово-скользящие.

Для полноты картины о напряженном состоянии системы «крепь – породный массив» необходимо провести ряд натурных исследований взаимодействия элементов указанной системы с применением наиболее информативных и технологичных методов диагностики по оценке состояния приконтурной зоны ствола и сопряжения, определяющих выбор эффективных мероприятий для обеспечения устойчивости ствола.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анкерное крепление в угольных шахтах Украины//Информационные материалы КЦ Тасис. – Донецк, 1999. – 22 с.
2. Левит В.В. Геомеханические основы разработки и выбора комбинированных способов крепления вертикальных стволов в структурно неоднородных породах: Дисс....докт. техн. наук – 05.15.04, - Днепропетровск, 1999. - 463 с.
3. Анкерная крепь:Справочник/ А.П.Широков, В.А.Тедер, М.А.Азадров и др. – М.: Недра, 1990. – 205 с.
4. Методическое руководство по укреплению углеполимерных массивов химическим анкерованием. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1987. – 39 с.
5. Матеріали для математичної обробки результатів експериментів і оцінки точності вимірів до лабораторних та практичних робіт з дисципліни “Фізика гірських порід”, “Механіка гірських порід”, “Матеріалознавство”, “Механіка ґрунтів, основи та фундаменти” для студентів напряму підготовки 0903 “Гірництво” / Упорядн.: О.В.Солодянкін, В.В.М’якенький, С.В.Мартиненко – Дніпропетровськ: НГУ, 2001. – 17 с.
6. КД 12.01.01.502-98 Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Порядок та організація. – С. 25-32.