Министерство угольной промышленности СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА
ВНИМИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по определению несущей способности целиков

Ленинград
1972

gost.e-ecolog.ru

Министерство угольной промышленности СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА
ВНИМИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по определению несущей способности целиков

Ленинград
1972

УДК 622.838.5.001.5

АННОТАЦИЯ

В "Указаниях. . ." изложена методика экспериментального исследования и определения несущей способности целиков. Предлагаемая методика дает возможность учесть влияние масштабного эффекта, фактора неоднородности и длительности действия нагрузки. Экспериментальная основа методики и возможность учета перечисленных факторов являются отличительными особенностями настоящей методики исследования и определения несущей способности целиков.

"Указания . . ." построены на результатах исследований применительно к пологим пластам угля Кузбасса и горючего сланца Прибалтики, но содержащиеся в них результаты методического характера могут найти широкое применение также на рудных и нерудных месторождениях.

"Указания. . ." рассчитаны на инженерно-технических работников шахт, рудников и соответствующих производственных объединений, на работников проектных и научно-исследовательских организаций.

Методические указания составил докт.техн.наук Бублик Ф.П.

ВВЕДЕНИЕ

При подземном способе разработки месторождений полезных ископаемых эффективность применяемых систем, безопасность ведения горных работ и рациональное использование природных ресурсов во многом зависит от правильного выбора размеров целиков различного назначения. Как известно, выбор размеров целиков производится исходя из их несущей способности и действующих на них нагрузок. В настоящей работе рассматривается только первая часть задачи, т.е. определение несущей способности целиков.

Опыт решения практических задач показывает, что при определении прочности целика в каждом конкретном случае необходимо учитывать влияние многих геологических и горнотехнических факторов. В этом отношении известные теоретические решения имеют ограниченные возможности. Так, методы теории предельного равновесия достаточно подробно разработаны для решения задачи о несущей способности целиков однородного строения и притом в режиме условно-мгновенного нагружения. Между тем, довольно часто возникают задачи определения несущей способности целиков, сложенных слоями разной прочности, определения долговечности целиков, т.е. длительности прочного их состояния, а также деформирования их во времени. Наконец, исходные характеристики физико-механических свойств горных пород, на основе которых определяется прочность целиков, зависят от масштабного эффекта, обусловливающего изменение механических свойств блока горной породы одинаковой формы при изменении его геометрических размеров. Поскольку теоретические решения не позволяют в настоящее время учитывать перечисленные факторы с достаточной полнотой и достоверностью, был разработан экспериментальный метод определения несущей способности целиков, включающий натурные опыты, лабораторные испытания образцов горных пород и моделирование. Разработанный метод позволяет определять несущую способность целиков с необходимым учетом влияния основных факторов.

Считая, что экспериментальное определение несущей способности целиков при подземной выемке полезных ископаемых необходимо как для практических целей, так и для разработки и совершенствования аналитических решений, в настоящей работе дается изложение и обоснование указанного выше метода. Работа построена на исследованиях лаборатории горного давления на пологих пластах, проводившихся в течение более десяти лет. Основные предложения и разработки, вошедшие в настоящие Методические указания проверены в условиях выемки пологих пластов угля и горючего сланца, а также, частично, на рудных и нерудных

месторождениях полезных ископаемых.

Настоящие Методические указания включают: основные положения методики определения несущей способности целиков (глава 1), определение основных механических характеристик однородных горных пород (глава П), изучение длительной прочности и ползучести горных пород (глава Ш), прочность и ползучесть неоднородных пород (глава 1У), определение несущей способности целиков (глава У).

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦЕЛИКОВ

1. Факторы, влияющие на прочность целиков

Несущая способность целиков зависит от ряда геологических и горнотехнических факторов. Основными из них являются физико-механические свойства, неоднородность строения и трещиноватость.

Угольные пласты, как правило, сложены слоями или пачками разной мощности, отличающимися не только по своему составу, но и по физико-механическим свойствам. Очень часто между отдельными слоями угля прослеживаются породные прослойки с различными прочностными свойствами, от очень крепких до мягких глинистых, которые в присутствии влаги размокают и приобретают пластические свойства (рис.1).

Еще более характерным свойством угольных пластов является трещиноватость, развитая почти повсеместно. В угленосных породах прослеживается до 12 и более систем трещин, но наиболее ярко выражены из них, как правило, 3-4. Расстояние между характерными трещинами эндогенного происхождения составляет от 0,2-0,3 до 15-30 см. По протяженности трещины разделяются на: пересекающие пласт на всю мощность; пересекающие отдельные пачки угля; пересекающие отдельные разновидности угля внутри угольной пачки; локализованные внутри прослоев и линз/1/. Нередко в угольном пласте встречаются перемятые весьма слабые пачки, из которых отбор проб для испытаний в лаборатории невозможен.

Не менее характерно проявление неоднородности на рудных и нерудных месторождениях (рис.2). Для этих месторождений также характерно наличие трещиноватости.

Кроме трещиноватости и неоднородности следует отметить особенности контактирования залежей полезных ископаемых с боковыми породами и характеристику последних. Угольным и другим пластовым месторождениям свойственно наличие четких контактов с боковыми породами. Причем на контактах нередко могут быть глинистые промазки или тонкие слабые слои. Как это обстоятельство, так и характеристика самих боковых пород, очевидно, могут влиять на прочность целиков.

Условия работы целиков и требования, предъявляемые к ним, зависят также от назначения целиков и применяемой системы разработки. Рассмотрим условия работы целиков при системах разработки с короткими забоями и при системах с длинными забоями.

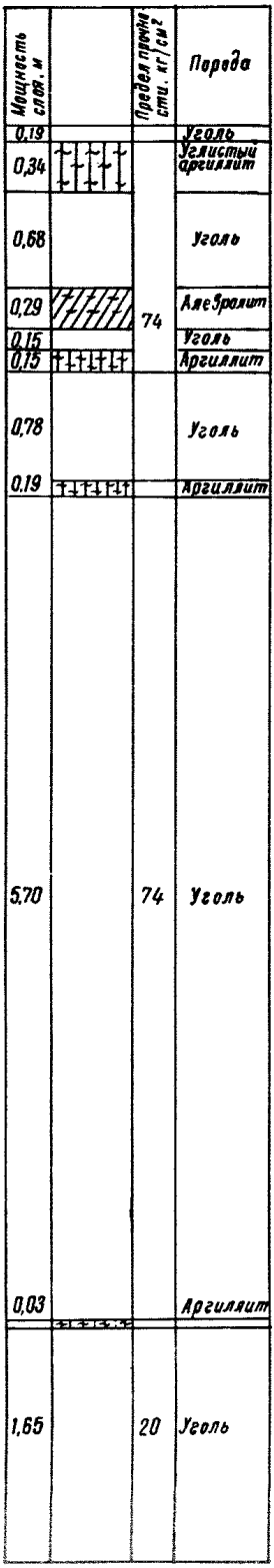


Рис.1. Нормальные колонки угольного пласта III Томь-Усинского месторождения (а) и пласта горючего сланца Прибалтийского месторождения (б)



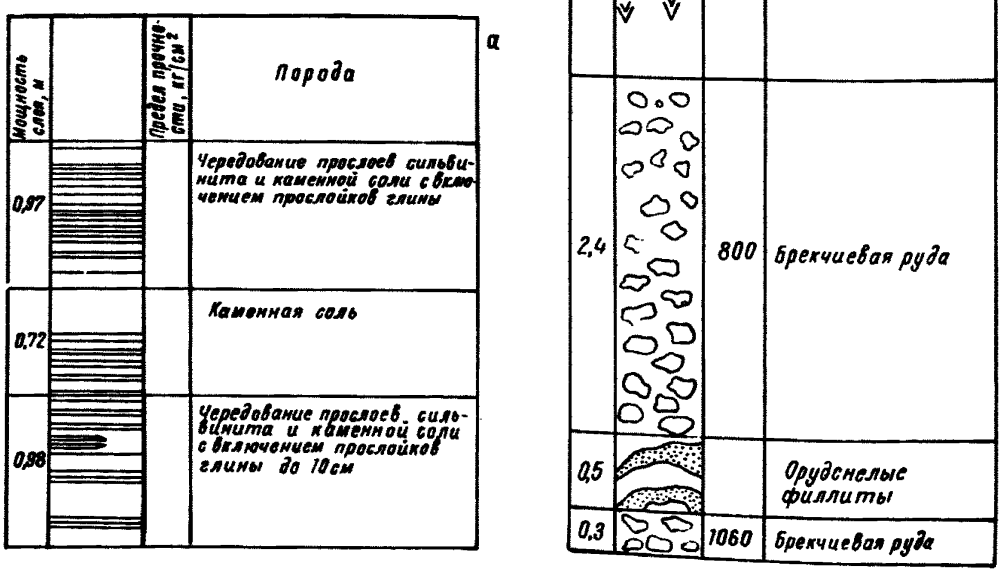


Рис.2. Структурная колонка пласта II Старобинского месторождения калийных солей (а) и медно-никелево месторождения Печенги (б)

Первая из этих групп систем разработки характеризуется, как известно, тем, что управление кровлей осуществляется с помощью целиков полезного ископаемого. Ширина очистных выработок выбирается исходя из устойчивости непосредственной кровли. При недостаточной устойчивости последней применяются легкие виды крепи. К этой группе относятся такие известные системы разработки, как камерная, камерно-столбовая, коротких столбов, камер-лав и др.

При камерной системе разработки междукамерные целики должны обеспечивать такой характер сдвижения основной кровли, при котором в необходимой степени и в течение заданного времени сохранялась бы устойчивость кровли в камерах. В отдельных случаях междукамерные целики должны гарантировать безопасность охраняемых объектов на поверхности в течение длительного времени. Из этого следует, что срок службы междукамерных целиков может исчисляться от нескольких суток или месяцев (например, при буро-шнековой выемке тонких пластов) до нескольких лет и даже десятилетий (в случае сохранения особо ответственных сооружений на поверхности или при специфических особенностях полезного ископаемого-соляные месторождения).

При камерно-столбовой системе разработки предусматривается выемка с полным обрушением кровли. Принятый размер целика-столба должен обеспечивать управление основной кровлей, а для управления непосредственной кровлей при погашении столба оставляются так называемые подзавальные целики. Срок службы целиков-столбов исчисляется сутками, а подзавальных целиков-часами.

При системе разработки камерами-лавами назначением целиков, оставляемых между камерами, является обеспечение плавного оседания основной кровли и всей толщи пород до поверхности. Управление непосредственной кровлей полностью осуществляется крепью. В этом случае устойчивость целиков должна сохраняться в течение месяцев и даже нескольких лет. Важное значение имеет также характер деформирования целиков во времени, с тем чтобы происходило плавное оседание подработанной толщи без разрушений целиков вблизи действующих очистных забоев.

Переходя к группе систем разработки с длинными забоями, прежде всего следует отметить, что при этих системах управление кровлей в очистных забоях осуществляется полным обрушением, частичным обрушением или полной закладкой с применением соответствующих крепей для поддержания призабойного пространства в безопасном состоянии. При этих системах разработки целики оставляются только для защиты подготовительных выработок. Поскольку на такого рода целики развивается большое давление, то их прочные размеры могут быть

весьма значительными. Поэтому при выборе размеров таких целиков иногда допускают их частичное разрушение. Так, при выемке длинными столбами пласта средней мощности целик между откаточным штреком вышележащего подэтажа и вентиляционным нижележащего подэтажа должен быть в прочном состоянии до отработки вышележащего подэтажа. Однако при выемке данного подэтажа можно допустить частичное разрушение целика, в таком состоянии в сочетании с усилением крепи штрека, он должен обеспечивать удовлетворительное поддержание последнего. При подобного рода условиях, задаваясь размерами целиков, исходя из допустимого уровня потерь полезного ископаемого и экономически целесообразных затрат на поддержание, необходимо установить характер деформирования целика после разрушения и его несущую способность в стесненных условиях для того, чтобы правильно выбрать сопротивление и податливость крепи охраняемой выработки.

Более сложными оказываются схемы подготовки, развития горных работ и поддержания подготовительных выработок при выемке мощных пологих пластов системами разработки наклонными слоями и комбинированными. Принципы защиты подэтажных и других аналогичных подготовительных выработок и здесь остаются такими же, как и при выемке пластов средней мощности, а условия работы целиков-сходными. Некоторыми особенностями целиков на мощных пластах являются неодинаковая ширина или ступенчатость на разных уровнях по их высоте и ослабление целиков выработками.

Кроме целиков, предназначенных для защиты подготовительных выработок, при разработке месторождений полезных ископаемых оставляются различного рода барьерные целики (противопожарные, для защиты от прорыва воды и т.п.), срок службы которых исчисляется годами и десятилетиями. Они также должны приниматься из условия их прочного состояния.

Из краткого обзора назначения и условий работы целиков при некоторых схемах очистной выемки следует, что сроки службы целиков изменяются от нескольких часов до десятков лет и даже требуется, чтобы они обеспечивали поддержание подработанной толщи пород или служили барьером неограниченно длительное время.

Таким образом, при установлении прочностных и деформационных свойств полезного ископаемого, необходимых для определения несущей способности целиков различного назначения, необходимо учитывать следующие основные факторы: 1) трещиноватость горного массива, которая является основной причиной проявления масштабного эффекта; 2) неоднородность строения и разнопрочность слоев, слагающих полезные ископаемые; 3) длительность воздействия нагрузки или срок службы целиков; 4) возможное ослабление целиков.

2. Основные положения методики определения механических свойств горных пород и несущей способности целиков

При определении механических свойств горных пород указанные в предыдущем параграфе факторы надлежащим образом находят отражение в том случае, если исследования выполняются в полном объеме в натурных условиях. Однако такой путь является чрезвычайно трудоемким. Исследования показывают, что если основные характеристики горных пород определять натурными испытаниями, а характер влияния отдельных факторов устанавливать по исследованиям на образцах в лабораторных условиях и между натурными и лабораторными данными иметь необходимые связи, то на этой основе можно решать подавляющее большинство задач практического определения механических свойств горного массива и несущей способности целиков. Такой путь резко снижает трудоемкость экспериментальных исследований и обеспечивает получение достаточно надежных показателей для расчета несущей способности целиков.

Предлагаемая методика определения несущей способности целиков предусматривает проведение следующих исследований:

1. Изучение однородных пород или слоев, слагающих целики. На этом этапе подлежат определению основные прочностные и деформационные характеристики отдельных слоев в режиме условно-мгновенного нагружения. Испытания проводятся в натурных и лабораторных условиях. Натурные испытания дают возможность учесть влияние масштабного эффекта и других факторов (влажность, газонасыщенность и т.п.), а сопоставление данных натурных и лабораторных испытаний позволяет получить соотношения между ними. По этим соотношениям вожно учесть влияние других факторов (неоднородность, время и т.п.) на прочность целиков по данным испытаний образцов.

Объекты исследований первого этапа, т.е. однородные породы или слои, слагающие целики, подвергаются длительным испытаниям, в результате которых должны быть установлены пределы длительных прочностей и параметры ползучести. Изучение этих характеристик осуществляется лабораторными методами на образцах.

2. Исследование неоднородности горных пород. Изучение производится на неоднородных образцах из горных пород, как на моделях целиков. Установлению подлежат обобщенные основные характеристики, пределы длительной прочности и параметры ползучести для

пород с заданной неоднородностью. Обобщенные характеристики неоднородных пород могут также рассчитываться по соответствующим характеристикам отдельных слоев, если имеются для этого необходимые зависимости. В этот же этап входит изучение прочности целиков, ослабленных выработками.

3. Расчет несущей способности целиков. Прежде всего следует установить характеристики, необходимые для расчета несущей способности целика. Это производится пересчетом данных испытаний образцов (в части длительной прочности, параметров ползучести и т.п.) на соответствующие характеристики массива. Такой пересчет производится по данным о соотношениях характеристик в образце и в массиве, полученных в итоге выполнения работ первого этапа.

Для расчета несущей способности целика заданных размеров, т.е. разрушающей нагрузки на целик, необходимо принять условие прочности. Наиболее часто такой расчет производится по допускаемому напряжению на сжатие. В этом случае принимают эмпирические коэффициенты зависимости прочности на сжатие от соотношения ширины и высоты целика, условий на контактах и других факторов или производится уточнение таких зависимостей для конкретных условий путем испытаний образцов из горных пород.

Для расчета разрушающей нагрузки по теории предельного равновесия необходимо использовать коэффициенты сцепления, углы внутреннего трения материала целика, а также сцепление и углы трения по контактам с боковыми породами.

В последующих главах излагается методика исследований перечисленных выше вопросов и приводятся результаты исследований в виде показателей физико-механических свойств отдельных горных пород или в виде функциональных зависимостей.

Глава II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОРОДНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

1. Схемы натурных испытаний для определения основных характеристик горных пород

К основным механическим характеристикам, которые должны определяться при условно-мгновенном режиме нагружения, относятся: прочность на одноосное сжатие кубического блока, модуль деформации, коэффициент поперечной деформации, а также угол трения и коэффициент сцепления. Поскольку в работе расчет прочности целиков ведется по первой теории прочности (теория максимальных главных напряжений), то подробно излагается методика испытаний первых трех указанных выше характеристик. Что касается методики определения коэффициента сцепления и угла внутреннего трения, то по ней даются необходимые ссылки на известные работы.

Определение механических свойств горного массива по результатам лабораторных испытаний пород на образцах обладает рядом известных недостатков, которые обусловлены: а) наличием трещиноватости; б) большей вероятностью отбора проб из более крепких разновидностей и слоев пород, чем из более слабых; в) невозможностью отбора, длительного хранения и испытания образцов из слабых пород; г) изменением свойств пород в образце за отрезок времени от извлечения его до испытания и др. Исходя из этого, следует признать, что основные характеристики однородных слоев должны устанавливаться, в основном, по данным натурных испытаний. Испытания для этих целей можно проводить по трем схемам /5/: 1) на полностью оконтуренных блоках (рис.3,а); 2) на частично оконтуренных блоках (рис.3,б); 3) при одной обнаженной плоскости (рис.3,в). Первые две схемы не имеют принципиальных отличий от соответствующих схем Е.А.Герчикова /2/ и С.П.Шеляпина /3/. Третья схема широко применялась Я.А.Бичем /4/ для исследования деформационных свойств угольных пластов в связи с горными ударами.

Теоретически первая схема дает возможность получить необходимые характеристики полезного ископаемого на блоках любого размера, что обеспечивает учет масштабного эффекта, и она свободна от каких-либо недостатков принципиального порядка. При второй схеме одна боковая грань блока не отделяется от массива, что вызывает некоторые погрешности в определяемых показателях, но значительно снижает трудоемкость изготовления блоков. Однако обеим этим схемам присущ тот недостаток, что при изготовлении блока в напряжен-

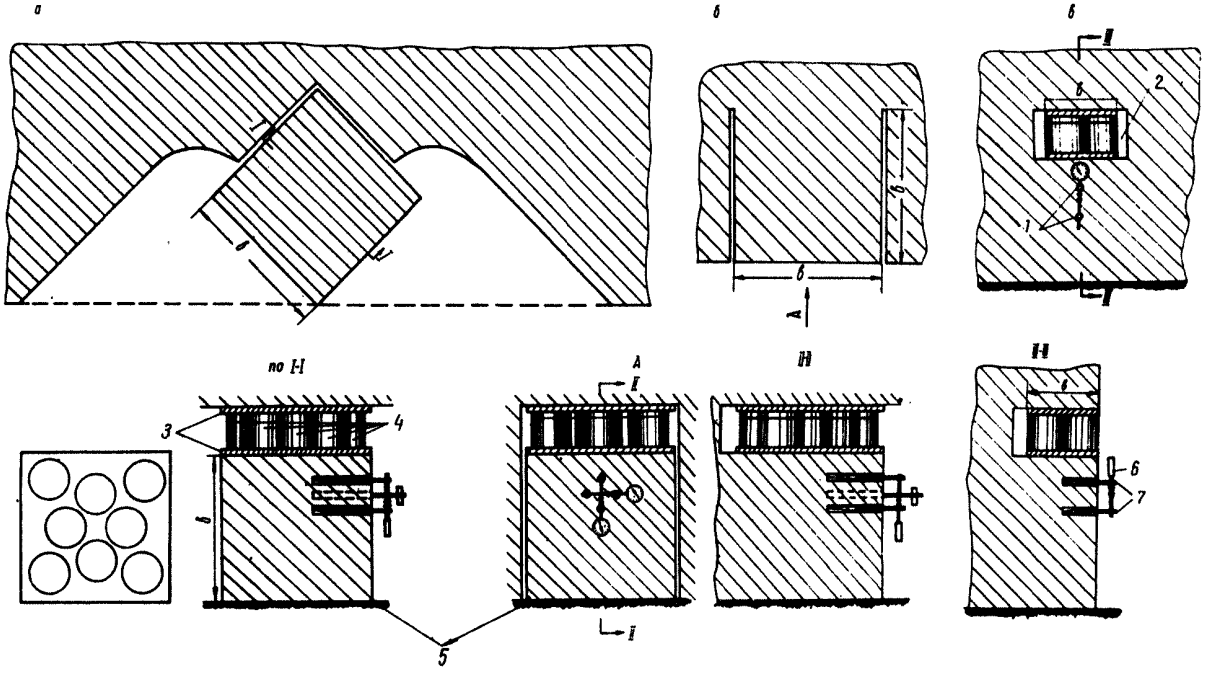


Рис.3. Схемы натурных испытаний:
1 – шнуры; 2 – ниша; 3 – плиты; 4 – домкраты; 5 – почва пласта; 6 – индикатор; 7 – реперы

ном горном массиве он может самопроизвольно разрушаться. Размеры блоков при испытаниях по первым двум схемам должны приближаться к полной высоте целика или слоя. Во всяком случае они должны быть достаточными, чтобы в блоке нашли отражение структурные особенности испытуемого массива.

Третья схема испытаний не обеспечивает непосредственного получения показателя прочности при одноосном сжатии. Однако минимальное число обнаженных плоскостей, отсутствие нарушений массива при его подготовке к испытаниям и достаточная площадь, на которой производятся испытания, чтобы учесть структурные особенности массива, дают основание считать,что при натурных испытаниях по этой схеме определяется прочность горного массива за пределами ощутимого влияния масштабного фактора.

Чтобы выяснить влияние на показатель прочности размера опорных плит при испытаниях по третьей схеме, на шахте "Полысаевская-Северная" в Кузбассе были проведены испытания /7/ по угольному пласту Полысаевскому-1 с размерами плит 12x12; 24x24 и 48x48 см. Из результатов опытов видно (рис.4),

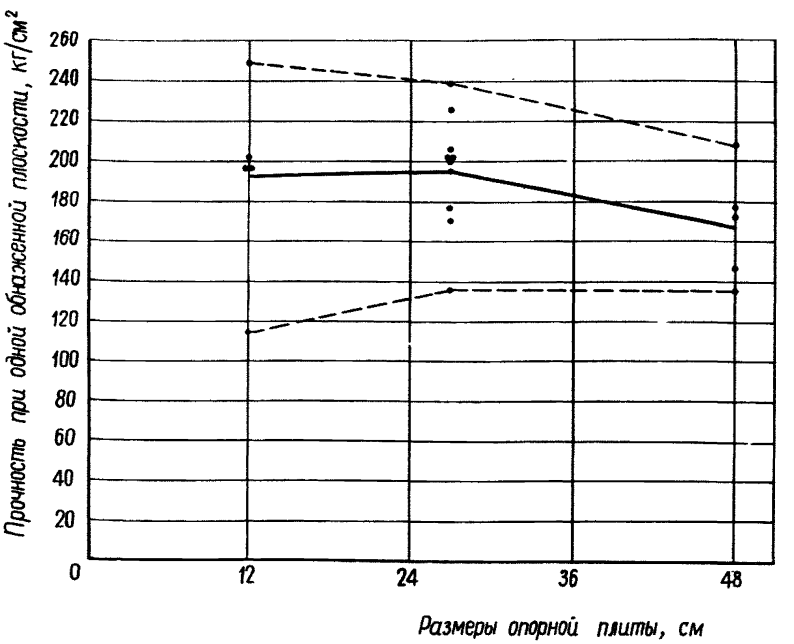


Рис.4. Зависимость прочности от размеров опорных плит

что средняя прочность угля при одной обнаженной плоскости при первых двух размерах плит практически одинакова,а при третьем уменьшилась всего на 12-14%. Указанные различия не

выходят за пределы обычных колебаний значений прочности. Это является доказательством того, что при испытаниях по третьей схеме получаем показатель прочности за пределами ощутимого влияния масштабного фактора.

Вычисление прочности угля по натурным испытаниям производится путем деления величины разрушающей нагрузки на площадь нагружения. Таким образом получаем прочность на одноосное сжатие при первых двух схемах испытаний. При испытании по третьей схеме такие вычисления дают некоторую характеристику прочности p при сложном напряженном состоянии. Для определения прочности угля на одноосное сжатие R_c можно воспользоваться выражением

$$R_c = \frac{p}{k_p}, \qquad (1)$$

если будет известно значение переходного коэффициента k_p.

Чтобы установить значения переходного коэффициента k_p, были проведены специальные лабораторные эксперименты на моделях из эквивалентных материалов. Опыты проводились на монолитном, нетрещиноватом и на трещиноватом материалах.

Моделирование на монолитном материале показало /6/,что значение k_p изменяется от 1,49 до 3,22, в среднем составляя 2,46 при отклонении крайних значений от среднего на $\pm 32\%$. Значение k_p для трещиноватого материала колеблется от 1,92 до 3,23, т.е. находится в тех же пределах, что и для монолитных моделей. Таким образом, по данным моделирования значение k_p изменяется в пределах от 2 до 3, причем эти пределы сохраняются даже при весьма значительных изменениях прочности материала моделей (в 6 раз) и размеров опорных плит (в 10 раз). Поэтому можно считать, что полученные значения k_p будут справедливы для широкого диапазона условий, включая угольные пласты.

Проведенные испытания угольного пласта Полысаевского-1 на шахте "Полысаевская-Северная" в Кузбассе при одной обнаженной плоскости (по третьей схеме) и на полностью оконтуренных блоках (по первой схеме) дают k_p =3,5-4,5.Несколько большие значения переходного коэффициента при натурных испытаниях, по сравнению с лабораторными, следует отнести за счет нарушений угольных блоков при их нарезке. Естественно, при дальнейших исследованиях желательно уточнить и проверить полученные результаты. Пока же считаем возможным пользоваться значениями переходного коэффициента, полученными моделированием.

2. Методика натурных испытаний

Рассмотрим следующие вопросы: характеристика оборудования для испытаний, выбор мест натурных испытаний, производ-

ство самих испытаний.

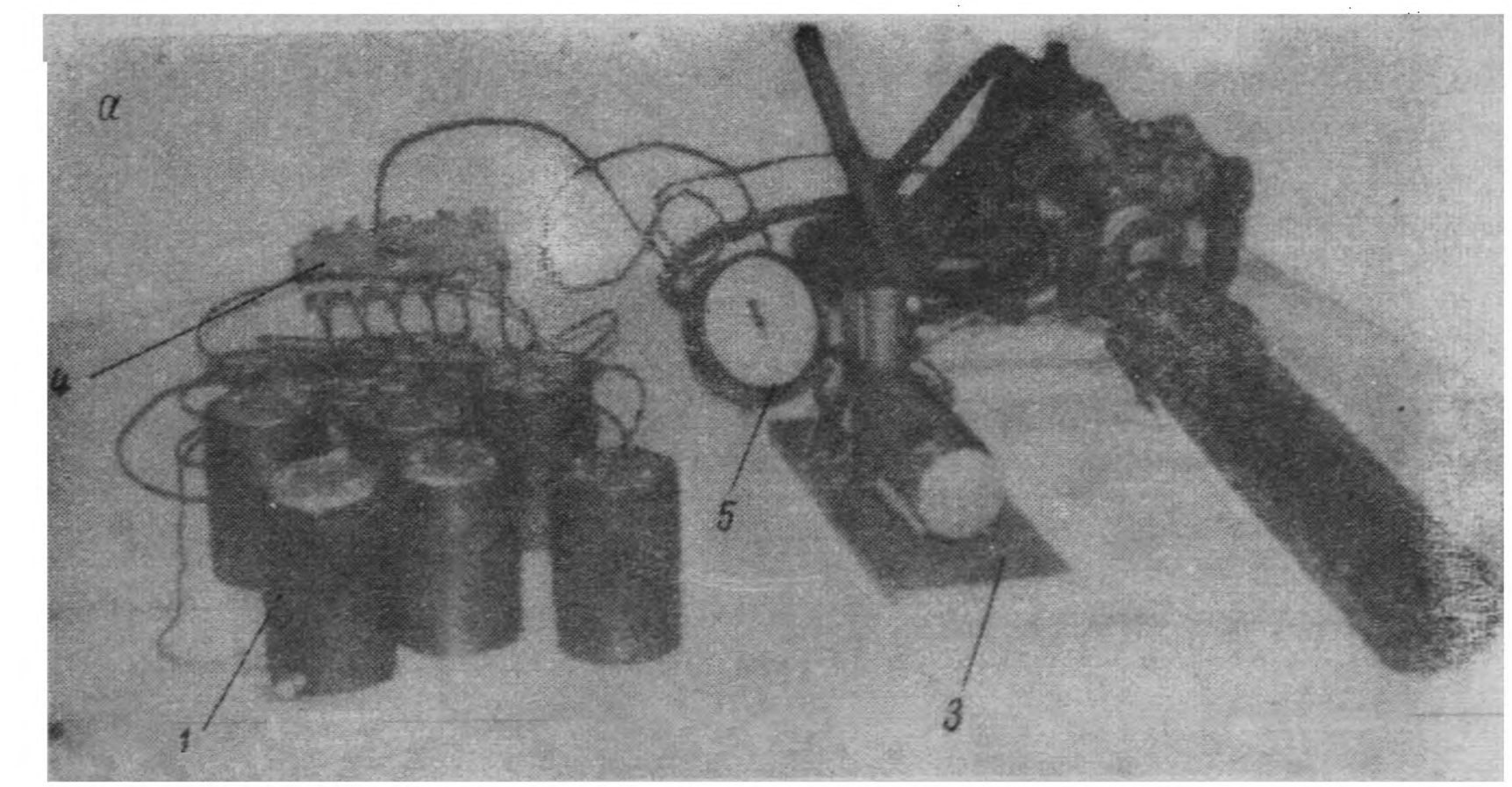
В комплекс оборудования для проведения натурных испытаний входят давильная установка и угольная пила, разработанные Я.А.Бичем /4/ и изготовляемые опытно-экспериментальным заводом ВНИМИ. Давильная установка состоит (рис.5) из гидравлических домкратов 1, размещаемых между опорными стальными плитами 2 толщиной 15-20 мм и размерами от 24х24 см до 100х100 см и более, гидравлического насоса 3, коллектора 4, соединительных трубок и манометра 5. Давление в гидросистеме может достигать 600 и даже 1000 атм в зависимости от конструкции давильной установки. Один гидравлический цилиндр при давлении масла в гидросистеме 600 атм развивает усилие 47 т. Размер опорных плит зависит от частоты трещин и схемы испытаний, а количество цилиндров определяется прочностью испытываемой горной породы. Для оконтуривания блоков в таких горных породах, как уголь, калийная и каменная соли, а также в весьма слабых породах, используется угольная пила. В более крепких породах (горючие сланцы, глинистые сланцы и др.) блоки оконтуриваются строчкой шпуров с последующим удалением перемычек между ними с помощью угольной пилы.

В блоке, предназначенном для испытаний, устанавливаются реперы 7 в специальные шпуры. По реперам производится измерение деформаций с помощью индикаторов часового типа 8 с ценой деления 0,01 мм.

При выборе мест проведения натурных испытаний необходимо соблюдать следующие правила.

1. Участки натурных испытаний должны выбираться на сравнительно небольшой глубине от земной поверхности и вне интенсивного влияния опорного давления. Естественно, допустимый уровень напряжений на участке, предназначенном для испытаний пород, зависит от прочности последних. Чем меньше прочность пород, тем меньше допустимый уровень напряжений. Практически угольные пласты можно испытывать в одиночных выработках на глубинах до 150-300 м, а калийные соли на глубинах 400-500 м. Следует также отметить, что допустимый уровень напряжений зависит и от схемы испытаний. При первой и второй схемах испытаний он меньше, чем при третьей схеме, т.е. при испытаниях с одной обнаженной плоскостью. Это объясняется тем, что при переходе в одноосное напряженное состояние блок выдерживает меньшую нагрузку, чем в сложном напряженном состоянии. Допустимая глубина, на которой еще можно проводить натурные испытания, увеличивается при разгрузке участка от давления вышележащих пород в случае, например, надработки, при проходке разгружающих выработок и т.п.

2. Натурные испытания должны проводиться в стенках выработок, пройденных комбайном или с помощью отбойных молотков. В выработках, пройденных с помощью взрывных работ,



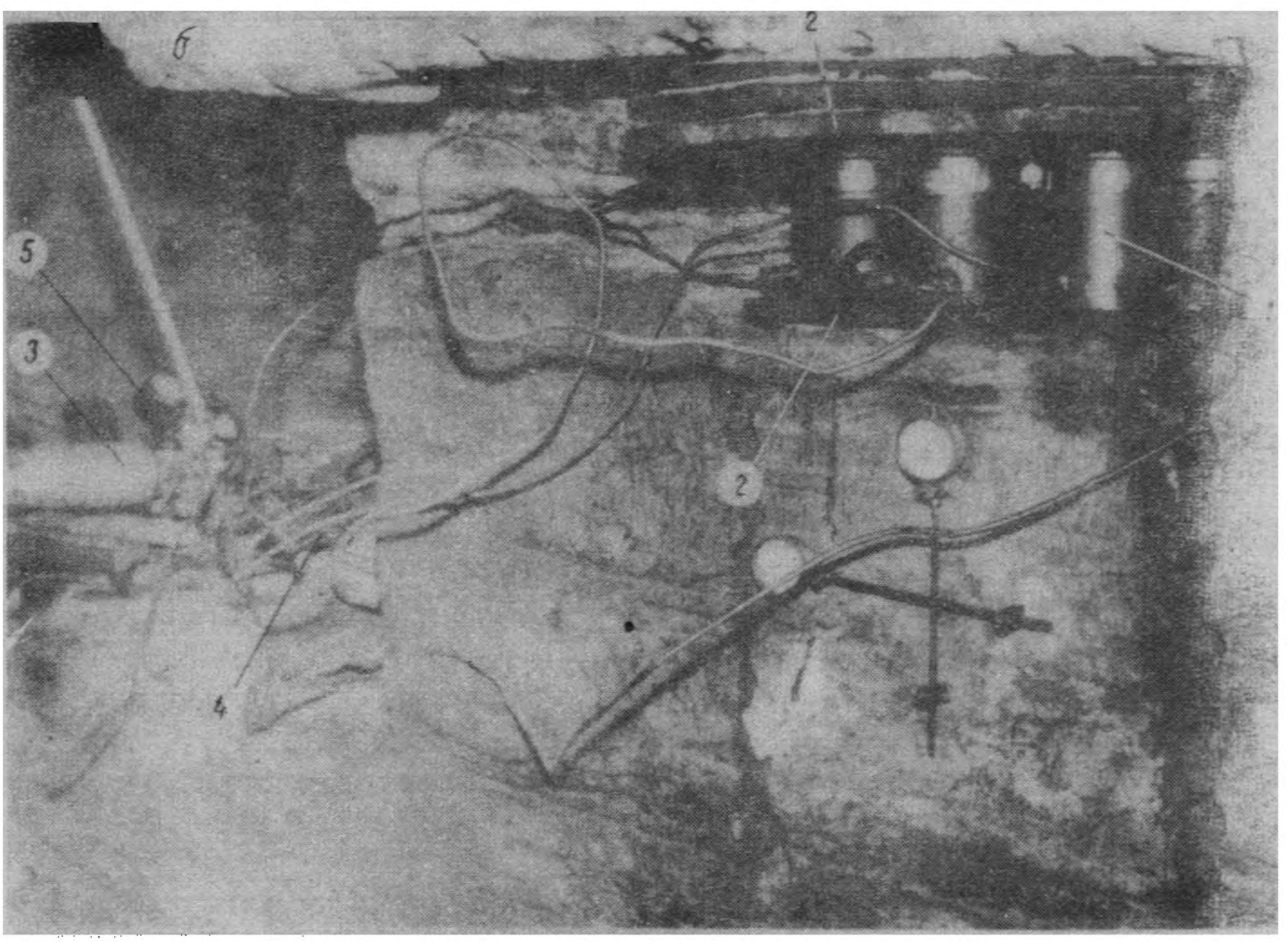


Рис.5. Общий вид давильной установки (а) и схема ее расположения при натурных испытаниях (б)

стенку в месте испытаний следует обирать до ненарушенного массива или проходить вручную специальную нишу.

Если пласт сложен слоями разной прочности, то испытания желательно осуществить как отдельных слоев, так и всего пласта или групп разнопрочных слоев.

На мощных пластах испытывать нужно отдельные слои или пачки, поскольку испытание блока высотой, равной мощности пласта, осуществить технически затруднительно.

Натурные испытания рекомендуется проводить в следующем порядке: установка приспособлений для измерения деформаций, оконтуривание блока, монтаж давильной установки, производство испытаний.

В блоке, намеченном к испытанию, шахтным электросверлом бурятся шпуры диаметром 20 мм. Расстояние между шпурами для замера осевых деформаций при испытаниях по третьей схеме должно составлять 0,5-0,7 ширины опорной плиты, верхний репер следует располагать на расстоянии равном 0,2 ширины той же плиты, а глубина шпуров должна составлять 0,2-0,3 ширины плиты. В пробуренные шпуры устанавливаются реперы для измерений деформаций. Реперы закрепляются с помощью деревянных пробок и металлических клиньев или бетонируются быстросхватывающимся цементом. От тщательности установки реперов зависит качество и достоверность деформационных характеристик, получаемых по данным натурных испытаний.

Оконтуривание блока производится врубами (щелями), выпиливаемыми с помощью угольной пилы, причем верхний вруб должен располагаться по напластованию, а боковые - перпендикулярно к верхнему. Высота верхнего вруба зависит от высоты гидравлических цилиндров и толщины опорных плит. Нижняя поверхность вруба должна тщательно выравниваться для обеспечения хорошего контакта с опорной плитой. Для этой цели иногда целесообразно нанести слой цементного раствора.

После установки нижней опорной плиты производится монтаж гидросистемы. Устанавливают цилиндры и соединяют их между собой трубками (лучше всего по два), а также с коллектором. К коллектору подключают насос и манометр. Заводится верхняя опорная плита и расклинивается с помощью металлических подкладок. Монтируются индикаторы между реперами для замеров деформаций.

После подготовки блока к испытанию производится его зарисовка и описание, где должно быть отмечено его расположение относительно элементов залегания пласта, размеры, толщина отдельных пачек и прослойков, расстояние между реперами и характер трещиноватости.

Испытание блока заключается в постепенном его нагружении с фиксированием отсчетов по манометру и индикаторам через определенные интервалы. В зависимости от крепости,

количества цилиндров и деформационных свойств, отсчеты берутся через каждые 10–50 атм нагружения. После разрушения испытываемого блока следует сделать зарисовку характера разрушения. Особенности деформирования и признаки разрушения также должны отмечаться в журнале испытаний. Для получения представительных данных о прочности пласта необходимо провести не менее грех испытаний на одном и том же участке.

По результатам испытаний вычисляют прочность на одноосное сжатие, которая при первой и второй схемах испытаний равна удельной разрушающей нагрузке P, а при третьей схеме она определяется по выражению (1). По графикам "напряжения–деформации" вычисляется модуль деформации. Данные о прочности по результатам натурных испытаний угля ряда пластов Кузбасса и пласта горючего сланца Эстонского месторождения приведены в табл.1.

3. Сравнение данных натурных и лабораторных испытаний

Чтобы составить представление о различии прочностей в образце и в массиве, в табл.2 приведены сведения о прочности на одноосное сжатие девяти угольных пластов, полученные на образцах (в режиме условно-мгновенного нагружения) и по натурным испытаниям. Из этих данных видно, что прочность угля в массиве в 2–5 раз меньше прочности в образце. Поскольку соотношение указанных прочностей не постоянно, то оно должно устанавливаться для каждого угольного пласта или слоя, а также для любого другого полезного ископаемого. В результате этих испытаний будем иметь для однородных слоев соотношения между характеристиками в массиве и в образце. Например, для прочностей на одноосное сжатие получим соотношение

$$k_R = \frac{R_{обр}}{R_м} . \qquad (2)$$

Аналогичные коэффициенты можно получить и по другим характеристикам пород в массиве и в образце.

Рассмотрим возможность оценки прочности массива с помощью ряда формул, предложенных для учета влияния масшабного эффекта. Для этого используем данные испытаний угольного пласта Полысаевского-1 на шахте "Полысаевская-Северная" в Кузбассе. Пласт довольно однородный, поэтому сопоставимость данных испытаний на кубах разных размеров не вызывает сомнений.

В лаборатории испытания проведены на одноосное сжатие на 30-тонном прессе, а в натурных условиях испытания проведены давильной установкой по методике, описанной в предыдущем параграфе, причем применялись первая и третья схемы испытаний.

Таблица 1

Шахта	Пласт	Глубина от земной поверхности, м	Мощность пласта, м	Особенности строения пласта	Прочность на одноосное сжатие, $кг/см^2$
"Томусинская I-2"	XI	80	I,7-2,2	Содержит 2-3 породных прослойки, из которых I или 2 весьма слабые	35-40
	XII	95	2,2	Однородный	30-4I
	XIII	75	2,4	Однородный	43-62
	III	I00	8,5-I0,0	Содержит от двух и до пяти породных прослойков	Нижн.пачка 20 Средн.пачка74
"Полысаевская-Северная"	Полысаевский-I	65	2,I-2,3	Однородный	69-I05
"Полысаевская-3"	Красноармейский	70	2,4	Однородный	6I
	Инский-I	I00	2,4	Содержит породные прослойки	42-47
"Полысаевская-I"	Надбайкаимский	I30	2,6-2,7	Содержит два породных прослойка	Средн.пачка 42 Нижн.пачка 66
"Полысаевская-I" им. 7 Ноября	Байкаимский	II0 I25	4,6-4,8	Содержит два породных прослойка	Нижн.пачка 75-84 Верх.пачка I62-200
им.Е.Ярославского	Надкуринский-II	70	3,I-3,9	Однородный	54
"Журинка - 3"	Журинский	200	4,7	Однородный	65-75
"Бадаевская-Северная"	2I	I00	0,92	Содержит 2-3 породных прослойка	37-4I
	22	95	I,I-I,2	Содержит I-2 породных прослойка	45-49
	23	60	0,7-I,45	Однородный	25-32
	30	60	2,4-3,6	Однородный	60
	32	40	2,7-3,0	Содержит породные прослойки	60
№ I0 Эстонского месторождения	Слой горючего сланца (пачка В)	40	2,8-3,I	Горючий сланец	I20

Таблица 2

Шахта	Пласт	Средняя прочность на одноосное сжатие, кг/см²		Отношение прочностей $k_R = \frac{R_{обр.}}{R_м}$
		По лабораторным испытаниям, $R_{обр.}$	По натурным испытаниям $R_м$	
Куринка - 3	Куринский	283,0	69,2	4,I
Томусинская I-2	XIII	260,0	52,5	5,0
-"-	III	262,0	73,5	3,6
-"-	XI	I56,0	40,0	3,9
Полысаевская - I	Байкаимский	I52,5	45,7	3,3
им.Е.Ярославского	Надкуринский-II	I80,0	53,3	3,4
Томусинская I-2	XII	88,4	35,5	2,5
Полысаевская-I	Надбайкаимский	II7,5	45,7	2,6
Полысаевская-3	Красноорловский	I30,0	6I,0	2,I

Результаты испытаний оказались следующими:

Размер ребра куба, см	Число испытаний	Среднее значение прочности, кг/см²	Отклонение от среднего значения, %
Лабораторные испытания			
2	5	240	±25
4	5	I73	+34
8	4	I44	+25
Натурные испытания			
24	8	98	±20
48	5	86	±20

Характер изменения прочности угля по этим данным показан сплошной линией на рис.6. Заметим, что результаты натурных испытаний по третьей схеме, т.е. при одной обнаженной плоскости, как уже отмечалось, не зависят от размеров опорной плиты и поэтому прочность куба с размером грани от 25-48 см и выше остается постоянной. На рис.6 построены также графики зависимости прочности куба по формулам Ивенса, Пэмерэя и Биренбаума /8/

$$R_c = A d^{-n}, \qquad (3)$$

Гэдди /9/

$$R_c = A d^{-\frac{1}{2}}, \qquad (4)$$

М.М.Протодьяконова /10/

$$R_c = R_м + \frac{R_m c(m-1)}{d+c}, \qquad (5)$$

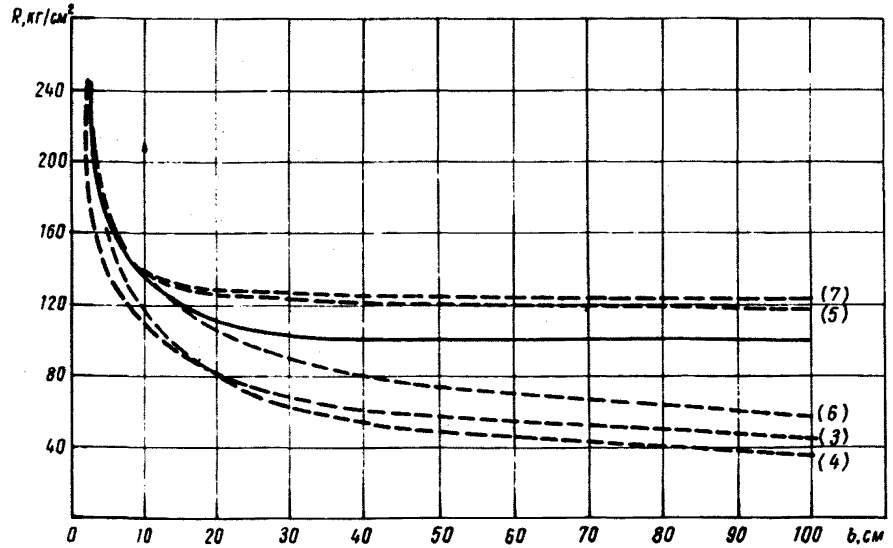


Рис.6. Зависимость прочности кубического образца от его размеров

С.Е. Чиркова /11/

$$R_v = \frac{R'}{\left(\frac{F}{F'}\right)^n}, \qquad (6)$$

автора настоящей работы /12/

$$R_c = A + \frac{B}{d^n}. \qquad (7)$$

В приведенных формулах: A, B и n -постоянные, определяемые из испытаний образцов разных размеров, но одинаковой формы; d - длина ребра испытываемого кубического образца или диаметр цилиндрического образца; R_m - прочность трещиноватого массива; m - коэффициент трещиноватости, показывающий во сколько раз прочность нетрещиноватого материала выше прочности массива; C - постоянная трещиноватости, характеризующая собой расстояние между трещинами; F и F_1 - площади сечений образцов с прочностями соответственно R и R'.

Анализ приведенных на рис.6 данных показывает, что формулы для учета масштабного эффекта, по которым прочность стремится к нулю при бесконечном увеличении размеров блока, дают существенное расхождение с опытными данными. Формулы, предусматривающие существование предельного значения прочности при увеличении размеров блока, дают меньшие расхождения. Этот вывод подтверждается также данными работы /13/. В целом же графики на рис.6 показывают, что оп-

ределение прочности целиков по результатам лабораторных испытаний небольших образцов, с использованием зависимостей для учета масштабного эффекта, не может считаться достаточно надежным без проведения натурных испытаний.

Исходные данные для определения несущей способности целиков необходимо получать путем натурных испытаний по одной из трех рекомендованных схем. Результаты натурных испытаний однородных пластов могут использоваться непосредственно для определения прочности целиков при условно-мгновенном нагружении. Механические свойства, определяемые в лаборатории на образцах горных пород, могут быть использованы в настоящее время только для ориентировочной оценки несущей способности целиков. Знание прочности в образце необходимо в тех случаях, когда натурные испытания осуществить невозможно, а также во всех случаях для оценки степени различия механических свойств отдельных слоев или пачек в образце и в массиве. Лабораторные методы могут быть безусловно рекомендованы для установления функциональных зависимостей.

Для горных пород, в которых расстояния между трещинами значительны и проведение натурных испытаний технически затруднено вследствие необходимости нагружения весьма крупных блоков, основные прочностные характеристики могут определяться, например, по методам Г.Н.Кузнецова /14/ или И.И. Протопопова /15/, а деформационные по К.В.Руппенейту и И.В.Тарасовой /16/. Результаты определений по этим методам должны дополняться специальными опытами на моделях.

Определение коэффициентов сцепления и углов трения может производиться по методике Г.Л.Фисенко и А.М.Мочалова /50/.

Глава III. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ОДНОРОДНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

1. Методика исследований

Для изучения длительной прочности и ползучести горных пород в настоящее время наибольшее распространение получил метод, заключающийся в нагружении ряда одинаковых образцов из одного материала разными по величине постоянными нагрузками, составляющими определенную долю от разрушающей нагрузки при условно-мгновенном нагружении. По данным испытаний устанавливаются параметры ползучести и строятся графики зависимости прочности горной породы от времени (график длительной прочности). Этот метод требует большой длительности испытаний (месяцы, годы) и значительного количества образцов.

Стремление снизить трудоемкость экспериментов по установлению длительной прочности горных пород привело к созданию ряда упрощенных способов, требующих меньшего числа образцов и продолжительности опытов. Был применен метод ступенчатого нагружения /17/, разработан ускоренный вибрационный метод, предложенный Ю.М.Карташовым /18/, а в 1966 г. опубликована упрощенная методика испытаний грунтов на длительную прочность и ползучесть, предложенная С.С.Вяловым /19/.

Я.А.Бич и А.Н.Ставрогин /20/ разработали метод и аппаратуру для изучения ползучести и длительной прочности в натурных условиях при одноосном и всестороннем нагружении крупных блоков горных пород. Принципиальных отличий от лабораторных методов он не имеет, однако требует сложного оборудования, больших трудовых затрат и длительных испытаний.

Считая, что исследования горных пород на длительную прочность и ползучесть на образцах являются более результативными, чем натурные методы, в настоящей работе принят наиболее простой, как нам представляется, лабораторный метод С.С.Вялова. На образцах горных пород устанавливаются функциональные зависимости, а для переноса их на реальные целики делается корректировка исходных данных на основе сопоставления результатов испытаний образцов и натурных исследований.

Сущность способа исследований образцов на длительную прочность и ползучесть по С.С.Вялову /19/ заключается в следующем. Нагрузка на образец передается через упругий элемент-динамометр путем его натяжения, после чего положение динамометра закрепляется. В образце развиваются деформации

ползучести, обусловливающие разжатие динамометра и падение в нем напряжений, а следовательно и уменьшение напряжений в образце. Снижение напряжений в образце происходит до тех пор, пока деформация его не стабилизируется и не наступит состояние равновесия между нагрузкой и внутренними силами сопротивления в образце. При задании начального напряжения в образце близким к его условно-мгновенной прочности стабилизация деформаций будет соответствовать предельному равновесному состоянию, а конечное напряжение - пределу длительной прочности.

Такие испытания при неизменной общей высоте образца и динамометра, после первоначального натяжения динамометра, т.е. при условии, что

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'' = const \qquad (8)$$

где ε' и ε'' - относительные деформации динамометра и образца, можно рассматривать как испытания на ползучесть под воздействием изменяющегося во времени напряжения или на релаксацию при изменяющейся деформации. Изменения напряжения и деформации взаимозависимы и обусловлены реологическими свойствами материала образца.

Для определения предела длительной прочности нужно провести испытание одного образца при первоначальной нагрузке, близкой к разрушающей. Предварительно определяется прочность образцов при условно-мгновенном нагружении. Для получения характеристик ползучести производится длительное испытание при любом начальном напряжении, но не меньшем 0,5 от разрушающего, поскольку при меньшем начальном напряжении нарушается пропорциональность между ним и напряжением в данный момент времени. При одновременном испытании на длительную прочность и ползучесть для определения характеристик ползучести используются данные испытаний на длительную прочность при начальном напряжении 0,9–0,95 от разрушающего и кроме того проводятся контрольные испытания при другом начальном напряжении, как правило, равном 0,7–0,8 от разрушающего.

Принципиальная схема испытаний по этому методу сводится к следующему (рис.7). На станине 1 смонтированы винтовое нагрузочное устройство 3 и динамометр 2 типа ДОСМ, на который устанавливается образец 4, а также индикаторы часового типа 5 и 6 с ценой деления 0,01 мм для измерения деформаций образца. После задания с помощью устройства 3 нагрузки на образец 4 динамометр и образец работают как одна система при неизменной общей высоте в течение всего

периода испытаний.[x)]

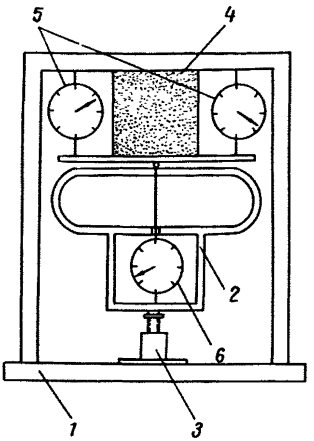


Рис.7. Схема установки для испытаний образцов на длительную прочность и ползучесть по методу С.С.Вялова

При таком способе испытаний в системе динамометр-образец первый элемент подчиняется закону Гука, а второй-некоторому закону ползучести, который в общем виде можно записать так:

$$\sigma(t) = \varphi(\varepsilon'')\,\psi(t), \qquad (9)$$

где $\sigma(t)$ - изменяющиеся напряжения в образце; $\varphi(\varepsilon'')$ - функция, характеризующая зависимость между напряжениями и относительной деформацией образца ε'' при условно-мгновенном нагружении образца ($t = 0$), $\psi(t)$ - функция, характеризующая развитие деформаций образца во времени (функция ползучести).

Вид функции $\varphi(\varepsilon'')$ может быть определен по данным начального загружения образца или по данным испытаний на условно-мгновенную прочность. Наиболее вероятным видом этой функции согласно работе /19/ является степенная зависимость

$$\varphi(\varepsilon'') = A_0\,(\varepsilon'')^m, \qquad (10)$$

где A_0 - коэффициент начальной деформации материала образца; m - коэффициент его упрочнения.

Выражение для функции ползучести из (9) с учетом (10) будет иметь вид

$$\psi(t) = \frac{\sigma(t)}{\varphi(\varepsilon'')} = \frac{\sigma(t)}{A_0(\varepsilon'')^m} = \frac{A(t)}{A_0}, \qquad (11)$$

где $A(t) = \frac{\sigma(t)}{(\varepsilon'')^m}$ - изменяющийся во времени коэффициент де-

---

x) В 1966 г. автор опробовал данный метод при длительных испытаниях на изгиб и совместно с горн.инженером А.Н.Златицким разработал установку, изображенную на рис.7. Исследования применительно к вопросам длительной прочности и ползучести целиков выполнялись в 1967-1969 гг. совместно с аспирантом Г.А.Ивановым. Способ испытаний,подобный методу С.С.Вялова, был применен Г.Л.Фисенко и опубликован в 1956г. в работе /21/.

формации материала образца.

Если коэффициент упрочнения $m = 1$, то A_0 и $A(t)$ принимают, соответственно, значения модуля линейной деформации E_0 и изменяющегося во времени модуля деформации $E(t)$. В этом случае выражения (10) и (11) перепишутся так:

$$\varphi(\varepsilon'') = E_0 \varepsilon'' \tag{12}$$

$$\psi(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0 \varepsilon''} = \frac{E(t)}{E_0}. \tag{13}$$

Конечная величина напряжений в образце при его испытании будет зависеть от жесткости динамометра. Истинное значение предела длительной прочности соответствует конечному напряжению при бесконечно жестком динамометре, при котором деформация последнего равна нулю, а образца - постоянна и равна его начальной деформации ε''. В этом случае уравнение (11) принимает вид

$$\psi(t) = \frac{\bar{\sigma}(t)}{A_0(\varepsilon'')^m} = \frac{\bar{\sigma}(t)}{\sigma_0}, \tag{14}$$

где $\bar{\sigma}(t)$ - изменяющиеся во времени напряжения в образце при бесконечно жестком динамометре; $\sigma_0 = A_0(\varepsilon'')^m$ - начальные напряжения в образце.

Из (11) и (14) получим

$$\bar{\sigma}(t) = \sigma(t)\frac{\sigma}{A_0(\varepsilon'')^m} = \sigma(t)\frac{A_0(\varepsilon_0'')^m}{A_0(\varepsilon'')^m} = \sigma(t)\left(\frac{\varepsilon_0''}{\varepsilon''}\right)^m. \tag{15}$$

Из последнего выражения предел длительной прочности будет равен

$$R_\infty = \sigma_K\left(\frac{\varepsilon_0''}{\varepsilon''}\right)^m, \tag{16}$$

где σ_K и ε_K'' - конечные напряжения и деформации образца, полученные при испытаниях с гибким динамометром и соответствующие стабилизированному состоянию.

При $m = 1$ выражение (16) принимает вид

$$R_\infty = \sigma_K \frac{\varepsilon_0''}{\varepsilon_K''}. \tag{17}$$

Значение коэффициента упрочнения m и A_0 в соответствии с /19/ могут быть определены из результатов испытаний образцов при двух разных начальных напряжениях, по выражениям

$$m = \frac{\ln \frac{\lambda_1'}{\lambda_2'}}{\ln \frac{\lambda_1''}{\lambda_2''}}, \quad A_0 = \frac{\sigma_0}{(\varepsilon_0'')^m},$$

где λ_1' и λ_2' – развивающиеся во времени абсолютные деформации динамометра и образца при первом испытании; λ_1'' и λ_2'' – то же при втором испытании. Поскольку переменное значение m значительно усложняет расчеты, целесообразно принимать его постоянным, если изменение не превышает 20%.

Для определения вида функции ползучести $\psi(t)$, которая необходима при вычислении деформаций ползучести, рассчитываются значения этой функции для различных моментов времени t_i по формуле (11) или (13), куда подставляются полученные из опыта значения $\sigma(t)_i$ и ε_i'', а также установленные значения m, A_0 или E_0. По данным вычислений строятся графики в координатах $\psi(t) - t$. На этот же график наносят и результаты контрольных испытаний при другом уровне начального нагружения, обработанные тем же способом. Вид функции ползучести определяется подбором эмпирической зависимости.

Для определения длительной прочности, $R(t)$, т.е. прочности, для любого заданного момента времени, в работе /19/ предлагается пользоваться следующей формулой

$$R(t) = \frac{\beta}{\ln \frac{t+1}{B}}, \qquad (18)$$

где β (кг/см^2) и B (часы или минуты) – параметры, определяемые по опытным данным, а t и 1 (часы или минуты) – время.

Значение R_∞ при $t = \infty$ получаем по формуле (18) равным нулю. Поэтому при определении предела длительной прочности С.С.Вялов /19/ рекомендует принимать значение $t_\infty = (100 \cdot B^{-0,05})^{1/0,95}$, где B – количество часов или лет. Это значение t_∞ получено из условия, что истинное значение предела длительной прочности меньше на 5%, чем вековая прочность.

По известным действующим напряжениям σ из выражения (18) можно определить долговечность целика:

$$t = Be^{\frac{\beta}{R(t)}} \qquad (19)$$

в котором $R(t) = \sigma$

Вид функции ползучести может приниматься по следующему выражению

$$\psi(t) = \frac{1}{1 + \frac{A}{\xi} t^{\alpha}} \qquad (20)$$

где ξ – параметр, имеющий размерность (кг/см^2) $\cdot$час$^{\alpha}$; α – безразмерный параметр; t – время в часах, минутах. При $m = 1$, $A_0 = E_0$ и выражение (20) принимает вид

$$\psi(t) = \frac{}{1 + \frac{E_0}{\xi} t^{\alpha}}, \qquad (21)$$

в котором ξ - имеет размерность кг/см^2 , час$^{\alpha}$

В работе /19/ указываются и другие возможные виды функции ползучести, включая случай установившегося пластично-вязкого течения с примерно постоянной скоростью.

2. Результаты исследований

По описанной выше методике были проведены испытания образцов из известняка, горючего сланца, угля, плотной глины, алевролита. Образцы изготовлялись цилиндрической формы диаметром 3 см и такой же высоты.

Для определения условно-мгновенной прочности предварительно было испытано по четыре образца из каждой серии. Испытания при быстром нагружении проводились на прессе с автоматической записью диаграммы нагрузка-деформация, что позволяло определить функцию $\varphi(\varepsilon'')$.

Длительные испытания осуществлялись на двух образцах от каждой серии. Причем один образец нагружался начальной нагрузкой P равной 0,9, а второй - 0,7 от разрушающей нагрузки P_0 при условно-мгновенном испытании. Перед загружением каждый образец предварительно подвергался обжатию. Испытания проводились при комнатной температуре (18-20°С) и влажности.

В процессе испытаний измерялись начальные абсолютные деформации динамометра λ_0' и образца λ_0'' , а также последующие их деформации λ' и λ'' через каждый час в течение первых 6-7 часов после загружения и далее через сутки. Образцы выдерживались под нагрузкой, пока суточное приращение относительной деформации становились не более $(1-1,5).10^{-4}$, что во времени составляло 3-6 сутог. По данным измерений деформаций динамометра вычислялись по тарировочным графикам напряжения $\sigma(t)$ для различных моментов времени, абсолютные деформации образца λ'' пересчитывались в относительные ε''

По данным опытов при условно-мгновенном нагружении построены графики зависимости деформаций от напряжений (рис.8). Анализ графиков показывает, что примерно до нагрузки 0,9-0,95 от разрушающей с достаточной степенью точности можно принимать линейную зависимость между нагрузкой и деформацией. Из этого следует, что вид функции $\varphi(\varepsilon'')$ соответствует выражению (12), т.е. величина коэффициента упрочнения m в указанном интервале нагрузок равна единице. Таким образом, коэффициент начальной деформации A_0 и изменяющийся во времени коэффициент деформации $A(t)$ принимают соответственно значения модуля линейной деформации E_0 и изменяющегося во времени модуля деформации $E(t)$.

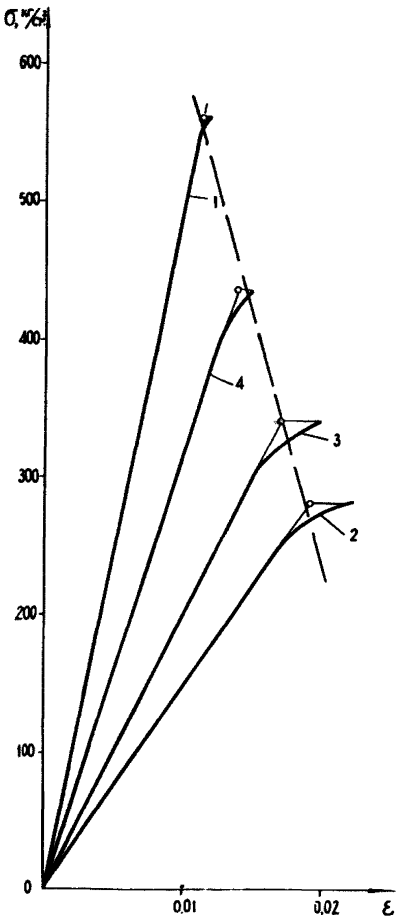


Рис.8. Графики "напряжение - деформация" при условно-мгновенном нагружении: -однородные образцы из известняка - 1 и горючего сланца - 2; неоднородные образцы из известняка и горючего сланца - 3 и 4 соответственно при $\frac{h_c}{h}$=1/2; 1/4

Усредненные показатели прочностей и модулей линейной деформации при условно-мгновенном нагружении приведены в табл.3.

Для определения характеристик длительной прочности и ползучести испытывалось по два образца из каждой серии, один из которых, как уже указывалось, загружался начальной нагруз-

Таблица 3

Показатели	Наименование пород				
	Уголь	Глина	Алевролит	Известняк	Горючий сланец
R_0, кг/см^2	I80	I00	755	560	280
R_∞, кг/см^2	I34	44	444	389	I66
β, кг/см^2	8900	II86	I6800	20900	6380
B, час	$3,I6.I0^{-22}$	$6,92.I0^{-6}$	$2,24.I0^{-I0}$	$6,30.I0^{-I7}$	$I,26.I0^{-I0}$
E_0, $I0^{-4}$кг/см^2	I,20	0,50	6,I6	5,I5	I,48
ξ $.I0^{-4}$кг/см^2 . час$^\alpha$	I9	I,8	44	2,8	5,8
α	0,25	0,25	0,25	0,I5	0,I5
$\frac{R_\infty}{R_0}$	0,74	0,44	0,59	0,70	0,59
$\frac{E_0}{\xi}$, час$^{-\alpha}$	0,083	0,277	0,I40	0,I83	0,256

кой, составляющей 0,9 от разрушающей, а второй – нагрузкой 0,7 от разрушающей. По результатам опытов строились графики изменения напряжений в образцах (рис.9) и их деформаций (рис.10). Предел длительной прочности определялся по данным испытаний образцов под начальной нагрузкой 0,9 от разрушающей, а контрольные образцы испытывались для уточнения функции ползучести.

По этим графикам определялись конечные напряжения и начальные и конечные деформации и с помощью формулы (17) вычислялись пределы длительных прочностей. Результаты этих вычислений даны в табл.3, где приведены прочности при условно-мгновенном нагружении, а также отношения пределов длительных прочностей к условно-мгновенным прочностям.

В этой же таблице даны значения параметров β и B, вычисленные обратными расчетами по формуле (18), исходя из опытных R_∞ и условно принимая, что последние на 5% меньше вековой прочности. Имея данные о параметрах β и B, по формуле (18) можно рассчитать длительную прочность материала для любого заданного момента времени.

Для расчета функций ползучести в формулу (13) подставляются напряжения, действовавшие в образце в различные моменты времени. Эти напряжения снимаются с графиков, приведенных на рис.9, а соответствующие им деформации – на рис.10. Модули линейной деформации принимались по результатам испытаний при быстром нагружении. По рассчитанным значениям функции ползучести строятся графики. Примеры таких графиков показаны на рис.11 и 11а (штриховыми линиями показаны данные опытов: 1 – при начальной нагрузке 0,9 от разрушающей, а 1^1 – при начальной нагрузке 0,7). Анализ опытных графиков показал, что значения функций ползучести

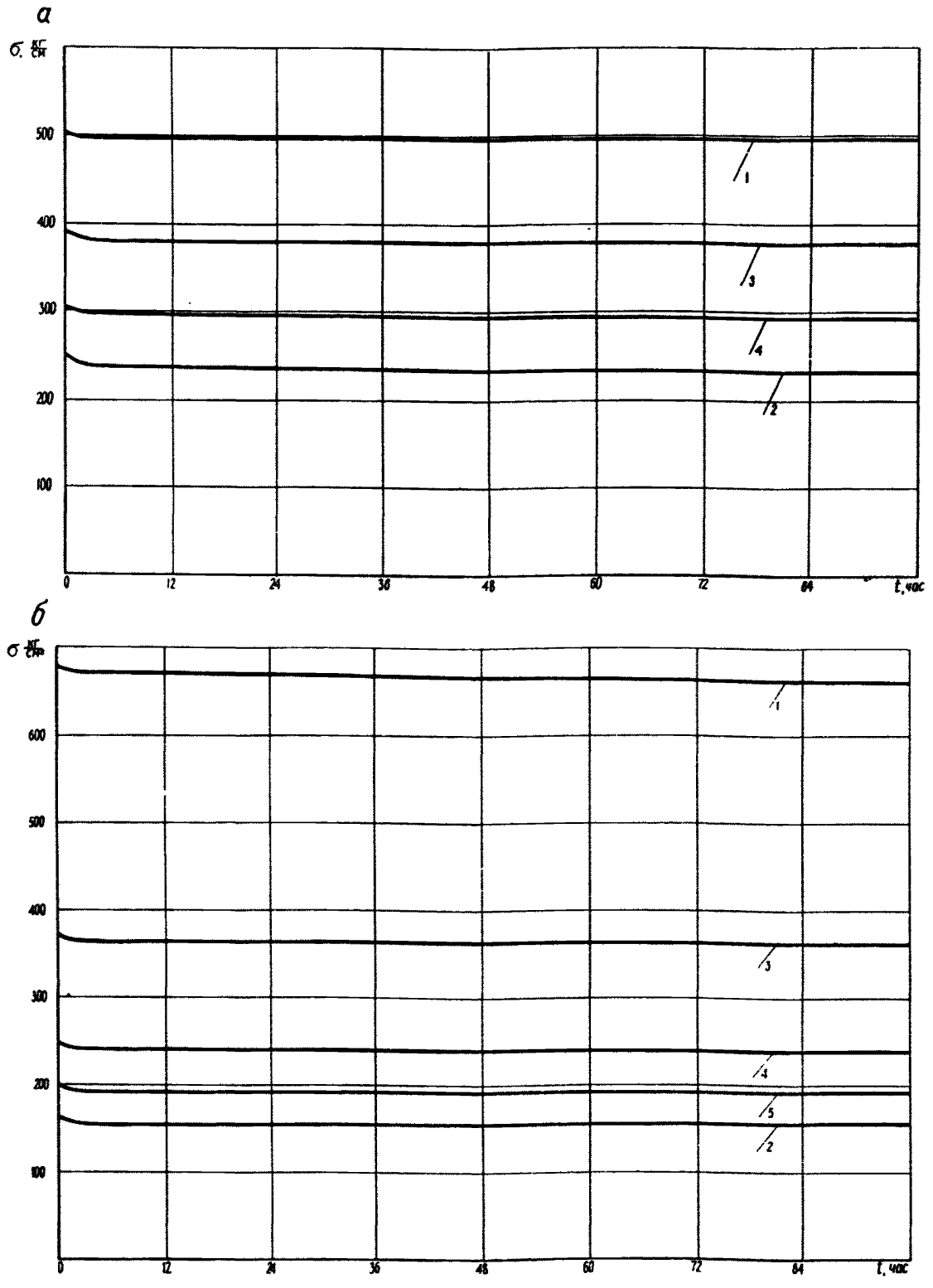


Рис.9. Изменения напряжений во времени:
а - однородные образцы из известняка - 1 и горючего сланца - 2, неоднородные образцы из известняка и горючего сланца - 3 и 4 соответственно при h_c/h = 1/4 и 1/2 ; б - однородные образцы из алевролита и угля 3, 4 и 5 соответственно при h_c/h = 1/4, 1/2 и 3/4

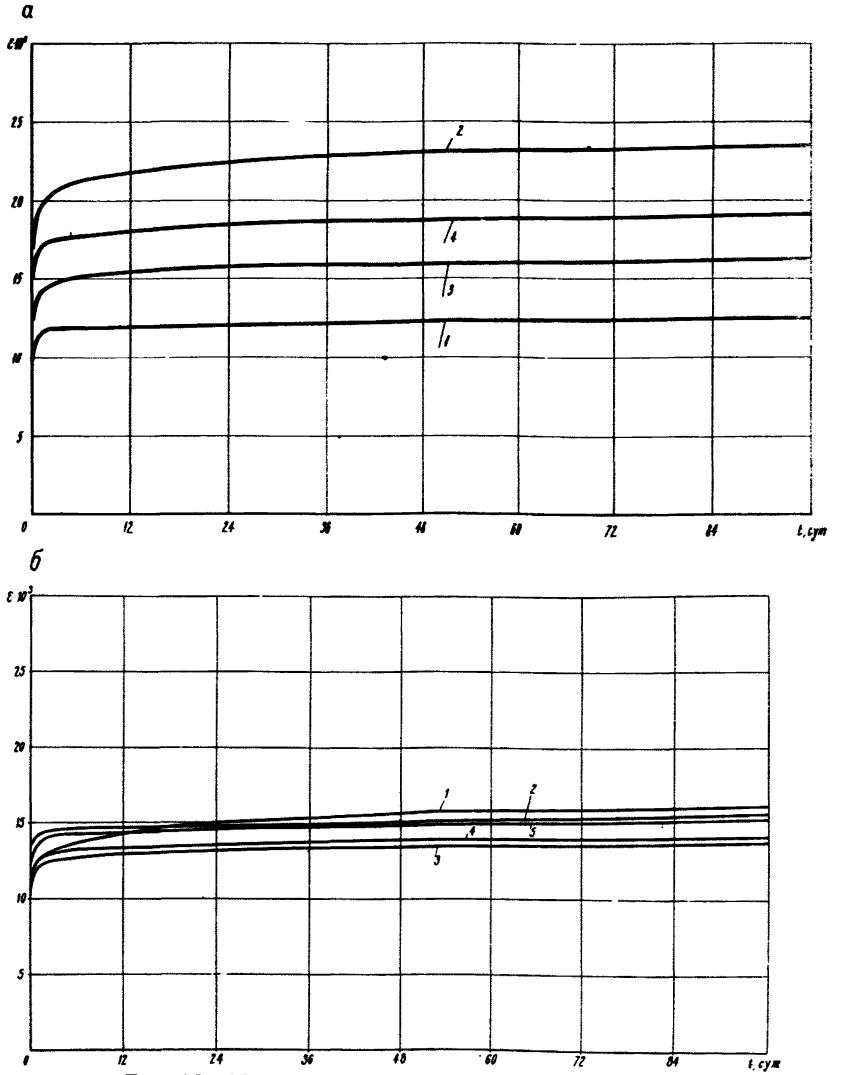


Рис.10. Изменение деформаций во времени:
а – однородных образцов из известняка – 1 и горючего сланца – 2, неоднородные образцы из известняка и горючего сланца – 3 и 4 соответственно при h_c/h = 1/4 и 1/2 ; б – – однородные образцы из алевролита – 1 и угля – 2, неоднородные образцы из алевролита и угля – 3, 4 и 5 соответственно при h_c/h = 1/4, 1/2 и 3/4

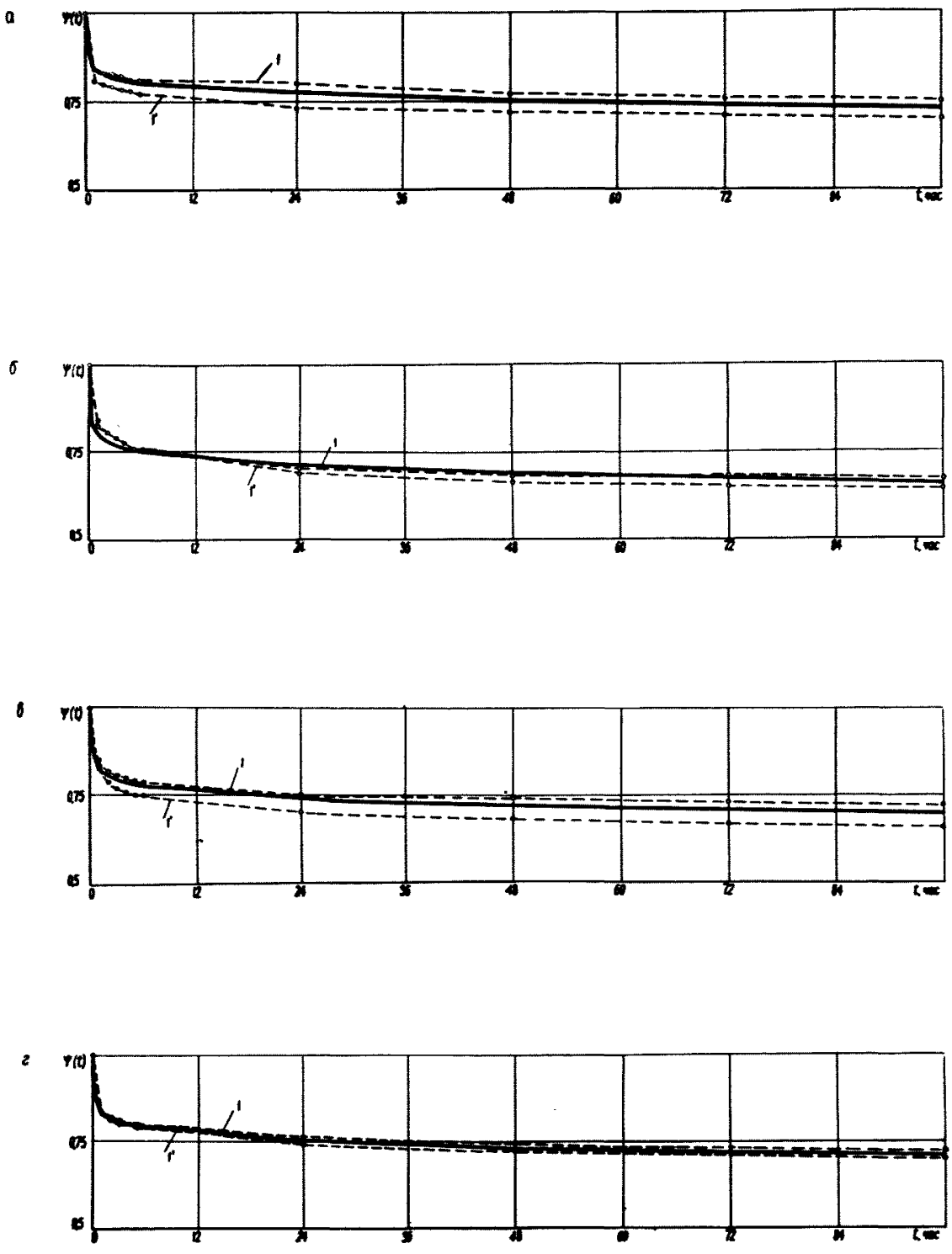


Рис.11. Графики функций ползучести однородных образцов из известняка (а) и из горючего сланца (б) ; неоднородных образцов из известняка и горючего сланца (в) и (г) соответственно при h_c/h = 1/4 и 1/2

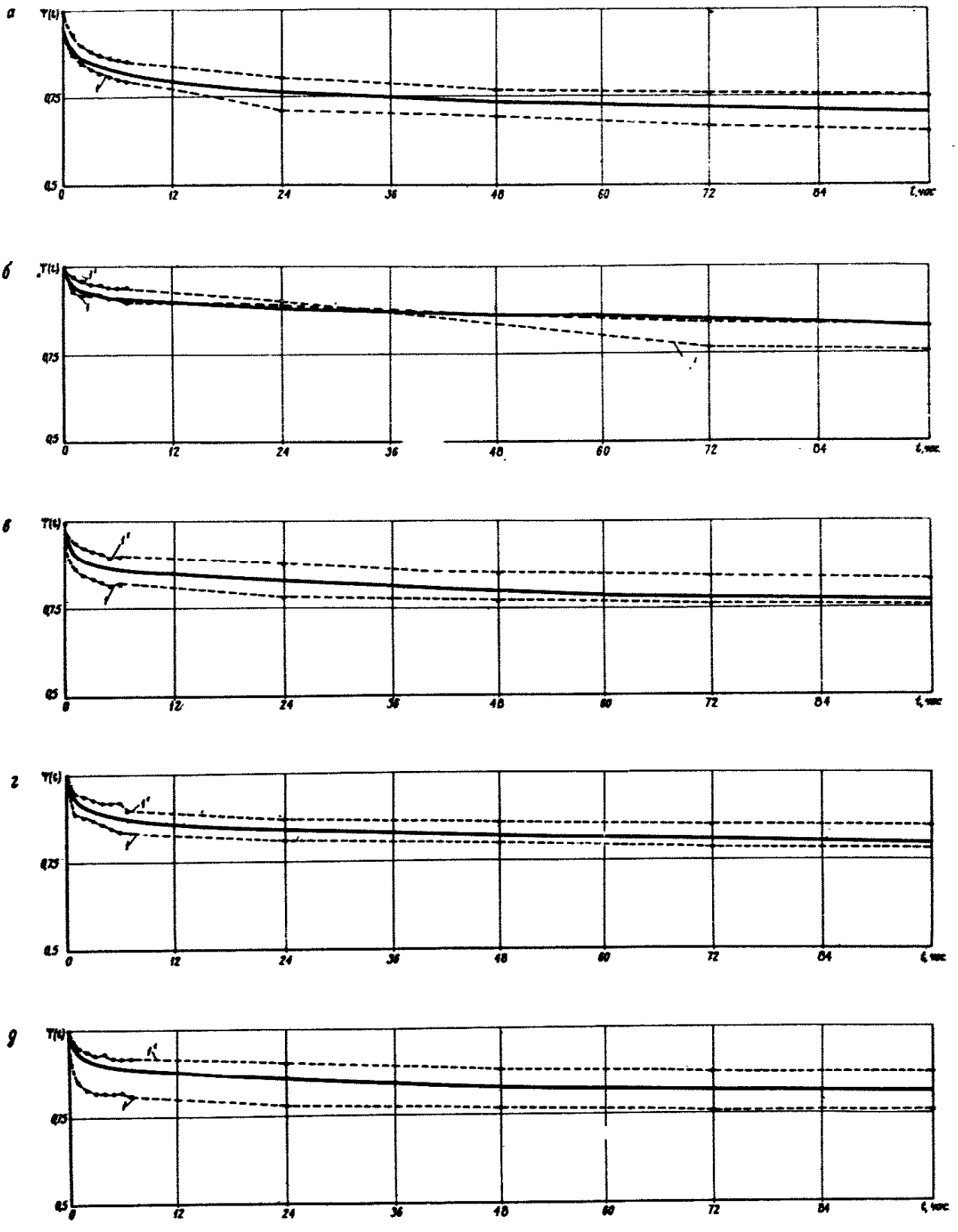


Рис.11,а. Графики функций ползучести однородных образцов из алевролита (а) и из угля (б); неоднородных образцов из алевролита и угля (в), (г) и (д) соответственно при h_c/h = = 1/4, 1/2 и 3/4

при двух различных уровнях нагружения мало отличаются. Максимальные отклонения функций ползучести не превышают +20% и −8,5% для всех испытанных материалов, средние отклонения находятся в пределах $\pm$ (5 ÷ 10) %. На этом основании можно утверждать, что кривые ползучести для разных уровней начального нагружения взаимно подобны, а функции ползучести идентичны, что подтверждает правильность установленного вида функции $\varphi(\varepsilon'')$ и неощутимую изменяемость коэффициента упрочнения m. Подходящим видом функции ползучести в проведенных опытах оказалось уравнение (21).

Для вычисления параметров ξ и α, уравнение (21) логарифмировалось и преобразовалось к виду

$$\lg \frac{1-\psi(t)}{E_0\,\psi(t)} = \lg \frac{1}{\xi} + \alpha \lg t,$$

в которое подставлялись значения времени t, соответствующие значения $\psi(t)$, рассчитанные по формуле (13) по данным опытов, и значения E_0. Результаты вычислений наносились на графики в логарифмеческих координатах $\lg \frac{1-\psi(t)}{E_0\,\psi(t)}$ – $\lg t$. При построении этих графиков, пример которых приводится на рис.12, точки ложились вблизи прямой линии, что сви-

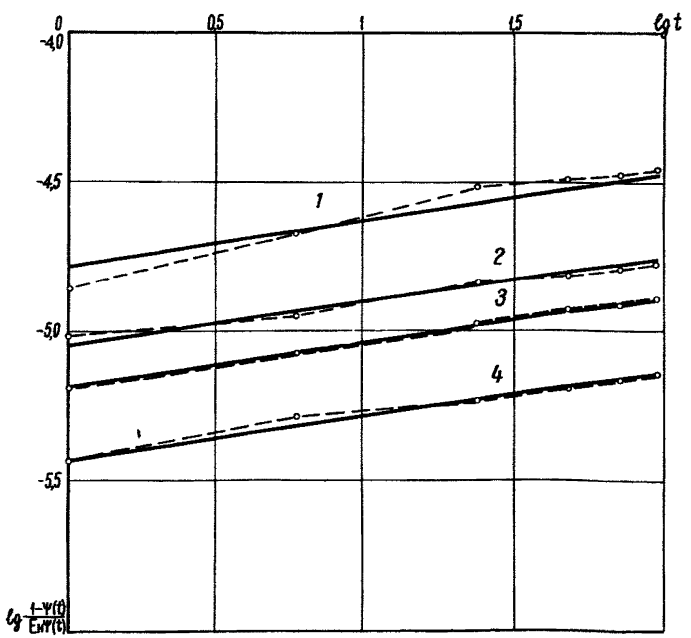


Рис.12. К определению параметров функций ползучести: 1-горючий сланец; 2-известняк-сланец при $\frac{h_c}{h} = \frac{1}{2}$; 3-известняк-сланец при $\frac{h_c}{h} = \frac{1}{4}$; 4 - известняк

детельствует о применимости уравнения (21) для описания функции ползучести. По графикам находятся параметры ξ и α : параметр α соответствует углам наклона полученных прямых, а отрезки по оси ординат - $\lg\frac{1}{\xi}$. Определенные таким способом значения параметров даются в табл.3. На рис.11 и 11,а даны графики функций ползучести: штриховые линии - по данным опытов, сплошные линии - расчетные по (21), исходя из полученных значений ξ и α .

Чтобы судить о представительности результатов, получаемых по упрощенной методике, сопоставим их с соответствующими данными, установленными другими авторами.

Учитывая, что $E_{(t)}=\frac{\sigma(t)}{\varepsilon}$ и $E_0=\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$, из уравнения (21) определится зависимость между напряжениями и деформациями образца при изменяющейся во времени нагрузке

$$\varepsilon=\frac{\sigma(t)\varepsilon_0}{\sigma_0}+\frac{\sigma(t)}{\xi}t^{\alpha}, \qquad (22)$$

где ε - изменяющаяся во времени относительная деформация образца; $\sigma(t)$ - изменяющиеся во времени напряжения; ε_0 и σ_0 - начальные соответственно относительная деформация и напряжения в образце.

Если образец нагружен постоянной нагрузкой, тогда $\sigma(t)=\sigma_0=\sigma=const$ и выражение (22) принимает вид

$$\varepsilon=\varepsilon_0+\frac{\sigma}{\xi}t^{\alpha}=\varepsilon_0\left(1+\frac{E_0}{\xi}t^{\alpha}\right). \qquad (23)$$

Выражение (23) соответствует зависимости, предложенной Ж.С.Ержановым /22/ в следующем виде

$$y(t)=y+y\frac{\delta}{1+\alpha'}t^{1-\alpha'}, \qquad (24)$$

где $y(t)$ - изменяющаяся во времени относительная деформация ползучести; y - мгновенная (начальная) деформация; δ, $сек^{\alpha-1}$ и α' - параметры; t - время в сек. Размерность величин в формуле (23) следующая: t - в часах; E_0 в кг/см^2; ξ в кг/см^2.час$^{\alpha}$.

Формулу (24) можно преобразовать в формулу (23), если принять

$$\alpha=1-\alpha' \quad и \quad \frac{2E_0}{3600^{\alpha}\xi}=\delta \qquad (25)$$

Сравним значения параметров ползучести для алевролита и угля Кузбасса /30/, полученные в наших опытах, с результатами других исследователей, для чего по формуле (25) пересчитаем параметры α и ξ в параметры α' и δ Пересчет дает: для алевролита $\alpha'=0{,}750$; $\delta=0{,}0045$; для угля $\alpha'=0{,}75$; $\delta=0{,}0021$.

В табл.4 приведены параметры ползучести, полученные разными авторами, а также включены данные, полученные при

Таблица 4

Автор	Бассейн	Наименование пород			
		Алевролит		Уголь	
		α'	δ	α'	δ
Ж.С.Ержанов /22/	Донбасс	0,684 ± ± 0,750	0,0070 ± ± 0,0149		
Г.Н.Гуменюк /23/	Караганда	0,664 ± ± 0,705	0,0031 ± ± 0,0041	0,722 ± ± 0,800 x)	0,0030 ± ± 0,0043
В.П.Матвеева /24/	Донбасс			0,675 ± ± 0,760 x)	0,00566± ± 0,0157
А.Д.Манасевич /25/	Кузбасс			0,732 ± ± 0,780	0,00335± ±0,00510
Наши опыты	Кузбасс	0,750	0,0045	0,750	0,0021

длительных испытаниях на изгиб (отмечены звёздочкой), поскольку параметры ползучести при сжатии и изгибе весьма близки между собою /17, 22, 23 и др./.

Как видно из табл.4, параметры ползучести, полученные нами упрощенным методом, находятся в тех же пределах что и полученные другими авторами по более точному методу. Идентичность формул (23) и (24) и достаточно удовлетворительная сходимость параметров ползучести, дают основание считать, что принятая нами методика исследований горных пород на динамометрическом приборе вполне приемлема и позволяет получать данные более быстро и менее трудоемко, чем общепринятая методика испытаний на ползучесть при постоянной нагрузке.

Сопоставление и анализ данных, полученных на образцах, рассматриваемых как модели целиков, и результатов шахтных измерений деформирования однородных целиков во времени под действием постоянной нагрузки показывает, что значения параметров ползучести α и отношение $\frac{E_0}{\xi}$, установленные на образцах, оказываются справедливыми для целиков. Поскольку длительная прочность целиков неразрывно связана с характером ползучести, то получаемые в лаборатории закономерности изменения и степень снижения прочности образцов во времени сохраняются и для целиков из одной и той же породы. Отсюда следует, что предел длительной прочности целика во столько раз будет меньше его условно-мгновенной прочности, во сколько раз предел длительной прочности образца меньше его условно-мгновенной прочности. Зная условно-мгновенную прочность целика по натурным испытаниям и указанное соотношение, можно определить для массива параметры β и B по по формуле (18), после чего получаем возможность определять прочность массива для любого заданного момента времени или его долговечность.

Глава 1У. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

1. Исследование прочности при условно-мгновенном режиме нагружения

Рассмотрим методы и результаты исследований характера изменения прочности на сжатие при наличии следующих видов неоднородности: разнопрочность слоев, наличие рассеянных включений с прочностью отличной от основного материала целика, наличие пластичных прослойков.

Характер изменения прочности целиков, состоящих из разнопрочных слоев исследовался на моделях из эквивалентных материалов /26/. Из песчано-парафиновых смесей было изготовлено восемь моделей (рис.13).

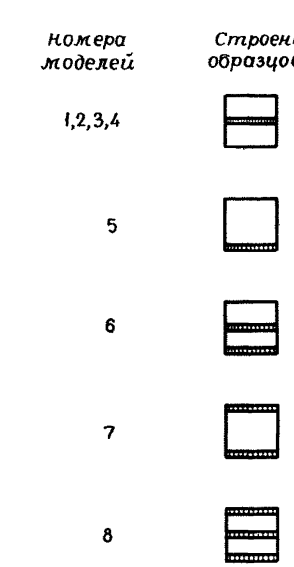


Рис.13.Строение моделей неоднородных целиков. Вертикальной штриховкой показан слабый слой

Каждая модель по длине состояла из отдельных участков, толщина слабых слоев в которых изменялась от нуля до полной высоты модели. В модели 4 границы между слабым и крепким материалами пересыпались молотой слюдой, в остальных это не делалось. В каждой из моделей,независимо от числа слабых слоев, применялись только два различных по прочности материала. Из каждого участка одной модели изготовлялось от 3 до 6 кубических образцов (моделей целиков)с размером грани 8 см. Кроме того, из некоторых моделей были изготовлены также образцы с размерами основания 4х4 и 4х8 см при высоте 8 см. Испытания образцов на сжатие производились на специальном прессе лаборатории моделирования ВНИМИ, который обеспечивал автоматическую запись нагрузок и деформаций. Скорость нагружения составляла 0,012 мм/сек. При испытании каждого образца устанавливалась разрушающая нагрузка и зависимость деформации от нагрузки. Всего было испытано 275 образцов, из них 191 - размером 8х8х8 см, 64 - размером 4х4х8 см и 24 - размером 4х8х8 см.

По данным отдельных испытаний образцов из отдельных участков моделей вычислялись пределы прочности, а по отдельным испытаниям - средние значения предела прочности. Отклонения пределов прочности по отдельным опытам с кубиковыми образцами от средних значений составляли, как правило, не более 10%. Для каждой модели по средним значениям вычислялись отношения пределов прочности образцов по отдельным участкам модели R к пределу прочности однородного образца из крепкого материала R_1. Определялся также по каждой модели предел прочности наиболее слабого материала R_2. Толщина слабых слоев характеризовалась отношением толщины слабого слоя h_c или суммы слабых слоев $\sum_1^n h_c$ к полной высоте образца h. Результаты обработки данных испытаний приведены в табл.5.

Таблица 5

Номер модели	Показатели	Отношение суммарной толщины Σh_c слоев к высоте образца h								
		0,0	I/I6	I/8	3/I6	I/4	3/8	I/2	3/4	I,0
I	R, кг/см^2	6,29	4,85	3,77		2,06		I,56		I,25
	$\frac{R}{R_1}$	I,00	0,77	0,60		0,33		0,25		0,20
2	R, кг/см^2	I,38	I,05	0,93		0,90		0,86		0,75
	$\frac{R}{R_1}$	I,00	0,76	0,68		0,65		0,62		0,54
3	R, кг/см^2	8,50	5,6I	5,3I		4,64		2,97		I,60
	$\frac{R}{R_1}$	I,00	0,66	0,62		0,54		0,36		0,I9
4	R, кг/см^2	3,08	2,55	2,04		0,96		0,75		0,53
	$\frac{R}{R_1}$	I,00	0,83	0,66		0,3I		0,24		0,I7
5	R, кг/см^2	3,90	3,50	2,77		2,09		0,78		0,6I
	$\frac{R}{R_1}$	I,00	0,90	0,7I		0,54		0,20		0,I6
6	R, кг/см^2	5,I4		4,4I		3,7I		2,74		0,86
	$\frac{R}{R_1}$	I,00		0,86		0,72		0,53		0,I7
7	R, кг/см^2	5,7I		4,42		4,67		I,4I	I,24	0,70
	$\frac{R}{R_1}$	I,00		0,77		0,82		0,25	0,22	0,I2
8	R, кг/см^2	4,96			3,65		2,92		I,8I	0,87
	$\frac{R}{R_1}$	I,00			0,74		0,59		0,34	0,I8

Анализ полученных данных показал следующее. Прочность образцов зависит от соотношения прочностей крепких и слабых пачек и от их толщины. Чем больше толщина слабой пачки и чем меньше ее прочность, тем в большей степени снижается прочность образца. При этом положение слабой пачки по высоте образца существенного влияния на его прочность не оказывает. В зависимости от толщины и прочности пачек, изменение

прочности неоднородного образца может быть по предложению автора описано выражением

$$\frac{R}{R_1} = \frac{1}{1+\left(\frac{R_1}{R_2}-1\right)\frac{h_c}{h}}. \qquad (26)$$

Как видно из рис.14, это выражение дает завышенные зна-

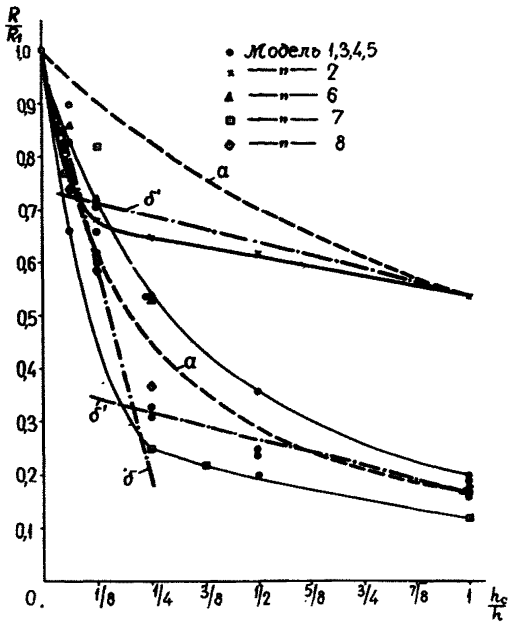


Рис.14. Характер изменения прочности моделей неоднородных целиков: а-кривые построены по $\frac{R}{R_1} = \frac{1}{1+\left(\frac{R_1}{R_2}-1\right)\frac{h_c}{h}}$

б- то же, по $\frac{R}{R_1} = 1 - 3{,}12x$;

б - то же, по $\frac{R}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} + 0{,}2(1-x)$.

чения в области начала выполаживания кривых, особенно для образцов, содержащих один слабый слой и при небольшом отношении $\frac{R_2}{R_1}$

Изменение прочности образцов может быть также описано двумя линейными уравнениями (см.рис.14):

$$\frac{R}{R_1} = 1 - 3{,}2x; \quad \frac{R}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} - 0{,}2(1-x), \qquad (27)$$

где $x = \frac{h_c}{h}$.

Значение $\frac{h_c}{h}$, удовлетворяющее обоим уравнениям (27) при $x = 0$, лежит в области начала выполаживания экспериментальных кривых и равно $x = \frac{0{,}8 - R_2/R_1}{0,}$

Первое из уравнений (27) справедливо при $x = \frac{h_c}{h} \leq 0$, а второе – при $x = \frac{h_c}{h} \geq 0$. Очевидно, что уравнения (27) применимы только при $\frac{R_2}{R_1} < 0{,}8$.

Как видно из табл.6, отклонение расчетных показателей от средних опытных по моделям 1,3–8, в которых $\frac{R_2}{R_1} = 0{,}17$, составляют от – 7,5 до + 11,5% по выражению (26) и от – 21,8 до + 3,8% по выражению (27). Для модели 2, т.е. при $\frac{R_2}{R_1} =$ = 0,54, отклонение показателей по первой формуле достигает +33,8% а по второй – +6,1%.

Таблица 6

Показатели	Отношение толщины слабого слоя к высоте образца, h_c/h					
	0	I/I6	I/8	I/4	I/2	I
I	2	3	4	5	6	7
По данным моделей I,3–8						
Относительная прочность образца $(\frac{R}{R_1})$:						
По опытам	I,00	0,79	0,67	0,4I	0,26	0,I7
По формуле (26)	I,00	0,77	0,62	0,45	0,29	0,I7
По формуле (27)	I,00	0,80	0,6I	0,32	0,27	0,I7
Отклонение в % расчетных показателей прочности от опытных:						
По формуле (26)	0,0	–2,5	–7,5	+9,8	+II,5	0,0
По формуле (27)	0,0	+I,3	–9,0	–2I,8	+ 3,8	0,0
По данным модели 2						
Относительная прочность образца $(\frac{R}{R_1})$:						
По опытам	I,00	0,76	0,68	0,65	0,62	0,54
По формуле (26)	I,00	0,95	0,9I	0,82	0,70	0,54
По формуле (27)	I,00	0,80	0,72	0,69	0,64	0,54
Отклонение в % расчетных показателей прочности от опытных:						
По формуле (26)	0,0	+25,0	+33,8	+26,2	+I3,0	0,0
По формуле (27)	0,0	+ 5,3	+5 ,9	+ 6,I	+ 3,2	0,0

Позже (1967-1968 гг) были проведены испытания неоднородных образцов из горных пород, а именно: из известняка и горючего сланца, из угла и глины, из алевролита и угля. Образцы имели форму цилиндра диаметром 3 см и такую же высоту. Неоднородные образцы состояли из двух слоев, причем слабый слой помещался внизу. Данные этих испытаний на прочность при условно-мгновенном нагружении и результаты сравнения их с подсчитанными по формуле (26) приведены в табл.7 и на рис.15. В табл.7 также приведены модули линейной деформации неоднородных образцов, определенные по экспериментальным графикам "напряжение-деформация" и выполнено их сравнение с рассчитанными по формуле

$$E = \frac{E}{1 + \left(\frac{E_1}{E_2} - 1\right)\frac{h_c}{h}} \qquad (28)$$

Из табл.7 и рис.15 видно, что отклонения расчетных показателей прочности неоднородных образцов от опытных составляют от - 2,2 до + 18,2%. Отклонение расчетных модулей линейной деформации от опытных меньше и составляет от -13,7 до 9,2%.

Таким образом, экспериментальная проверка зависимости (26) показала справедливость ее для широкого круга материалов, слагающих неоднородные образцы. Это дает основание считать, что указанная формула удовлетворительно отражает механизм работы неоднородных образцов, или целиков, и может использоваться для расчета их прочности. Что касается формулы (27), то более широкая ее проверка обнаружила меньшую сходимость с опытными данными и она не рекомендуется к применению.

В случае, если целик состоит не из двух, а из нескольких разнопрочных слоев, вычисление характеристик ведется по тем же формулам (26) и (28), что и для двухслойного целика, следующим образом /27/. Берутся два верхних разнопрочных слоя и вычисляются интересующие показатели. Затем рассматриваются эти два слоя как один с полученными характеристиками. Последние сопоставляются с третьим слоем и вычисляются для них свои характеристики. Полученная новая толща из трех слоев со своими расчетными характеристиками сопоставляется с четвертым слоем. Так, переходя из слоя к слою сверху вниз по всей высоте целика, в конечном итоге получим искомые характеристики неоднородного целика.

Для выяснения характера влияния включений на прочность массива остановимся на исследованиях механических свойств крупноблочных пород, выполненных Д.Н.Кимом /28/ применительно к вопросам устойчивости бортов карьеров. Помимо решения других задач, Д.Н.Ким исследовал влияние включений

Таблица 7

№ п/п	Материал образцов	Отношение толщины слабого слоя к высоте образца $\frac{h_c}{h}$	Отношение прочностей составных частей образцов $\frac{R_1}{R_2}$	Условно-мгновенная прочность образцов R, кг/см^2		Отклонение расчетных показателей прочности от опытных, %	Модуль линейной деформации образцов $E \cdot 10^{-4}$, кг/см^2		Отклонение расчетных показателей модуля деформации от опытных, %
				из опыта	по формуле (26)		из опыта	по формуле (28)	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0
I	Известняк	0		560	–	–	5,I5	–	–
2	Горючий сланец	I		280	–	–	I,48	–	–
3	Известняк и горючий сланец	I/4	2	435	450	+3,4	3,I9	3,I8	-0,3
4	То же	I/2		340	370	+8,8	2,I3	2,30	+8,0
5	Уголь	0		I80	–	–	I,20	–	–
6	Плотная глина	I		I00	–	–	0,50	–	–
7	Уголь и глина	I/4	I,8	I50	I50	±0,0	0,82	0,89	+8,5
8	То же	I/2		II0	I30	+I8,2	0,65	0,7I	+9,2
9	– " –	3/4		I05	II0	+4,8	0,56	0,585	+4,4
I0	Алевролит	0		755	–	–	6,I6	–	–
II	Уголь	I		I80	–	–	I,20	–	–
I2	Алевролит и уголь	I/4	4,2	4I5	420	+I,2	3,52	3,04	-I3,7
I3	То же	I/2		275	290	+5,5	2,I7	2,0I	- 7,4
I4	– " –	3/4		225	220	-2,2	I,68	I,5I	- I0,2

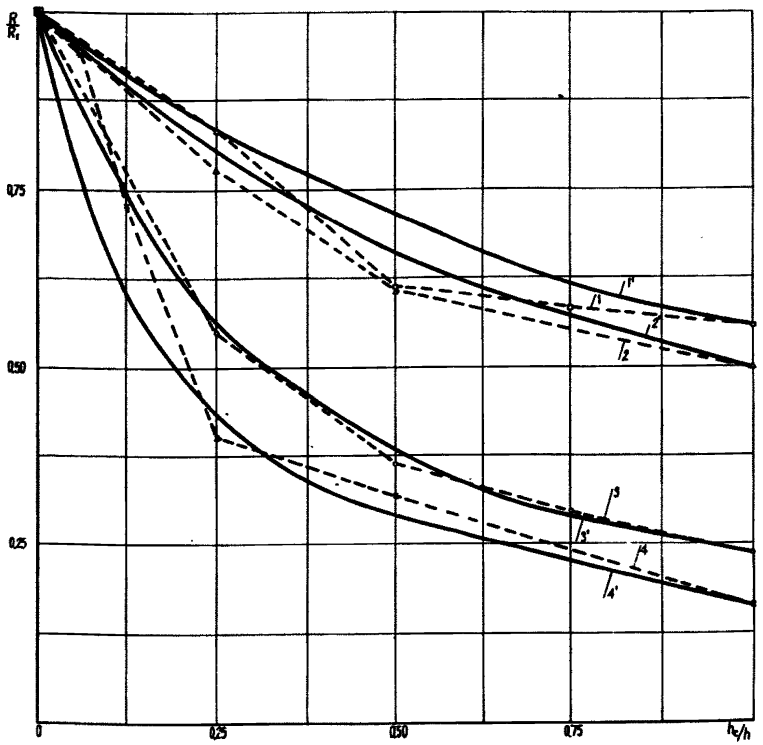


Рис.15. Характер изменения прочности (1,2,3,4 – опытной; 1', 2', 3', 4' – расчетной) неоднородных образцов: 1 и 1' – из угля и глины, 2 и 2' – из известняка и горючего сланца, 3 и 3' – из угля и алевролита, 4 и 4' – из искусственных материалов (песчано-парафиновые смеси)

слабых блоков на прочность массива, сложенного отдельными блоками из гипсобетонных смесей, и дал следующую формулу для определения прочности на одноосное сжатие

$$\sigma_{ср} = 0,53\sigma^0_{max} - a(\sigma^0_{max} - \sigma^0_{min}), \qquad (29)$$

где $\sigma_{ср}$ – усредненная прочность на одноосное сжатие массива; σ^0_{max} и σ^0_{min} – соответственно, прочности на одноосное сжатие блоков основного и слабого материалов; a – коэффициент, принимаемый по графику в зависимости от % ослабляющих блоков в массиве (n, %).

По данным, приведенным в /28/, подсчитаем прочность массива по формулам (29) и (26). Причем в последнюю формулу введем коэффициент 0,53 для учета блочной структуры

массива, а $\frac{h_c}{h}$ будем принимать в соответствии с процентами ослабляющих блоков в массиве (w , в долях от единицы).

Расчеты дают следующее:

w	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,70
α	0,25	0,32	0,35	0,43	0,47	0,52
Прочность, кг/см^2:						
по формуле (29)	40	32	29	20	15	10–12
по формуле (26)	40	33	30	22	16	12
Разница (в %) в прочностях по (29) и (26)	0,0	+3	+4	+10	+7	+9

Совпадение данных по формулам (29) и (26) показывает возможность применения формулы (26) для расчета прочности на сжатие массива, содержащего включения с прочностью, отличной от прочности основного материала.

Исследование характера влияния пластичных прослойков на прочность целиков проводилось на моделях из эквивалентных материалов. Модели целиков изготовлялись из песчано-парафиновых смесей, а пластичные прослойки – из смеси смазочных масел (тавота, солидола, технического вазелина) с песком и молотой слюдой. Причем модели (образцы из эквивалентных материалов) были как однородными, так и состоящими из слоев различной прочности.

В первом случае задачей экспериментов являлось изучение влияния таких факторов, как мощность прослойков, количество их и расположение. Количество прослойков было не больше двух, толщина каждого из них в разных моделях составляла 0,5; 1 и 2 мм. При двух прослойках они имели одинаковую толщину. Образцы имели форму кубиков с размером ребра 6 и 8 см. Для определения прочности основного материала испытывались кубиковые образцы без прослойков. Исследование на однородных образцах с пластичными прослойками были проведены применительно к семи типам строения, которые показаны на рис.16 (пластичные прослойки показаны широкими линиями, штриховые линии обозначают наличие контактов без смазки). Всего было испытано 56 образцов, из них 12 для определения прочности образцов без прослойков. Испытания проводились на прессе лаборатории моделирования ВНИМИ, о котором упоминалось выше.

Для изучения влияния пластичных прослойков на прочность неоднородных целиков были изготовлены соответствующие модели также из эквивалентных материалов. Слабый слой располагался по середине высоты образца, а пластичный прослоек – над слабым. Толщина слабого слоя составляла 0; 0,1; 0,2;

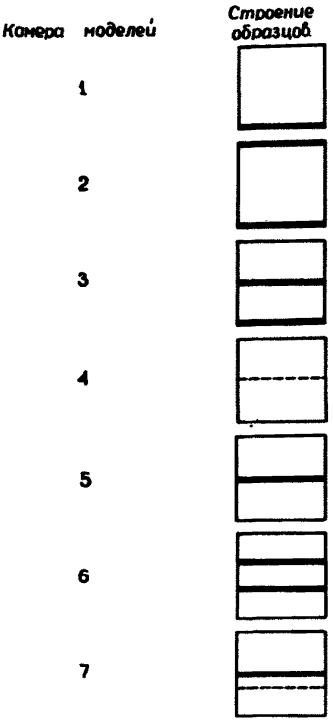


Рис.16. Схемы строения моделей целиков с пластичными прослойками

0,4; 1,0 от высоты модели, а толщина пластичного прослойка – 2 мм во всех моделях этого типа. Соотношение прочностей слабого и крепкого материала составляло 1:2; 1:5 и 1:12. Всего было испытано 114 кубических образцов, по 3–6 однотипных кубических образца с размером ребра 8 см.

Для выяснения возможного влияния на прочность характеристик самих пластичных прослойков были проведены специальные опыты на кубических образцах (размер ребра 5 см) из эквивалентных материалов с одним пластичным прослойком толщиной 1 мм, расположенным по середине высоты образца по типу модели 5 (см.рис.16). Пластичные прослойки применялись четырех различных характеристик (табл.8).

Коэффициент поперечной деформации пластичных прослойков оказался близким к 0,5. Кубиковая прочность основного материала составила 0,71 кг/см^2, угол внутреннего трения – 20^0, коэффициент сцепления – 0,19 кг/см^2,

Таблица 8

Типы прослойков	Состав материала прослойка, %				Угол внутреннего трения, ρ, град.	Коэффициент сцепления, k, кг/см^2	Прочность на разрыв R_p, кг/см^2
	Технический вазелин	Солидол	Песок	Молотая слюда			
I	50	–	50	–	6	0,075	0,I2
II	42	–	42	I6	I3	0,070	0,I9
III	–	35	I5	50	I	0,085	0,07
IУ	–	I8	77	5	9	0,030	0,04

угол трения по опорным поверхностям образцов – 8°. Испытания образцов на сжатие проводились аналогично описанному выше.

Результаты испытаний моделей целиков из однородного материала с пластичными прослойками приведены в табл.9. Данные, отмеченные в таблице звездочкой, получены при различных характеристиках материала пластичного прослойка.

Анализ полученных результатов показывает следующее. Пластичные прослойки снижают несущую способность (прочность) образцов по сравнению с однородными образцами. Различное расположение пластичного прослойка по высоте образца в равной степени оказывает влияние на изменение прочности, которая уменьшается в среднем на 16–26%. Исключение составляют образцы, содержащие пластичные прослойки на обеих опорных поверхностях, прочность которых уменьшается в среднем на 38–42%. Это можно объяснить хорошим скольжением материала образца по гладким плитам пресса при его сжатии вследствие чего образцы легко расширялись в поперечном направлении и пластичные прослойки способствовали разрушению образцов в результате растяжения в поперечном направлении. На степень снижения прочности образцов оказывает влияние толщина пластичного прослойка, а в случае нескольких прослойков – их суммарная мощность. Однако это влияние сказывается в определенных пределах и, начиная с определенной толщины прослойков, прочность образцов изменяется мало, оставаясь практически постоянной. Вертикальные деформации у образцов с пластичными прослойками больше, чем у однородных. Независимо от числа прослойков и их расположения разрушение образцов происходит путем их поперечного разрыва, о чем свидетельствует появление вертикальных трещин.

Анализ результатов исследований показал, что влияние пластичного прослойка на прочность кубического образца при однородном материале может быть приближенно отражено с помощью следующей эмпирической зависимости

$$R_п = R \frac{1 + 0{,}4\sqrt[4]{\frac{h_п}{h}}}{1 + \sqrt[4]{\frac{h_п}{h}}}, \qquad (30)$$

где $R_п$ и R_1 – прочность кубического образца, соответственно, с пластичными прослойками и без прослойков; $h_п$ – толщина пластичного прослойка; h – размер грани образца. На рис.17 построена кривая по формуле (30), а в табл.9 дано сравнение расчетных показателей по этой формуле с опытными. Отклонение расчетных показателей от опытных находится в пределах от –9,1 до +10,4%, и только в одном случае достигало 36%, что, вероятно, связано с незафиксированной погрешностью опыта. Если в образце имеется два пластичных

Таблица 9

Тип моделей	Количество и расположение пластичных прослойков в образце	Относительная толщина прослойков $\frac{\Sigma h_n}{h}$	Кубиковая прочность основного материала образца R_1, кг/см^2	Кубиковая прочность образцов с прослойками R_{n2} кг/см^2	Относительная прочность образцов с прослойками, $\frac{R_{n2}}{R_1}$	Расчетная кубиковая прочность образцов с прослойками, R_{n2}, кг/см^2		Отклонения расчетных показателей прочности от опытных, %	
						по формуле (30)	по формуле (32)	по формуле (30)	по формуле (32)
I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0
I	Один, на нижней опорной поверхности	0,025 0,025	I,48 I,82	I,25 I,43	0,84 0,79	I,23 I,52	I,I2 I,29	-I,6 +6,2	-I0,4 - 9,8
2	Два, на опорных поверхностях	0,050 0,050	I,48 I,82	0,98 0,92	0,66 0,5I	- -	0,96 I,II	- -	- 2,I +20,6
3	Два, один на опорной поверхности, другой по середине высоты	0,050	I,82	I,43	0,79	I,47	I,24	+2,8	-I3,3
4	Нет, образец разрезан по середине высоты	- -	I,48 0,7I	I,53 0,67	I,03 0,94	- -	- -	- -	- -
5	Один, по середине высоты	0,0I25 0,025 0,025 0,020 0,020 0,020 0,020	I,48 I,48 I,82 0,7I 0,7I 0,72 0,7I	I,2I I,I8 I,44 0,56[x] 0,60[x] 0,55[x] 0,56[x]	0,8I 0,80 0,79 0,79 0,84 0,77 0,79	I,26 I,23 I,52 0,59 0,59 0,59 0,59	I,3I I,28 I,47 0,60 0,60 0,60 0,60	+4,2 +4,2 +5,5 +4,3 -I,7 +7,3 +4,3	+ 8,2 + 8,5 + 2,I +7,2 ± 0,0 + 9,I + 7,2
6	Два, один на одной трети, а второй на двух третях высоты от верхней опорной поверхности	0,050 0,050	I,48 I,82	I,32 I,08	0,89 0,59	I,20 I,47	I,2I I,40	-9,I +36,0	- 8,3 +29,6
7	Один по середине высоты; контакт, пересыпанный молотой слюдой, на одной трети от нижней опорной поверхности	0,0083	I,82	I,42	0,88	I,57	I,52	+I0,4	+ 6,6

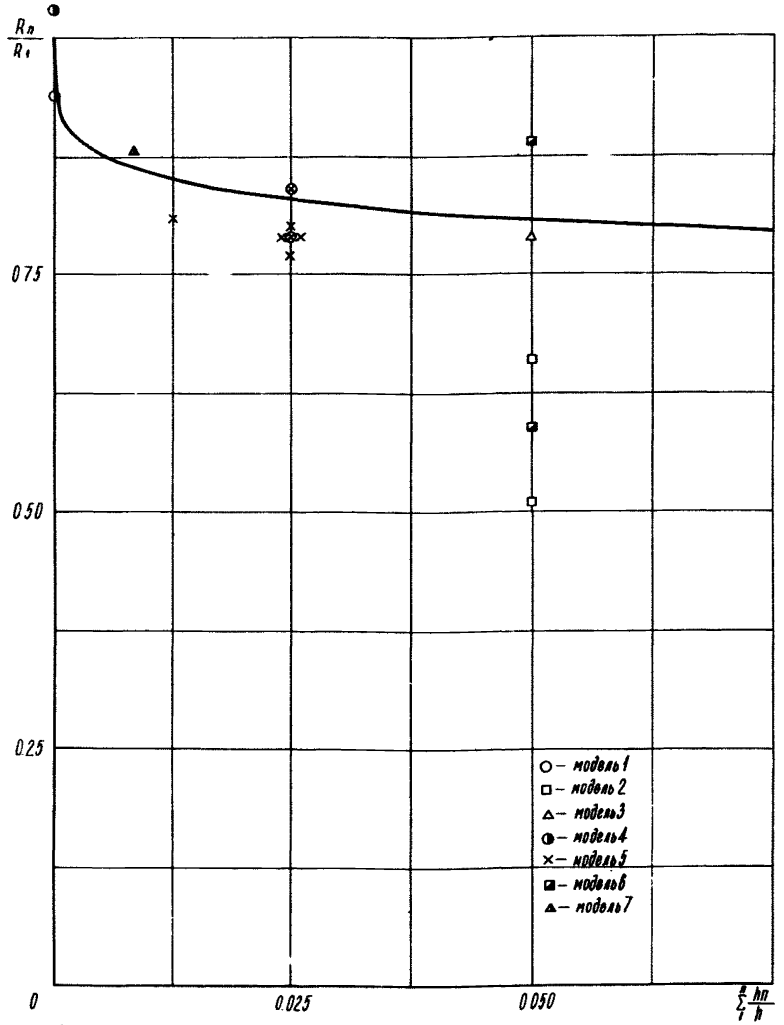


Рис.17. Зависимость прочности образцов от толщины пластичных прослойков

прослойка, то в выражение (30) подставляется их суммарная мощность. Выражение неприменимо только в случае наличия пластичных прослойков на обеих опорных поверхностях образца, как это видно из данных, приведенных на рис.17.

Результаты исследований по выявлению возможного влияния характеристики пластичного прослойка на прочность образцов показали, что средняя прочность по четырем сериям образцов отличается не более, чем на 9%, хотя характеристика прослойка изменялась в довольно значительных пределах: угол внутреннего трения в 13 раз, коэффициент сцепления в 2,8 раза, прочность на разрыв в 5 раз (см. табл.8). Это дает осно-

вание полагать, что характеристика пластичного прослойка оказывает слабое влияние на прочность образца.

Испытания образцов с пластичными прослойками при неоднородном основном материале обнаружили (табл.10) совокупное влияние слабого слоя и пластичного прослойка на прочность образцов. Объединяя формулы (26) и (30), получим выражение для описания совокупного влияния слабого слоя и пластичного прослойка следующего вида

$$R_н = \frac{R_1\left(1+0{,}4\sqrt[4]{\frac{h_п}{h}}\right)}{\left[1+\left(\frac{R_1}{R_2}-1\right)\frac{h_c}{h}\right]\left(1+\sqrt[4]{\frac{h_п}{h}}\right)}. \qquad (31)$$

В табл.10 дано сравнение расчетных показателей по (31) с опытными, показавшее удовлетворительную сходимость. Отклонения, как правило, не превышают ±20–25%, и только в одном случае отклонение слишком велико, что, видимо, следует отнести за счет ошибки в опытах.

Вследствие того, что в экспериментах диапазон изменения прочностей и других характеристик является не вполне достаточным, вопрос установления влияния пластичных прослойков на прочность целика в каждом конкретном случае желательно подвергать экспериментальному изучению, хотя формула (30) может быть рекомендована для приближенных расчетов.

В 1969 г. Г.А.Иванов /29/ предпринял попытку аналитического определения прочности целика с пластичными прослойками.

Рассмотрена работа кубического образца с пластичным прослойком, при такой толщине последнего, что зона упругих деформаций возникает в нем с момента приложения нагрузки. В результате Г.А.Иванов предложил следующую зависимость

$$R_п = \frac{2k\operatorname{ctg}\left(45-\frac{\rho}{2}\right)}{1-\eta\operatorname{ctg}^2\left(45-\frac{\rho}{2}\right)} = \frac{R_0}{1-\eta\operatorname{ctg}^2\left(45-\frac{\rho}{2}\right)}, \qquad (32)$$

где R_0, k и ρ – прочность на одноосное сжатие, коэффициент сцепления и угол внутреннего трения основного материала.

Значения переменной η выбираются исходя из расположения, количества, толщины прослойков и угла φ трения по контактам. Значения η для трех случаев расположения пластичных прослойков будут следующими:

на опорных поверхностях

$$\eta = \sum_1^n \frac{h_п}{h}, \qquad (33а)$$

Таблица 10

№ № п/п	Отношение суммарной толщины слабого слоя и пластичного прослойка к высоте образца	Отношение толщины слабого слоя к высоте образца	Соотношение прочностей крепкого и слабого материалов в образце								
			2			5			II		
			Отношение прочности неоднородного образца к кубиковой прочности образца из крепкого материала		Отклонение расчетных данных от опытных, %	Отношение прочности неоднородного материала к кубиковой прочности образца из крепкого материала		Отклонение расчетных данных от опытных, %	Отношение прочности неоднородного материала к кубиковой прочности образца из крепкого материала		Отклонение расчетных данных от опытных %
			из опыта	по формуле (3I)		из опыта	по формуле (3I)		из опыта	по формуле (3I)	
I	0,025	0,000	0,67	0,72	+7,5	0,75	0,72	-4,0	0,74	0,72	-2,7
2	0,I25	0,I00	0,68	0,66	-3,0	0,56	0,52	-7,2	0,48	0,36	-25,0
3	0,225	0,200	0,66	0,60	-9,I	0,42	0,40	-4,8	0,20	0,24	+20,0
4	0,425	0,400	0,62	0,53	-I4,5	0,I5	0,28	+86,6	0,I2	0,I4	+I6,2
5	I,000	0,975	-	0,37	-	-	0,I4	-	0,06	0,07	+I6,7

в теле образца

$$\eta = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{2} - \sum_{1}^{n} \frac{h_n}{h}, \qquad (33б)$$

один из прослойков на одной опорной поверхности

$$\eta = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{4} - \sum_{1}^{n} \frac{h_n}{h}. \qquad (33в)$$

Результаты расчетов прочности образцов с пластичными прослойками по формуле (32) с использованием выражений (33) и сравнение с данными опытов приведены в табл.9. Отклонение расчетных показателей от опытных колеблется от -13,3 до +8,5% и только в двух случаях из пятнадцати они достигли +20,9 и +29,6%. В целом можно считать удовлетворительной сходимость сравниваемых показателей. Отклонение расчетных показателей от опытных по эмирической зависимости (30) меньше, чем по формуле (32), поэтому последней нужно пользоваться только в случае наличия пластичных прослойков на обеих опорных поверхностях целика, т.е. когда формула (30) неприменима.

2. Исследование длительной прочности

Исследование длительной прочности и ползучести неоднородного массива\производится на таких же образцах как условно-мгновенная прочность. Причем методика длительных испытаний принимается та же, что и для однородных образцов. Были испытаны неоднородные образцы из известняка и горючего сланца, из угля и глины, из угля и алевролита, а также из искусственных материалов (песчано-парафиновые смеси) /31/. Более слабый материал во всех случаях располагался внизу и имел толщину в образцах из известняка и горючего сланца 1/4 и 1/2, в образцах из угля и глины и в образцах из угля и алевролита 1/4, 1/2 и 3/4 от полной высоты образца.

Длительные испытания образцов с пластичными прослойками проводились аналогично. Образцы имели форму кубиков с ребром 5 см и содержали один прослоек толщиной 1 мм, расположенный по середине высоты. Были испытаны однородные образцы, разрезанные пополам по середине высоты, и четыре серии с пластичными прослойками разной характеристики.

Результаты испытаний неоднородных образцов из горных пород приведены в табл.11 и на рис.18, на котором также приведены данные по образцам из искусственных материалов. Там же даются расчетные показатели пределов длительных прочностей, вычисленные по опытным пределам длительных прочностей составляющих их материалов по формуле (26).

Полученные данные показывают, что расчетные пределы длительных прочностей неоднородных образцов не имеют боль-

Таблица II

№№ п/п	Материал образцов	Отношение толщины слабого материала в высоте образца $\frac{h_c}{h}$	Условно-мгновенная прочность образцов R_∞, кг/см^2	Предел длительной прочности образцов R_∞, кг/см^2		Отклонение расчетных показателей от опытных, %	Отношение опытных пределов длительной прочности к условно мгновенной прочности R_∞/R
				Из опыта	Расчетный по /26/		
I	Известняк	0	560	389	-	-	0,70
2	Горючий сланец	I	280	I66	-	-	0,59
3	Известняк и горючий сланец	I/4	435	285	290	+I,8	0,66
4	То же	I/2	340	232	233	+0,4	0,68
5	Уголь	0	I80	I34	-	-	0,74
6	Плотная глина	I	I00	44	-	-	0,44
7	Уголь и плотная глина	I/4	I50	88	89	+I,2	0,59
8	То же	I/2	II0	6I	66	+9,2	0,55
9	То же	3/4	I05	53	53	±0,0	0,50
I0	Алевролит	0	755	444	-	-	0,59
II	Уголь	I	I80	I34	-	-	0,74
I2	Алевролит и уголь	I/4	4I5	278	28I	+I,I	0,67
I3	То же	I/2	275	I90	205	+7,9	0,69
I4	То же	3/4	225	I53	I62	+5,9	0,68

ших отклонений от опытных. Для образцов из песчано-парафиновых смесей отклонения составляют от -24,6 до 8,2%, а для образцов из горных пород от ±0,0 до +9,2%. Это дает основание полагать, что характер зависимости прочности неоднородных образцов от прочностей слагающих их материалов, а также от толщины слоев последних, установленный ранее при быстром нагружении, сохраняется и при длительном действии нагрузки. Из этого следует, что длительная прочность $R(t)$ неоднородного образца может быть рассчитана по той же формуле (26), в которую вместо мгновенных прочностей составля-

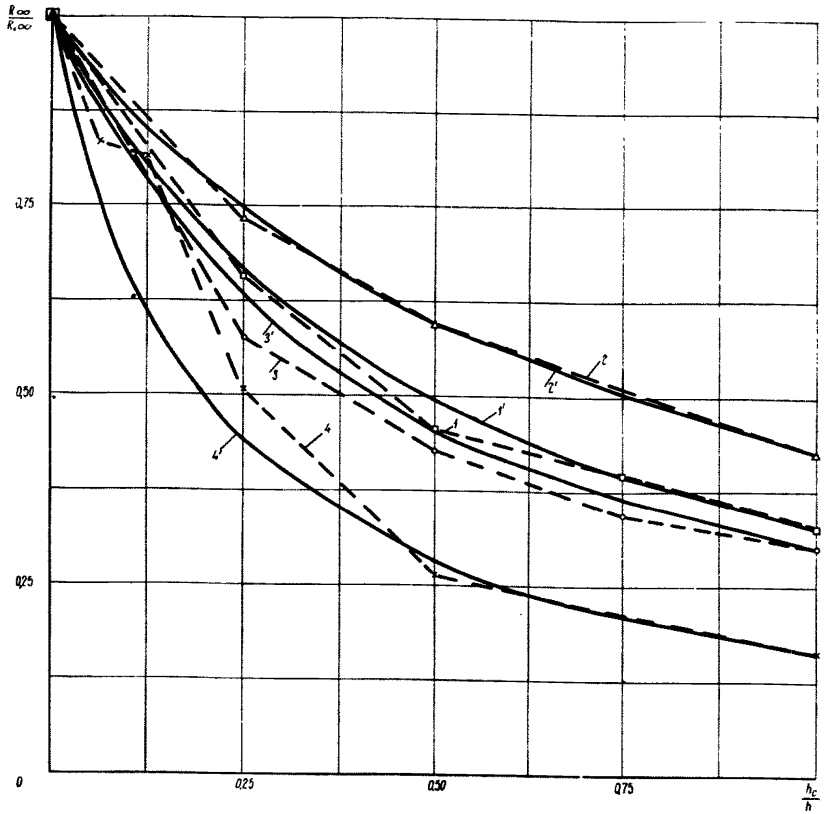


Рис.18. Изменение пределов длительной прочности неоднородных образцов из угля и глины – 1, из известняка и горючего сланца – 2, из алевролита и угля – 3, из искусственных материалов (песчано-парафиновые смеси) – 4; штриховые линии – по данным опытов, сплошные – по формуле (26)

ющих целик материалов подставляются длительные прочности $R_1(t)$ и $R_2(t)$, т.е.

$$R(t) = \frac{R_1(t)}{1 + \left(\frac{R_1(t)}{R_2(t)} - 1\right)\frac{h_c}{h}}. \qquad (34)$$

Таким образом, для расчета длительной прочности неоднородного образца достаточно знать длительные прочности и мощности его составных частей. Этот вывод, очевидно, будет справедливым также для образцов, состоящих из нескольких разнопрочных слоев (больше двух).

Аналогично однородным образцам прочность неоднородного образца в заданный момент времени определяется по формуле (18), исходя из установленных параметров β и B по опытным данным R_0 и R_∞.

Что касается деформаций ползучести неоднородных образцов, то их можно рассчитывать также по формуле (23), если известны параметры ползучести их составляющих частей. Покажем это соответствующими вычислениями и сравнением вычисленных данных и опытных.

Модуль линейной деформации неоднородных образцов можно рассчитывать по формуле (28). Предположим, что такой же зависимости подчиняется и параметр функции ползучести ξ неоднородного образца, т.е.

$$\xi = \frac{\xi_1}{1 + \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} - 1\right)\frac{h_c}{h}}, \qquad (35)$$

где ξ_1 и ξ_2 параметры функции ползучести материалов, слагающих неоднородный образец.

Сравнение опытных и расчетных по формуле (35) значений параметров ξ неоднородных образцов приведено в табл.12, из которой видна удовлетворительная сходимость сравнительных величин. Это дает право рекомендовать к использованию формулу (35) для расчета параметров ξ неоднородных образцов.

Параметр α для неоднородного образца в первом приближении может определяться как средневзвешенный соответствующих параметров α_1 и α_2, составляющих образец материалов, т.е. по выражению

$$\alpha = \alpha_1 \left(1 - \frac{h_c}{h}\right) + \alpha_2 \frac{h_c}{h}, \qquad (36)$$

поскольку в наших опытах горные породы, слагающие образцы, имели одинаковые значения α и только у песчано-парафиновых смесей наблюдалось его колебание. В дальнейшем выражение (36) следует уточнить путем постановки испытаний образцов с разными параметрами α. Результаты длительных испытаний неоднородных образцов приведены на рис.8 - 10, а экспериментальные и расчетные по (21) графики функций ползучести на рис.11 и 11,а. Результаты испытаний неоднородных образцов из горных пород приведены в табл.13.

На основании проведенных исследований можно считать установленным, что длительная прочность неоднородного образца подчиняется той же зависимости, что и условно-мгновенная прочность. Получены выражения для вычисления параметров ползучести неоднородных образцов, учитывающие параметры ползучести и толщину разнородных слоев, слагающих неоднородные образцы. Прочностные и другие физико-механические свойства материалов при проведении испытаний изменялись в значительных пределах и поэтому можно полагать, что полу-

Таблица I2

Характеристика образцов и составных частей	Отношение толщины слабого слоя к высоте образца																	
	0	I	I/I6			I/8			I/4			I/2			3/4		
	Параметр функции ползучести $\xi \cdot 10^{-4}$, кг/см^2.час$^{\alpha}$																	
	Из опыта	Из опыта	Из опыта	По расчету	Отклонение от опытных,%	Из опыта	По расчету	Отклонение от опытных,%	Из опыта	По расчету	Отклонение от опытных,%	Из опыта	По расчету	Отклонение от опытных,%	Из опыта	По расчету	Отклонение от опытных,%
Известняк и горючий сланец	28	5,8	-	-	-	-	-	-	I5	I4,3	-4,7	I0,5	9,6	-8,6	-	-	-
Уголь и ископаемая глина	I9	I,8	-	-	-	-	-	-	4,7	5,6	+I9,2	3,3	3,3	+0,0	2,I	2,3	+9,5
Алевролит и уголь	44	I9	-	-	-	-	-	-	37	33	-I0,8	26	27	+3,8	22	22	±0,0
Песчано парафиновые смеси	0,I7	0,033	0,I6	0,I35	-I5,7	0,I4	0,I05	-33,2	0,I02	0,083	-I8,7	0,05	0,057	+I4	-	-	-

Таблица 13

Показатели	Материал образцов							
	Уголь и глина при h_c/h			Алевролит и уголь при h_c/h			Известняк и горючий сланец при h_c/h	
	I/4	I/2	3/4	I/4	I/2	3/4	I/4	I/2
I	2	3	4	5	6	7	8	9
R_0, кг/см^2:								
из опыта	I50	II0	I05	4I5	275	225	435	340
расчетная	I50	I30	II0	420	290	220	450	370
отклонение от опытных, %	±0,0	+I8	+5	+I	+6	-2	+3	+9
R_∞, кг/см^2:								
из опыта	88	6I	53	278	I90	I53	285	232
расчетная	89	66	53	28I	205	I62	290	233
отклонение от опытных, %	+I	+9	±0	+I	+8	+6	+2	+0,4
$E \cdot 10^{-4}$, кг/см^2:								
из опыта	0,82	0,65	0,56	3,52	2,I7	I,68	3,I9	2,I3
расчетная	0,89	0,7I	0,58	3,04	2,02	I,5I	3,I8	2,30
отклонение от опытных, %	+8	+9	+4	-I4	-7	-I0	-0,3	+8
$\xi \cdot 10^{-4}$, кг/см^2. час$^\alpha$:								
из опытных	4,7	3,3	2,I	37	26	22	I5	I0,5
расчетная	5,6	3,3	2,3	33	27	22	I4,3	9,6
отклонение от опытных, %	+I9	±0	+I0	-II	+4	±0	-5	-9
α:								
из опыта	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25		0,I5	0,I5
расчетная	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25		0,I5	0,I5

ченные зависимости и их параметры будут справедливыми в широком диапазоне и их можно распространить на условия работы однородных и неоднородных целиков.

Исследование характера изменения во времени прочности и деформаций целиков с пластичными прослойками проводилось на моделях из искусственных материалов (песчано-парафиновые смеси). Модели имели один пластичный прослоек по середине высоты, характеристика которого изменялась (см.табл.8). Методика испытаний и обработки их результатов аналогична неоднородным образцам.

Данные опытов показывают, что пределы длительной прочности образцов с пластичными прослойками в 4–4,5 раза ниже условно-мгновенных прочностей, а пределы длительных прочностей без пластичных прослойков в 4–4,2 раза ниже соответствующих условно-мгновенных прочностей. Отсюда можно сделать вывод, что пластичные прослойки не вносят изменений в

длительную прочность по сравнению с условно-мгновенной прочностью. Эти результаты могут быть выражены по предложению Г.А.Иванова следующей зависимостью

$$R_п(t) = R_п \frac{R(t)}{R}, \qquad (37)$$

где $R_п(t)$ – длительная прочность образца с пластичным прослойком; $R_п$ – условно-мгновенная прочность образца с пластичным прослойком; $R(t)$ – длительная (для того же момента времени что и $R_п(t)$ прочность основного материала; R – условно-мгновенная прочность основного материала.

Значения $R_п$ и $R(t)$ могут быть определены соответственно по формулам (30) или (32) и (18) на основе соответствующих экспериментальных данных.

Обработка экспериментальных данных показала, что функции ползучести образцов с пластичными прослойками также удовлетворительно описываются уравнением (21). Причем параметр α во всех случаях оказался одинаковым и равным 0,25, а параметр ξ изменяется в зависимости от характеристики пластичного прослойка.

Результаты исследований длительной прочности и ползучести целиков с пластичными прослойками рассматриваются как методическая разработка. Поэтому в каждом конкретном случае характер изменения длительной прочности целика с пластичным прослойком должен изучаться, по возможности, экспериментально.

3. Оценка предложенных зависимостей

Несмотря на широкое распространение неоднородности на месторождениях полезных ископаемых, этот вопрос был изучен слабо. До постановки изложенных выше исследований на неоднородность в виде разнопрочности слоев и наличия пластичных прослойков серьезное внимание обратил В.Д.Слесарев /32/. В.Ф.Трумбачев и Е.А.Мельников /33/ исследовали влияние разнопрочности слоев на прочность целиков методом фотоупругости.

Больше работ посвящено изучению влияния пластичных прослойков. Этот вопрос достаточно подробно проанализирован в работах В.Д.Слесарева /32/ и Г.Н.Кузнецова /17/. Попытку аналитического решения предпринял К.В.Руппенейт /34/. В целом же влияние неоднородности на прочность целиков количественно почти не учитывалось.

После опубликования в 1962 г. работы автора по неоднородным целикам /26/, в печати появились аналогичные исследования других авторов. Так, в 1964 г. Е.С.Раденко /35/

опубликовал исследования прочности неоднородных рудных целиков на моделях из гипсобетона и предложил эмпирическую формулу следующего вида

$$\frac{\sigma_{неодн}}{\sigma_{одн}} = 1 - \sqrt{\frac{h_{сл}}{h}}\left(1 - \frac{\sigma_{сл}}{\sigma_{одн}}\right), \qquad (38)$$

где $\sigma_{неодн}$ – кубиковая прочность неоднородного образца; $\sigma_{одн}$ кубиковая прочность основного материала; $\sigma_{сл}$ –кубиковая прочность слабого материала; $h_{сл}$ – толщина слабого прослойка; h – высота образца.

В том же 1964 г. была опубликована работа В.Г.Безкаравайного /36/, посвященная исследованию прочности целиков на шахтах Прибалтийского бассейна горючих сланцев. Исследования были проведены на образцах из горных пород, в результате которых предложены эмпирические формулы:

для расчета прочности образцов с крепкими прослойками –

$$\sigma_{н.кр} = \left(\frac{\sigma_{пр.кр}}{\sigma_{осн}}\right)^{\frac{m}{M}} \sigma_{осн}\left(1 - \alpha \frac{k_{к.к}}{k_{сер.к}} \sqrt{\frac{2h}{M}}\right); \qquad (39)$$

для расчета прочности образцов со слабыми прослойками –

$$\sigma_{н.сл} = \left(\frac{\sigma_{пр.сл}}{\sigma_{осн}}\right)^{\sqrt{\frac{m}{M}}} \sigma_{осн}\left(1 + \alpha \frac{k_{к.сл}}{k_{сер.сл}} \sqrt{\frac{2h}{M}}\right), \qquad (40)$$

где $\sigma_{н.кр}$ и $\sigma_{н.сл}$ – прочности неоднородных образцов с крепкими и слабыми прослойками; $\sigma_{осн}$, $\sigma_{пр.кр}$ и $\sigma_{пр.сл}$ – прочность вмещающих пород, крепкого и слабого прослойков; $k_{сер.к}$ и $k_{к.к}$ – коэффициенты увеличения прочности при расположении крепкого прослойка, соответственно, по середине и у опорных поверхностей; $k_{сер.сл}$ и $k_{к.сл}$ – коэффициенты снижения прочности при расположении слабого прослойка, соответственно, по середине и по краям; α – постоянный коэффициент, зависящий от свойств пород и для рассмотренных условий равный 0,165; M – высота образца; m – мощность прослойка; h – расстояние от центра прослойка до середины образца по высоте.

Для сравнения характера изменения прочности неоднородных целиков по формулам (26), (38), (39) и (40) построены графики, которые приведены на рис.19. Расчеты и построения выполнены применительно к неоднородным целикам из горючего сланца и известняка при соотношениях их прочностей, равных 2, 4 и 8. Для простоты принято, что целик состоит из двух слоев.

Как видно из рис.19, значение прочностей по формулам

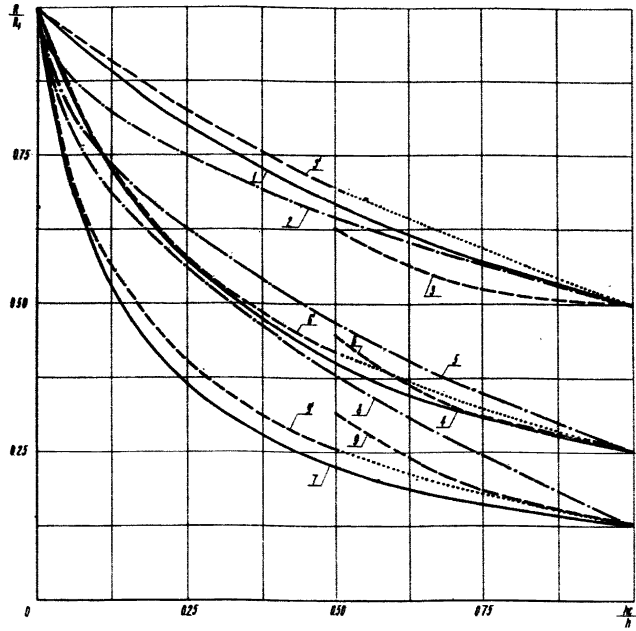


Рис.19. Графики изменения прочности неоднородных целиков: 1, 4 и 7 – по формуле (26); 2, 5, 8 – по формуле (38); 3, 6, 9 – по формуле (39); 3, 6, 9 – по формуле (40)

(26) и (39) и особенно (40) довольно близки между собой. Разница между ними, как правило, не выходит за пределы 10–15%. Однако формула (38) дает отклонения от (26) более значительные, причем они увеличиваются с ростом соотношения прочностей слоев целика. Так, при соотношении прочностей 2 и 4 отклонения составляют 10–20%, а при соотношении прочностей 8 отклонение достигает 70%. Следует отметить что формула (38) построена на основании испытаний моделей целиков, у которых отношение прочности крепкого материала к прочности слабого не превышало 5, поэтому она и может применяться только в этих пределах. Для применения формул (39) и (40) в условиях других месторождений, отличных от Прибалтийского бассейна горючих сланцев, необходимо каждый раз проводить комплекс исследований по определению коэффициентов.

При небольших соотношениях прочностей слоев целика все рассмотренные формулы не дают больших отклонений друг от друга, а также от опытных данных, и все формулы пригодны для определения прочности неоднородных целиков. Однако формула (26) является более универсальной по сравнению с другими, которые имеют ограничения по области применения, о чем говорилось выше.

Сопоставление и анализ данных, полученных на неоднородных образцах, рассматриваемых как модели целиков, и результатов шахтных измерений деформирования неоднородных целиков во времени под действием постоянной нагрузки показывает, что значения параметров ползучести α и отношений $\frac{E_0}{\xi}$, вычисленные по предложенным зависимостям (36), (28) и (35) для неоднородных образцов, сложенных разнопрочными слоями, оказываются справедливыми для целиков подобного строения /30/. Этот вывод аналогичен соответствующему выводу для однородных целиков (см.гл.Ш, 2). Следовательно, будут справедливыми выводы об одинаковой степени снижения длительной прочности, по сравнению с условно-мгновенной прочностью, как для неоднородного образца, так и для целика такого же строения. Это соотношение, а также подсчитанная условно-мгновенная прочность целика по предложенной зависимости (26) дают возможность определить по формуле (18) параметры β и B для неоднородного массива, что в свою очередь позволяет рассчитать долговечность неоднородного целика.

Глава У. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦЕЛИКОВ

1. Способы определения несущей способности однородных целиков

В предыдущих главах был рассмотрен характер влияния основных факторов на прочность целика кубической формы или цилиндрической при равенстве диаметра и высоты цилиндра.

Несущая способность целика определяется, исходя из его удельной несущей способности, которая при прочих равных условиях, в свою очередь, зависит от соотношения между его высотой и размерами в плане.

Хорошо известно, что с увеличением отношения ширины целика к его высоте прочность (удельная несущая способность) целика увеличивается. Этот эффект в режиме условно-мгновенного нагружения отражается так называемым коэффициентом формы, который по Черну равен

$$k_\Phi = \left(\frac{b}{h}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (41)$$

В последующих работах (например, /37/) указывается, что коэффициент формы может приниматься по выражению:

$$k_\Phi = \frac{b}{k_4} \qquad (42)$$

Вероятно, истинное значение k_Φ будет находиться в интервале, ограничиваемом указанными двумя уравнениями. И это обстоятельство, а также влияние условий на контактах с боковыми породами, нуждается в уточнении. С этой целью были проведены исследования на образцах из горных пород /7, 38/. Образцы изготовлялись цилиндрической формы из белого мрамора, каменного угля (шахта им.В.И.Ленина в Кузбассе) и талькохлорита (месторождение Сег-Озеро). Размеры образцов были следующими: белый мрамор - диаметр d =43 мм, высота h =141, 87, 43, 22 и 11 мм; каменный уголь - d = 42 мм, h = 86, 43, 22 и 11 мм; талькохлорит - d = 35 мм; h = 70, 35, 18 и 9 мм. Из приведенных размеров видно, что отношение $\frac{d}{h}$ образцов изменялось 0,3 до 3,9.

Образцы испытывались при трех условиях на контактах (торцах): а) без смазки - имитация сухого трения; б) со смазкой торцов - имитация пластичных прослойков или мягких прокладок; в) с приклейкой торцов к стальным плитам - имитация трения и сцепления. Образцы со смазкой и приклейкой торцов подготавливались к испытаниям следующим образом. Торцы образцов для испытаний со смазкой обезжиривались спиртом, а затем наносился слой парафина путем погружения их в расплавленный парафин. Образцы со смазанными торцами выдержива-

лись в течение не менее одного часа при комнатной температуре до испытания их на прессе. Торцы образцов, предназначенных для испытания с приклейкой, также обезжиривались спиртом, а затем на них наносился тонкий слой эпоксидной смолы, с помощью которой и осуществлялась приклейка к стальным плиткам.

Испытания образцов производилось на 30-тонном и частично на 50-тонном прессах. Исходя из разрушающей нагрузки и площади поперечного сечения, вычисляли предел прочности материала при одноосном сжатии. По результатам отдельных испытаний определяли среднее разрушающее напряжение, как среднеарифметическое из всех опытов для данных условий на контактах и при одной и той же высоте образцов. Кроме того, вычислялась относительная величина разрушающего напряжения для каждого из трех материалов как частное от деления средних значений прочности при данной высоте образца на среднее значение прочности образцов высотой $h = d$, испытывавшихся без смазки.

Всего было испытано 158 образцов, из них мрамора - 78, угля - 37, талькохлорита - 43. Средние данные из результатов испытаний приведены в табл.14. Данные отдельных опытов отличались от средних на 10-20%.

Из приведенных данных видно, что прочность мрамора в зависимости от высоты образцов при испытаниях без смазки изменялась от 630 до 1144 кг/см^2, с приклейкой - от 685 до 2075 кг/см^2, а со смазкой - от 621 до 489 кг/см^2. С уменьшением высоты образцов прочность их при испытаниях без смазки и с приклейкой увеличивается, а при испытаниях со смазкой уменьшается. Характер разрушения образцов зависит от условий на их опорных поверхностях. При испытаниях без смазки и с приклейкой образцы разрушаются с образованием конусов, а образцы со смазкой разрушаются в основном по вертикальным трещинам, параллельным действию сжимающих напряжений.

Прочность угля с уменьшением высоты образцов увеличивается от 164 до 706 кг/см^2 при испытании без смазки и от 252 до 719 кг/см^2 при испытании с приклейкой. При испытании образцов со смазкой прочность угля уменьшается от 141 до 112 кг/см^2 при уменьшении высоты образцов (см. табл.14). Разрушение образцов в большинстве случаев сопровождалось образованием конусов.

Прочность талькохлорита с уменьшением высоты образцов увеличивается от 897 до 1272 кг/см^2 при испытании без смазки и от 653 до 1003 кг/см^2 при испытании с приклейкой. При испытании образцов со смазкой прочность уменьшается от 513 до 343 кг/см^2 при уменьшении высоты образцов. Разрушение характеризовалось следующим: при испытании без смаз-

Таблица I4

Наименование породы	Условия на торцах образцов	$\frac{d}{h}$	Количество образцов	R_c; кг/см^2	$\frac{R}{R_{c\,h=d}}$
Мрамор	Без смазки	0,3	7	630	0,8
		0,5	4	642	0,8
		I,0	6	774	I,0
		2,0	4	82I	I,I
		3,9	8	II44	I,5
	Со смазкой	0,3	6	62I	0,8
		0,5	3	555	0,7
		I,0	6	488	0,6
		2,0	3	485	0,6
		3,9	5	489	0,6
	С приклейкой	0,3	7	685	0,9
		0,5	3	690	0,9
		I,0	7	849	I,I
		2,0	3	I337	I,7
		3,3	6	2075	2,7
Уголь	Без смазки	0,5	3	I64	0,7
		I,0	3	242	I,0
		2,0	3	545	2,2
		3,8	4	706	2,9
	Со смазкой	0,5	3	I4I	0,6
		I,0	3	I37	0,6
		2,0	3	I32	0,6
		3,3	3	II2	0,5
	С приклейкой	0,5	3	252	I,0
		I,0	3	379	I,6
		2,0	3	570	2,4
		3,3	3	7I9	3,0
Тальк-хлорит	Без смазки	0,5	4	879	I,0
		I,0	5	928	I,0
		2,0	5	I025	I,I
		3,9	5	I272	I,4
	Со смазкой	0,5	3	5I3	0,6
		I,0	3	429	0,5
		2,0	3	399	0,4
		3,6	3	343	0,4
	С приклейкой	0,5	3	653	0,7
		I,0	3	747	0,8
		2,0	3	823	0,9
		3,8	3	I003	I,I

ки – образование конусов, при испытании со смазкой – в основном, образование вертикальных трещин, при испытании с приклейкой – образование конусов при $h > d$ и образование вертикальных трещин при $h \leq d$.

По результатам испытаний образцов из трех указанных материалов на рис.20 построены усредненные графики изменения относительной прочности в зависимости от значений отношения

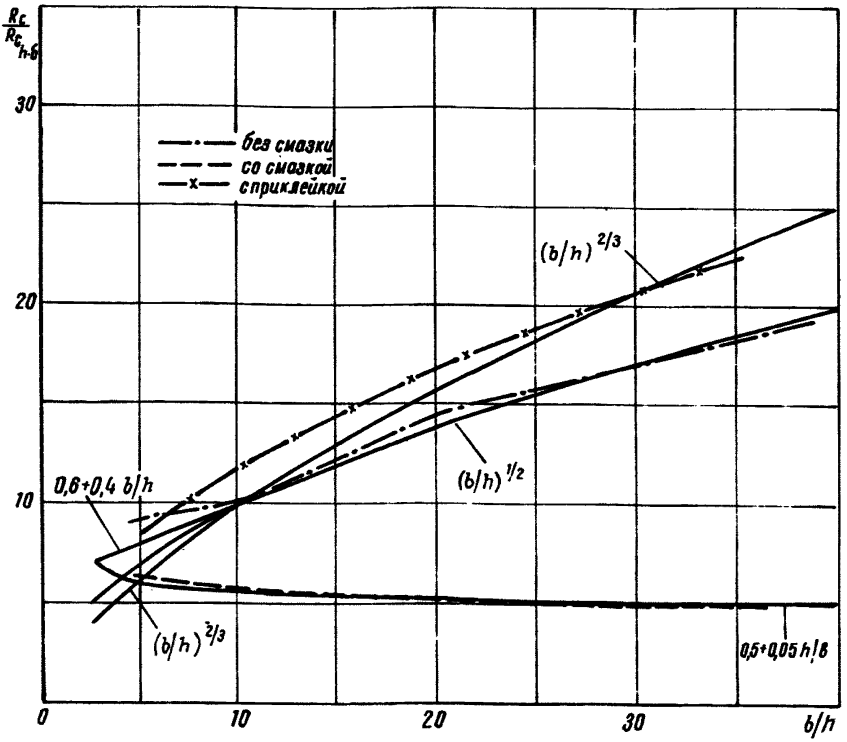


Рис.20. Изменение относительной прочности образцов в зависимости от значения отношений диаметра образца к его высоте

диаметра образца к его высоте. На том же рисунке показаны графики по выражению

$$k_\phi = \left(\frac{b}{h}\right)^x, \qquad (43)$$

при $x = 1/2$ и $x = 2/3$.

Выражение (43) принято по аналогии с коэффициентом Черна и при $x = 1/2$ оно превращается в (41), а при $x = 1$ – в (42).

Анализ графиков, приведенных на рис.20, показывает следующее. С увеличением значения $\frac{d}{h}$ от 0,4 до 4 прочность образцов из всех трех испытанных материалов увеличивается при отсутствии смазки и при приклейке торцов образца. При наличии смазки наблюдается обратная картина: прочность образцов уменьшается с увеличением значения $\frac{d}{h}$. Однако

она по всему изучаемому диапазону $\frac{d}{h}$ меньше, чем у образцов без смазки.

Приклейка образцов по торцам к стальным плитам, т.е. наличие сцепления по опорным поверхностям, в среднем, привела к повышению прочности образцов по сравнению с образцами без смазки.

При $\frac{d}{h} < 1$ различие между прочностями образцов со смазкой, без смазки и с приклейкой постепенно уменьшается и при $\frac{d}{h} = 0{,}4$ прочность при этих трех условиях на опорных поверхностях образцов отличается сравнительно мало.

Сопоставляя графики, построенные по опытным данным и по выражению (43), можно видеть, что на участке $1 \leqslant \frac{d}{h} \leqslant 3 \div 4$ ближе всего к опытным данным по образцам без смазки находится кривая, построенная при $x = 1/2$. Наиболее близкие к средним данным по образцам с приклейкой дает та же формула (43) при $x = 2/3$.

В интервале $0{,}4 \leqslant \frac{d}{h} \leqslant 1$ кривые, построенные по выражению (43) при $x = 1/2$ и $x = 2/3$, проходят существенно ниже опытных данных по образцам без смазки и с приклейкой торцов к стальным прокладкам. Ближе всего к опытным данным в этом интервале лежит прямая, построенная по выражению

$$k_{\phi} = 0{,}6 + 0{,}4\,\frac{b}{h}. \qquad (44)$$

Характер изменения прочности образцов со смазкой опорных поверхностей в интервале $0{,}25 \leqslant \frac{d}{h} \leqslant 3 \div 4$ довольно удовлетворительно (отклонения, в среднем, не превышают 15%) отражается уравнением кривой вида

$$k''_{\phi} = 0{,}5 + 0{,}05\,\frac{h}{b}. \qquad (45)$$

Установленный характер изменения прочности образцов со смазкой опорных поверхностей совпадает с аналогичными результатами испытаний Г.Н.Кузнецова на образцах каменной соли и Гелера – на образцах бетона /17/, а также с результатами исследований на моделях из эквивалентных материалов.

Когда $\frac{d}{h} \leqslant 0{,}3$, прочность образцов будет одинаковой независимо от условий на контактах с опорными плитами и в этом случае коэффициент формы будет равен постоянной

$$k''_{\phi} \cong 0{,}7. \qquad (46)$$

Заметим, что, как известно /17/, теоретически значение $\frac{d}{h}$, при котором имеет место равенство прочностей образцов, испытываемых без смазки и со смазкой, будет зависеть от угла внутреннего трения материала.

Существенный интерес представляет случай наличия пластичных прослойков на опорных поверхностях целиков. Исследования показывают, что в диапазоне отношения $\frac{a}{h}$ от 0,25 до 3 - 4 целики имеют прочность, меньшую прочности на одноосное сжатие, и не могут рассчитываться, как это предлагается в /41/, по значению последней. Расчет таких целиков следует производить с использованием коэффициента формы по выражению (45).

Наибольший интерес представляет определение размеров целиков, у которых ширина больше высоты. Расчет несущей способности, например, ленточных целиков производится по следующей формуле

$$P = b R k_{\phi}, \qquad (47)$$

в которой коэффициент формы принимается по одному из приведенных выше эмпирических выражений.

Для расчета широких целиков используют также теоретические методы, в частности методы теории предельного равновесия. Методы решения задачи о размерах целиков В.В.Соколовского /39/ получили развитие в работах К.В.Руппенейта /34/, С.Г.Авершина /40/, Ю.М.Либермана /41/ и др.Поскольку решения методом теории предельного равновесия оказываются сложными, требующими численного интегрирования, в работе /41/ построены в полулогарифмическом масштабе графики функций зависимости безразмерной разрушающей нагрузки на междукамерный целик $\frac{P}{\sigma_{сж} h} = F\left(\frac{a_0}{h}, \rho, \delta\right)$ от отношения ширины целика к его высоте $\frac{a_0}{h}$ для различных значений ρ и δ (рис.21). Обозначения величин: P - разрушающая нагрузка на целик; $\sigma_{сж}$ - прочность материала целика на одноосное сжатие; ρ - угол внутреннего трения материала целика; δ - угол трения на контактах целика с боковыми породами, меньший ρ; h - высота целика; a_0 - ширина целика. Графики, на которых дано только значение ρ, соответствуют случаю полного сцепления целика с боковыми породами. Разрушающая нагрузка на целик равна

$$P = \sigma_{сж} h F\left(\frac{a_0}{h}, \rho, \delta\right), \qquad (48)$$

где функция $F\left(\frac{a_0}{h}, \rho, \delta\right)$ находится по графику на рис.21.

Из выражения (48) следует, что коэффициент формы в этом случае может быть записан в следующем виде:

$$k_{\phi} = \frac{h}{a_0} F\left(\frac{a_0}{h}, \rho, \delta\right) \qquad (49)$$

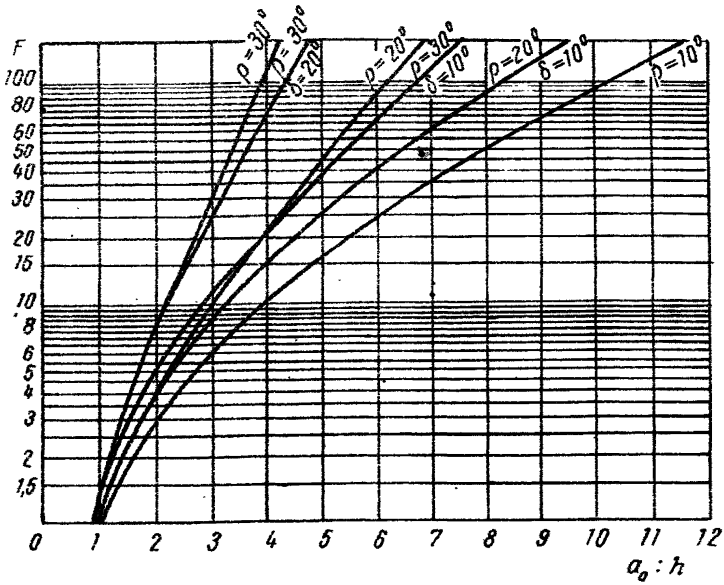


Рис.21. Зависимость несущей способности широких целиков от соотношения их размеров (по А.М.Ильштейну, Ю.М.Либерману, Е.А.Мельникову и др.)

Чтобы судить о степени достоверности расчетов с использованием эмпирической зависимости (43), сравним результаты таких расчетов и расчетов методом теории предельного равновесия на примере, приведенном в /41, стр. 93 /. В указанной работе дано определение ширины барьерных целиков для двух значений глубины разработки: H = 200 и 400 м. Расстояние между осями барьерных целиков L =150; 200; 250 и 300 м. Мощность залежи полезного ископаемого h =12м. Угол залегания α =0°. Кубиковая прочность материала целика на сжатие $\sigma_{сж}$ =10000 т/м^2. Объемный вес пород подрабатываемой толщи γ =2,7 т/м^3. Коэффициент запаса $k_з$ = 3. Согласно методике /41/ расчеты ведутся по следующим формулам.

Фактическая нагрузка на целик равна

$$P = k_з\, k_\alpha\, \gamma\, HL.$$

С другой стороны, она выражается формулой

$$P = \sigma_{сж}\, h F\left(\frac{a_0}{h}, \rho, \delta\right).$$

Тогда

$$F\left(\frac{a_0}{h}, \rho, \delta\right) = \frac{k_з\, k_\alpha\, \gamma H}{\sigma_{сж}} \cdot \frac{L}{h}.$$

Вычислив правую часть этого уравнения, определяем по графику (рис.21) значение $\frac{a_0}{h}$, умножая которое на h находим искомую ширину целика a_0

В табл.15 даны результаты расчета ширины барьерных це-

Таблица I5

	H = 200 м				H = 400 м			
	L, м							
	I50	200	250	300	I50	200	250	300
I. $\rho = 20^0$, $\delta = I0^0$ (сухое трение)	I9,2	22,8	26,2	28,8	28,8	33,6	37,8	42,0
2. $\rho = 20^0$ (полное сцепление).	I7,5	I9,7	2I,6	24,0	24,0	26,4	29,5	30,2
3. $\rho = 30^0$ (полное сцепление)	I4,4	I6,0	I8,0	I9,3	I9,3	2I,6	23,0	25,8
4. $k_\phi = (\frac{b}{h})^{I/2}$	I9,2	23,5	27,I	30,5	30,5	37,2	43,2	48,6
5. $k_\phi = \frac{b}{h}$	I7,2	I9,8	22,I	24,2	24,2	27,9	3I,2	34,2
6. $k_\phi = (\frac{b}{h})^{2/3}$	I8,2	2I,7	24,8	27,8	27,8	33,0	38,4	42,I

ликов. Причем данные строк 1, 2 и 3, заимствованные из работы /41/, получены с использованием теории предельного равновесия при различных углах внутреннего трения ρ и трения на контактах с боковыми породами δ. Результаты расчетов, помещенные в строках 4 – 6, получены с использованием коэффициента формы k_ϕ по выражению (43) при разных значения x

Из сравнения данных табл.15 видно, что расчеты с использованием коэффициента формы по (43) при $x = 1/2$ (коэффициент Черна) дают завышенные результаты до 16% по сравнению с расчетами по теории предельного равновесия при условии сухого трения на контактах с боковыми породами; при полном сцеплении превышение оказывается в 1,3 – 1,9 раза. Почти полное совпадение (различие не превышает 5%) дает расчет с применением k_ϕ по выражению (43) при $x = 2/3$ и расчет по теории предельного равновесия для сухого трения. При значении $x = 1$ данные оказываются больше на 20% при $\rho = 20^0$ и на 30% при $\rho = 30^0$ и полном сцеплении на контактах с боковыми породами, но меньше на 20% по сравнению со случаем сухого трения.

Сравнение показывает, что коэффициент формы по (43) при

$\varkappa = 2/3$ и $\varkappa = 1/2$ применим в тех случаях, где имеет место сухое трение на контактах целика с боковыми породами. Если иметь в виду угольные пласты, то здесь, как правило, наблюдаются четкие контакты и весьма малое сцепление по ним. Различие в прочности угля и пород обычно существенное.

Проведенные исследования на шахте "Байдаевская - Северная" в Кузбассе по пласту 22 мощностью 1,35 м с углом падения 12° при вмещающих породах, представленных алевролитами средней крепости, показали следующее. Сопротивление сдвигу (сцепление) по контакту между выпиленным блоком угля и почвой колебалось от 0,17 до 0,26 и в среднем оказалось равным 0,20 кг/см^2. Угол трения по контакту изменяется от 5 до 10°, в среднем около 7°. Сцепление по контакту составляет всего около 1% от сцепления материала целика.

Исходя из указанных данных, можно считать, что случай сухого трения весьма близок к условиям на контактах угольных целиков с боковыми породами. В связи с этим использование выражения (43) при расчетах широких целиков следует считать допустимым при значениях $\varkappa = 2/3$ и $1/2$.

Наши эксперименты проведены при отношении ширины (диаметра) образца к его высоте не более 3, 9. К.И.Иванов, К.Г. Бетанели, Н.А.Архипов в результате исследований /42/ пришли к выводу, что коэффициент Церна справедлив при значениях $\frac{b}{h} \leq 7{,}5$. Холланд указывает /9/, что точное значение отношения $\frac{b}{h}$, когда можно пользоваться выражением Церна, неизвестно. Однако ссылаясь на свои опыты и после анализа вопроса, он считает, что коэффициентом Церна можно пользоваться при изменении $\frac{b}{h}$ от 1 до 10-12.

Учитывая сказанное выше, а также полученные в последнее время результаты опытов М.Борецкого и А.Кидибинского /43/ на блоках с отношением $\frac{b}{h}$ от 1 до 20, считаем допустимым пользоваться выражением (43) при $\varkappa = 2/3$ для целиков с отношением $\frac{b}{h}$ от 1 до 7 - 10. При наличии пластичных прослойков на опорных поверхностях целиков следует применять коэффициент формы по выражению (45). Несущая способность однородных целиков может также определяться методами теории предельного равновесия.

После того как изложены способы определения несущей способности однородных целиков в условно-мгновенном режиме нагружения, выясним характер влияния свойств боковых пород, неоднородности строения полезных ископаемых и длительности действия нагрузки на несущую способность целиков.

2. Влияние свойств боковых пород на прочность целиков

Поскольку вмещающие породы являются деформируемыми средами, их характеристика оказывает влияние на деформацию, распределение напряжений, характер разрушения и, в конечном счете, на несущую способность целиков. Для выяснения характера и степени влияния прочности и строения боковых пород на прочность целиков были проведены исследования на моделях из эквивалентных материалов /12/. Для испытаний использовались кубические образцы с размером ребра 6 см и прочностью при сжатии между стальными плитами 2,14 -2,50 кг/см^2. Размеры основания были: площадь - 18 х 18 см, высота - 9 см. Таким образом, размер стороны основания был в три раза, а его высота в полтора раза больше размера грани образца. Основание помещалось в деревянный ящик, свободное пространство между стенками последнего и основанием заполнялось эквивалентным материалом более значительной прочности, чем прочность основания или испытуемых образцов. Испытания образца проводились по схеме, показанной на рис.22. В исследо-

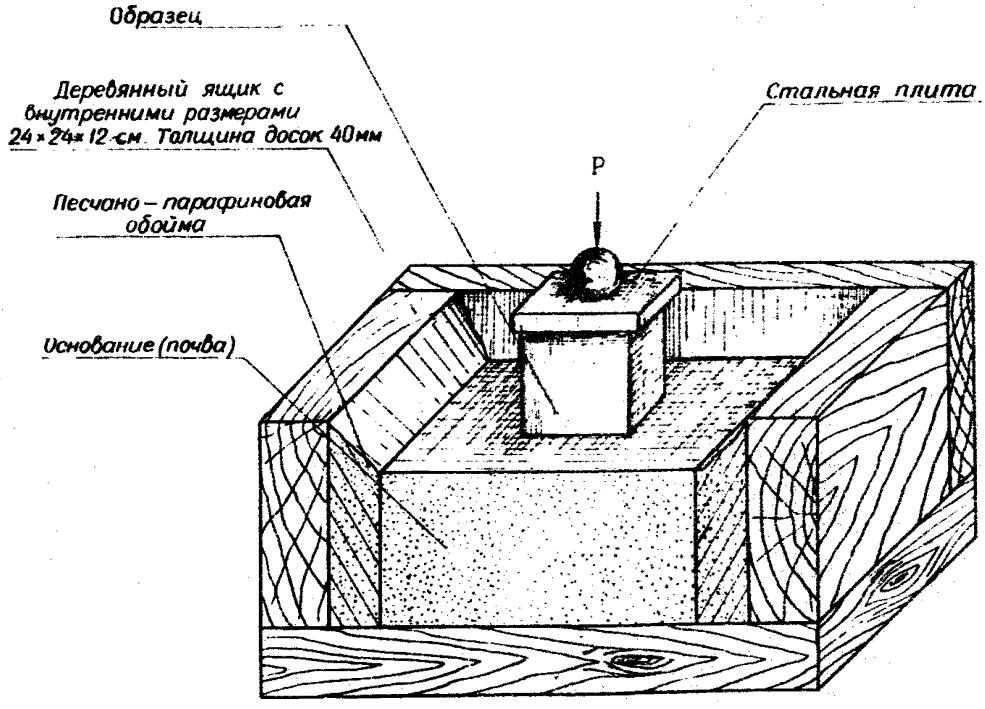


Рис.22. Схема модели по изучению влияния характеристики основания на несущую способность целика

ваниях основание, имитировавшее почву пласта, принималось однородным и состоящим из нескольких слоев различной прочности. Материал основания изменялся по своей характеристике от сыпучего (кварцевый песок) до прочности на одноосное сжатие в 3,77 кг/см^2. Всего было испытано 52 модели, кроме того проведено 12 испытаний эталонных образцов на одноосное сжатие между стальными плитами и 40 испытаний образцов для получения характеристики основания. Однотипных моделей испытывалось не менее трех-четырех. Для удобства сопоставления результатов опытов вычислялась прочность образцов и оснований, отнесенная к прочности кубического образца, испытанного обычным способом. Результаты опытов показывают, что с изменением прочности однородного основания (рис.23,а) прочность образца не остается постоянной. При относительной прочности основания от нуля до 0,25 – 0,3 прочность образца изменяется от 0,5 до 0,85. На участке прочности основания от 0,3 до 0,7 прочность образца увеличивается примерно на 10%, а при прочности основания единица и более она практически равна прочности образца, испытываемого между жесткими плитами.

При трехслойном основании возникают существенные усложнения характера деформирования основания и взаимодействия образца с основанием. Как видно из рис.23,б, при среднем слое из песка с увеличением относительной толщины верхнего слоя от нуля до 0,17 прочность образца повышается, а далее – понижается. В процессе нагружения отмечается некоторое вспучивание основания вблизи образца, затем могут возникать трещины и сдвиговые явления. Аналогично деформирование трехслойного основания, когда средний слой трехслойного основания состоит из пластичной глины.

Отметим некоторые особенности деформирования и разрушения образцов и оснований. В случае достаточно жесткого основания нарушений в нем не происходит, после разрушения образца остается отпечаток, имеющий большую глубину в центре, чем у краев. При слабом основании вокруг образца наблюдаются сдвиговые явления, и на месте разрушенного образца – четкий отпечаток, характеризующийся наличием углубления по периметру и уплотнением в центральной части (рис. 24,а). В процессе нагружения образца нижняя его часть заметно расширяется, особенно при слабых основаниях.

Характер разрушения образца зависит от прочности основания. При прочном основании наблюдается обычное образование двух пирамид, сходящихся вершинами в центре образца, причем размеры основания пирамиды равны размерам основания образца. При слабом основании опорная площадь образца уменьшается за счет образования отколов вдоль граней образца (рис.24,б). Опорная плоскость образца становится меньше,

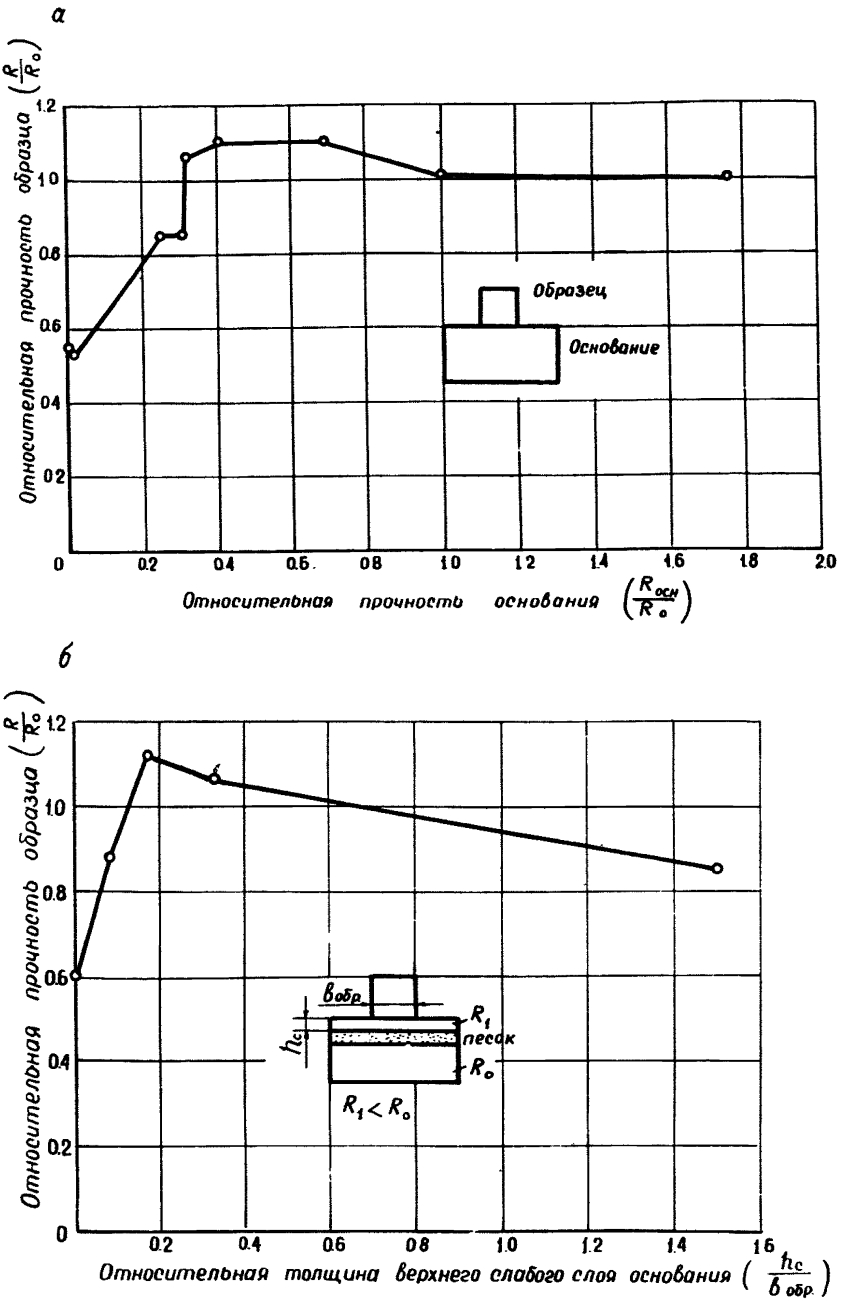
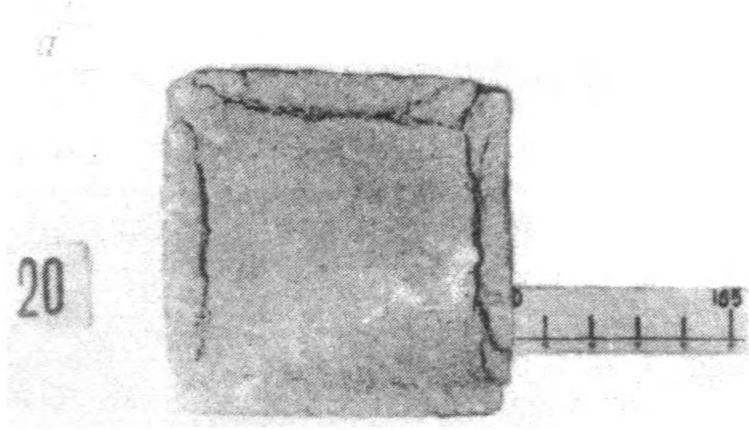


Рис.23. Изменение прочности образца в зависимости от прочности и строения основания:
а - однородное; б - трехслойное основание



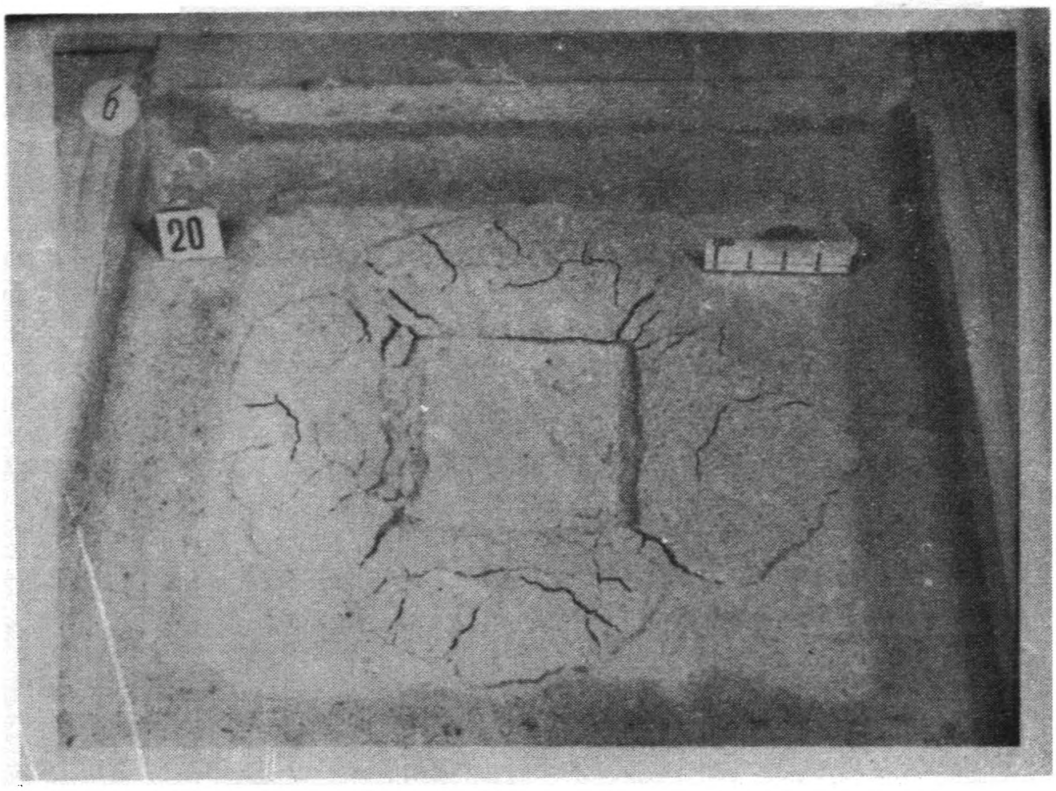


Рис.24. Характер нарушения слабого основания (а) и образования трещины на нижней опорной поверхности образца, испытываемого на слабом связном основании (б)

а отколовшиеся части образца создают углубления в основании (почве) вдоль периметра образца, в то время как новой опорной плоскости образца соответствует уплотненная часть отпечатка. В случае испытаний образца на основании из песка размеры нижней неразрушенной опорной плоскости уменьшаются втрое по сравнению с первоначальными размерами, а в откосах возникают трещины. Общая деформация при испытаниях на нежестком основании, как и следовало ожидать, больше, чем при обычном испытании образцов.

В целом проведенное на моделях изучение характера изменения прочности целиков в зависимости от характеристики и строения почвы, хотя и не может претендовать на завершенность, позволяет сделать следующие замечания и выводы.

Слабая почва обусловливает не только повышенные деформации, но снижает прочность целиков. Прочность целика тем больше может снижаться, чем меньше прочность боковых пород. Наличие слабых, рыхлых или пластичных слоев вносит существенные изменения в условия работы целиков. Эти изменения будут зависеть от размеров целиков, толщины указанных слоев и соотношения толщины последних и размеров целиков. При весьма слабых боковых породах и наличии в них пластичных или рыхлых слоев прочность и несущая способность целиков понижается. Пока не установлен метод определения несущей способности целиков в таких условиях, предлагается определять их прочность как для случая наличия пластичных прослойков на их опорных поверхностях (на одной или обеих в зависимости от свойств пород почвы и кровли). Это предложение распространяется на случай однородных боковых пород, когда их прочность на одноосное сжатие меньше 0,3 от прочности полезного ископаемого или когда под верхним слоем породы, мощностью до 0,1 от ширины целика, залегает пластичный или рыхлый слой.

Определение прочности и несущей способности целиков может производиться без учета влияния характеристики и строения боковых пород только при прочности последних равной или большей прочности полезного ископаемого.

3. Влияние неоднородности строения целиков

Неоднородные целики могут состоять из разнопрочных слоев, из однородного материала при наличии пластичных прослойков и, наконец, из разнопрочных слоев и пластичных прослойков.

В первом случае, поскольку изменение прочности каждого слоя в отдельности в зависимости от значения $\frac{b}{h}$ подчиняется закономерностям, приведенным в первом параграфе на-

стоящей главы, то изменение прочности целика, состоящего из слоев разной прочности, будет отражаться теми же зависимостями. Поэтому после определения кубиковой прочности такого неоднородного целика по формуле (26), учет влияния коэффициента формы может быть произведен по выражению (43).

Пример неоднородного целика при наличии пластичных прослойков по его опорным поверхностям рассмотрен в первом параграфе данной главы и предложено выражение для коэффициента формы (45).

Рассмотрим случай одного пластичного прослойка, расположенного в теле целика, и комбинаций пластичного прослойка и разнопрочности слоев. Если будет исследован этот последний, комбинированный пример, то полученных с его учетом данных будет достаточно для того, чтобы можно было оценивать прочность практически всех встречающихся неоднородных целиков.

Изучение влияния формы при наличии слабого и пластичного слоев на прочность целиков осуществлялось на моделях из эквивалентных материалов /44/. Слабый слой h_c составлял 0,2 от всей высоты образца и располагался по середине высоты последнего. Пластичный слой $h_п = 0{,}025\ h$ находится непосредственно над слабым слоем. Все модели (образцы) имели одинаковую высоту 8 см, а сторона квадратного основания составляла 2, 4, 8 и 16 см. Таким образом отношение $\frac{b}{h}$ было 0,25; 0,5; 1,0 и 2,0. Были изготовлены и испытаны образцы с отношением прочностей слабого и крепкого материалов 1 : 5 и 1 : 2. В каждой серии испытывалось по пять образцов.

Результаты испытаний показали следующее:

$\frac{b}{h}$	0,25	0,50	1,00	2,00
R'_c, кг/см^2	1,04	1,97	4,56	8,10
$\frac{R'_c}{R'_к}$	0,23	0,42	1,00	1,78
R''_c, кг/см^2	0,63	0,90	2,06	5,46
$\frac{R''_c}{R''_к}$	0,31	0,44	1,00	2,65

В только что приведенных данных: R_c и $R_к$ прочность на сжатие, соответственно, слабого и крепкого слоев образца; индексы $'$ и $''$ указывают на серии опытов.

На рис.25 нанесены данные опытов, а также построены графики по выражению (43) при $\varkappa$ = 1/2, 1 и 2/3. Наименьшие отклонения от опытных данных (15 - 30%) дает выражение (43) при $\varkappa$ = 1. При других значениях $\varkappa$ отклонения выше. Однако из осторожности для расчета неоднородных целиков, строения аналогичного испытанным моделям, рекомендуется $\varkappa$ принимать равным 2/3.

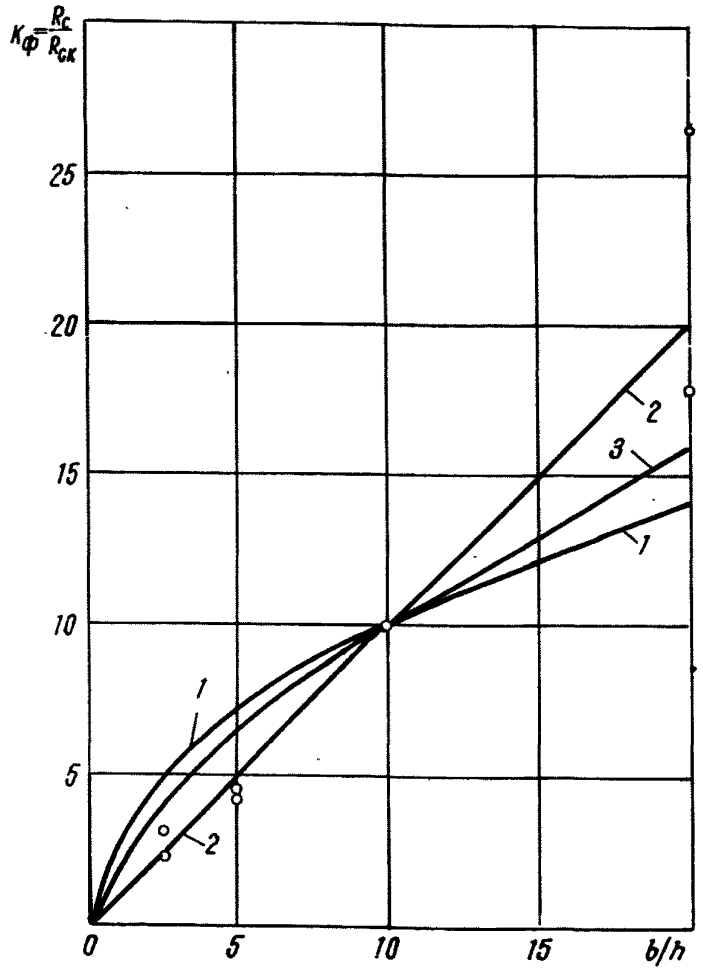


Рис.25. Изменение коэффициента формы неоднородных образцов: 0 – опытные данные; 1,2 и 3 – по выражению (43) соответственно при x = 1/2; 1 и 2/3

Помимо изложенного, в этом же разделе уместно рассмотреть вопросы прочности ослабленных выработками целиков. Проведенными исследованиями на кубических образцах из угля и мрамора, а также из искусственных материалов установлено /45/, что относительная прочность ослабленных целиков изменяется в соответствии со следующими зависимостями:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{F_{осл}}{F}, \qquad (50а)$$

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{F_{осл}}{F}\right)^2. \qquad (50б)$$

Первая из этих зависимостей дает почти во всех случаях значения больше опытных, особенно существенны отклонения от прочности ослабленных угольных образцов. Вторая зависи-

мость несколько лучше согласуется с общим характером расположения значений относительных прочностей.

Для ленточных целиков, ослабленных выработками или скважинами одного продольного направления, зависимости могут быть представлены в следующем виде:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{b_{осл}}{b}, \qquad (51а)$$

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{b_{осл}}{b}\right)^2. \qquad (51б)$$

В этих формулах: R и R_0 – прочности ослабленного и неослабленного целика; $F_{осл}$ – площадь поперечного сечения целика за вычетом площади ослабляющих выработок; F – то же неослабленного целика; $b_{осл}$ – ширина ленточного целика за вычетом суммарной ширины выработок; b – ширина неослабленного ленточного целика.

Характер изменения прочности ослабленных целиков в зависимости от соотношения ширины и высоты изучался на кубических образцах из угля. Размер основания был принят 5х5 см, а кубиковая прочность неослабленных образцов одного типа угля была 150 кг/см^2, другого – 70 кг/см^2. Ослабление образцов осуществлялось пятью отверстиями диаметром 0,3 см каждое, пробуренными в одной плоскости поперечного сечения образца. Результаты испытаний приведены на рис.26. Там же

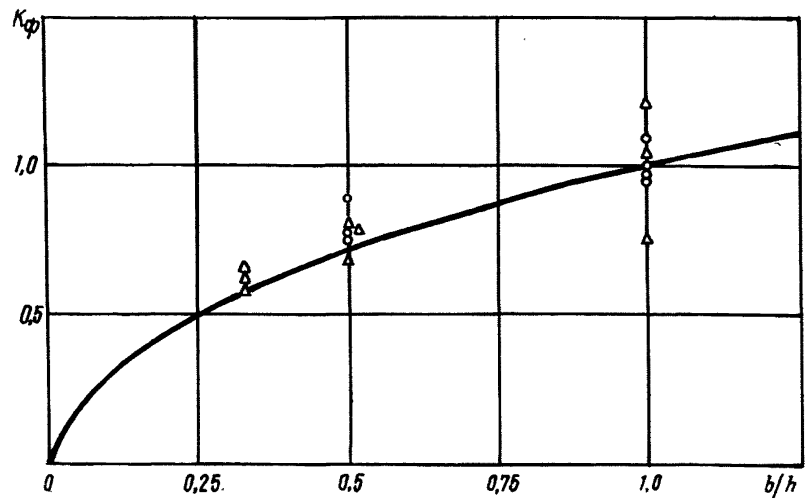


Рис.26. Изменение коэффициента формы ослабленных угольных образцов

построена кривая изменения коэффициента формы по выражению (43) при $\varkappa = 1/2$.

Отклонение расчетных показателей от средних опытных не превышает 10%, а от отдельных испытаний – 20%, т.е. коэффициент формы ослабленных целиков удовлетворительно отражается коэффициентом Черна.

Таким образом характер изменения прочности неоднородных целиков, а также ослабленных целиков в зависимости от отношения ширины к высоте в общем подчиняется эмпирическим зависимостям, установленным для однородных целиков. Этими зависимостями и можно пользоваться для приближенных расчетов несущей способности неоднородных и ослабленных выработками целиков в режиме условно-мгновенного нагружения. Однако, поскольку опытов по установлению коэффициента формы проведено небольшое количество, этот вопрос желательно исследовать на более широком диапазоне материалов и при большем изменении соотношения размеров блоков.

Желательна также постановка теоретических исследований, в частности, по определению усредненных значений углов внутреннего трения и коэффициентов сцепления для неоднородных целиков.

4. Влияние длительности действия нагрузки

Для установления влияния длительности действия нагрузки были проведены опыты на однородных образцах из известняка и горючего сланца Эстонского месторождения при различных соотношениях диаметра и высоты. Испытания и обработка их результатов выполнялись аналогично изложенному в главе Ш. Результаты испытаний приведены в табл.16.

Таблица I6

Материал образца	Отношение диаметра основания к высоте $\frac{d}{h}$	Условно-мгновенная прочность образцов, R, кг/см^2	Отношение условно-мгновенной прочности образцов к прочности при $\frac{d}{h}=I$, $\frac{R}{R_к}$	Предел длительной прочности образцов R_∞ кг/см^2	Отношение пределов длительной прочности образцов к пределу длительной прочности при $\frac{d}{h}=I$, $R_\infty/R_{\infty;к}$	Отношение пределов длительной прочности к условно-мгновенной прочности, $\frac{R_\infty}{R}$
Известняк	0,5	485	0,7I	270	0,7I	0,56
	I,0	680	I,00	380	I,00	0,56
	2,0	I080	I,59	585	I,54	0,54
Горючий сланец	0,5	3I0	0,93	I50	0,94	0,48
	I,0	335	I,00	I60	I,00	0,48
	2,0	375	I,I2	I80	I,I2	0.48

Вычисленные отношения условно-мгновенных прочностей образцов к прочности образцов при $\frac{a}{h} = 1$ находятся в пределах, определяемых выражением (43) при $x = 1/2$, т.е. выражением (41). Аналогичные отношения для пределов длительных прочностей образцов известняка и горючего сланца практически полностью совпадают с соответствующими отношениями условно-мгновенных прочностей, как это видно из сопоставления соответствующих столбцов табл.16. Отсюда следует вывод, что характер изменения прочности однородных образцов или целиков в зависимости от соотношения их высоты к ширине (диаметру), установленный при условно-мгновенном нагружении, сохраняется и при длительном действии нагрузки.

Учитывая результаты исследований, изложенных в главе IУ, а именно одинаковые закономерности изменения условно-мгновенной и длительной прочностей неоднородных целиков кубической формы, в том числе и целиков с пластичными прослойками, в зависимости от соответствующих прочностей однородных материалов их слагающих, есть все основания распространить полученные результаты и, в частности формулу (34), на неоднородные целики с одинаковым строением и при разном соотношении высоты к ширине. Таким образом, изменение длительной прочности неоднородных целиков в зависимости от соотношения их ширины основания и высоты может быть учтено с помощью тех же выражений, что и изменение условно-мгновенной прочности.

Кроме исследования характера изменения длительной прочности в зависимости от соотношения диаметра и высоты образца, по испытаниям тех же образцов устанавливался характер изменения функции ползучести. Результаты этих испытаний, обработанные в соответствии с методикой, описанной в главе Ш, показали, что характер изменения функций ползучести образцов из одной и той же горной породы при различных соотношениях высоты и диаметра одинаков. Значения функции ползучести этих образцов для одного и того же момента времени имеют практически равные значения. Параметры функций ползучести α оказались постоянными для всех образцов данного вида горной породы независимо от соотношения их диаметра и высоты. Так, для известняка во всех случаях $\alpha = 0{,}15$, а для горючего сланца $\alpha = 0{,}20$. Параметры функции ползучести ξ оказались зависящими от соотношения диаметра и высоты образцов. Полученные значения этих параметров для известняка и горючего сланца при различных соотношениях диаметра и высоты приведены в табл.17. В таблице также даны значения модулей линейной деформации, установленные по испытаниям образцов для определения условно-мгновенной прочности при сжатии, и рассчитаны отношения этих модулей к параметрам функций ползучести. Сравнение данных

Таблица 17

Материал образца	Отношение диаметра образца к его высоте $\frac{d}{h}$	Параметр функций ползучести $\xi \cdot 10^{-4}$ кг/см^2 · час$^{\alpha}$	Модуль линейной деформации образцов $E_0 \cdot 10^{-4}$, кг/см^2	Отношение $\frac{E_0}{\xi}$, час$^{-\alpha}$	Среднее отношение $\frac{E_0}{\xi}$, час$^{-\alpha}$
Известняк	0,5 1,0 2,0	109 151 200	30 40 62	0,275 0,265 0,310	0,280
Горючий сланец	0,5 1,0 2,0	4,4 5,0 5,0	1,3 1,4 1,55	0,296 0,280 0,310	0,295

в табл.17 показывает, что вычисленные отношения модулей линейной деформации E_0 к параметрам функций ползучести ξ для образцов определенного вида пород отклоняются от средних значений не более, чем на 5 - 10%, т.е. остаются практически постоянными при разном соотношении диаметра и высоты образцов.

Это соответствует постоянному значению параметра δ в выражении (24) для определения деформаций ползучести однородных пород. Следует полагать, что и у неоднородных образцов или целиков, имеющих одинаковое строение, но разное соотношение ширины (диаметра) и высоты, отношение $\frac{E_0}{\xi}$ также будет постоянным.

Таким образом, характер изменения длительной прочности целиков (образцов) в зависимости от соотношения ширины и высоты оказался одинаковым с изменением условно-мгновенной прочности. Что касается функций ползучести, то их значения для одного и того же момента времени зависят только от свойств пород, слагающих целики. При этом значение параметра функций ползучести α для целиков с разным соотношением высоты и ширины одинаковы, а параметр ξ изменяется так, что отношения модуля линейной деформации к этому параметру остаются постоянными.

Сопоставление расчетных данных и результатов шахтных наблюдений по предельному состоянию, а также по деформированию целиков во времени показало, что установленные зависимости в лабораторных условиях при их корректировке по показателям основных характеристик, получаемым в натурных условиях, являются достаточно представительными, чтобы их можно было рекомендовать для использования при определении прочности и деформаций во времени как однородных, так и неоднородных целиков.

В заключение необходимо сделать несколько замечений по

вопросу влияния длины целика на его несущую способность.

По данным опытов Г.Н.Кузнецова /47/ прочность нетрещиноватых однородных целиков прямоугольной формы в плане при отношении сторон основания от 1 : 1 до 1 : 4 практически не изменяется. С другой стороны, исследования А.А.Борисова и др. /46/ методами теории упругости показали, что напряжения по длине вытянутого целика распределяются неравномерно и повышаются к середине. Результаты этих исследований могут быть использованы для расчета критических нагрузок или необходимых размеров целиков, если будет выбрано условие прочности.

Если исходить из теории прочности Мора, то, как известно, прочность целика не зависит от изменения его длины, поскольку условие прочности не зависит от среднего по величине главного напряжения. На этом основании, а также учитывая экспериментальные данные Г.Н.Кузнецова для нетрещиноватых целиков, допустимо принимать прочность, не зависящей от их длины. По-видимому, этот вывод можно распространить на целики, состоящие из материала, равномерно ослабленного трещинами во всех направлениях. К таким материалам следует отнести угли подавляющего большинства месторождений, а также другие полезные ископаемые.

Для уточнения этих выводов представляется целесообразным развитие исследований, предпринятых А.А.Борисовым и др., так как известно, что независимость предельного состояния материала по теории наибольших касательных напряжений от среднего по величине главного напряжения вызывает сомнения.

Эффект изменения прочности целиков от их длины безусловно имеет место при наличии только одной системы трещин, особенно кососекущей по отношению к длинной оси целика. Такие случаи, видимо, могут быть характерны для отдельных рудных месторождений и их следует рассматривать, используя предложенный Г.Н.Кузнецовым /14/ графический метод оценки предельных состояний трещиноватого массива.

5. Пример определения несущей способности целика

Исходные данные. Пласт полезного ископаемого общей мощностью $m = 2{,}3$ м состоит из трех слоев (пачек) $m_1 = 0{,}5$ м, $m_2 = 1{,}0$ м, $m_3 = 0{,}8$ м. По данным натурных испытаний кубиковая прочность отдельных слоев в режиме условно-мгновенного нагружения составляет: $R_1 = 20$ кг/см^2; $R_2 = 80$ кг/см^2; $R_3 = 140$ кг/см^2. По данным лабораторных испытаний пределы прочностей при условно-мгновенном и длительном нагружении для тех же слоев составили

соответственно: $R_{1,0} = 40$ кг/см^2; $R_{1,0,\infty} = 24$ кг/см^2; $R_{2,0} = 200$ кг/см^2; $R_{2,0,\infty} = 150$ кг/см^2; $R_{3,0} = 420$ кг/см^2; $R_{3,0,\infty} = 335$ кг/см^2.

Необходимо определить несущую способность ленточного целика шириной $b = 2{,}3$ м, исходя из условно-мгновенной и длительной прочности.

Вычислим прочность целика при условно-мгновенном режиме нагружения. Для этого воспользуемся формулой (26). Вначале вычисляем прочность двух слоев m_1 и m_2 при заданном условии, что $R_2 > R_1$

$$R' = \frac{R_2}{1 + \left(\frac{R_2}{R_1} - 1\right)\frac{m_1}{m_1 + m_2}} = \frac{80}{\left(1 + \frac{80}{20}\right) - 1 \quad \frac{0{,}5}{0{,}5+1{,}0}} = 40 \text{ кг/см}^2$$

Поскольку $R' < R_3$, то запись формулы (26) и вычисления по ней прочности с учетом третьего слоя принимают следующий вид:

$$R = \frac{R_3}{1 + \left(\frac{R_3}{R'} - 1\right)\frac{m_1 + m_2}{m_1 + m_2 + m_3}} = \frac{140}{1 + \left(\frac{140}{40} - 1\right)\frac{0{,}5+1{,}0}{0{,}5+1{,}0+0{,}8}} = 53 \text{ кг/см}^2$$

Несущая способность целика согласно (47) будет равна

$$P = bR\left(\frac{b}{w}\right)^{2/3} = 2{,}3 \cdot 530\left(\frac{2{,}3}{2{,}3}\right)^{2/3} = 1220 \text{ т/пог.м.}$$

Для расчета несущей способности целика по пределу длительной прочности необходимо установить пределы длительных прочностей отдельных слоев, используя данные испытаний образцов. Однако, для этого предварительно установим соотношения между пределами прочностей образца при условно-мгновенном и длительном нагружениях.

Они будут следующими: $\frac{R_{1,0,\infty}}{R_{1,0}} = \frac{24}{40} = 0{,}6$;

$\frac{R_{2,0,\infty}}{R_{2,0}} = \frac{150}{200} = 0{,}75$; $\frac{R_{3,0,\infty}}{R_{3,0}} = \frac{335}{420} = 0{,}8$.

Имея значения этих соотношений пределы длительных прочностей отдельных слоев в массиве в соответствии с предложением, изложенным в § 2 главы III, получим равными:

$R_{1,\infty} = \frac{R_{1,0,\infty}}{R_{1,0}} \cdot 0{,}6 \cdot 20 = 12$ кг/см^2; $R_{2,\infty} = \frac{R_{2,0,\infty}}{R_{2,0}} \cdot 0{,}75 \cdot 80 = 60$ кг/см^2; $R_{3,\infty} = \frac{R_{3,0,\infty}}{R_{3,0}} \cdot R_3 = 0{,}8 \cdot 140 = 112$ кг/см^2.

Предел длительной прочности для первых двух слоев согласно (34) при условии, что $R_{2,\infty} > R_{1,\infty}$ будет

$$R'_{\infty} = \frac{R_{2,\infty}}{1+\left(\frac{R_{2,\infty}}{R_{1,\infty}}-1\right)\frac{m_1}{m_1+m_2}} = \frac{60}{1+\left(\frac{60}{12}-1\right)\frac{0,5}{0,5+1,0}} = 26 \text{ кг/см}^2.$$

Поскольку $R'_{\infty} < R_{3,\infty}$ то запись формулы (34) и вычисления по ней для учета влияния прочности третьего слоя принимают следующий вид:

$$R_{\infty} = \frac{R_{3,\infty}}{1+\left(\frac{R_{3,\infty}}{R'_{\infty}}-1\right)\frac{m_1+m_2}{m_1+m_2+m_3}} = \frac{112}{1+\left(\frac{112}{26}-1\right)\frac{0,5+1,0}{0,5+1,0+0,8}} = 36 \text{кг/см}^2$$

Таким образом, несущая способность целика по пределу длительной прочности будет равна

$$P_{\infty} = b R_{\infty}\left(\frac{b}{h}\right)^{2/3} = 2,3 \cdot 360 \left(\frac{2,3}{2,3}\right)^{2/3} = 830 \text{ т/пог.м.}$$

Приведенный пример является иллюстрацией хода определения прочности и несущей способности неоднородного целика.

Конкретные примеры использования методики определения несущей способности целиков даются в работах /7, 12, 48, 49/ применительно к выбору конструктивных элементов систем разработки для условий угольных пластов в Кузнецком бассейне и пласта горючего сланца Прибалтийских месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аммосов И.И. и Еремин И.В. Трещиноватость углей. М., изд-во АН СССР, 1960.

2. Герчиков Е.А. Исследование упругих свойств горных пород в условиях естественного залегания. М., ОНТИ, 1938.

3. Шеляпин С.П. Выбор оснований под сооружения по данным исследований грунтов. Госгеолиздат, 1945.

4. Бич Я.А. Методические указания по проведелнию натурных испытаний механических свойств угля и пород с помощью давильной установки. Л.,ВНИМИ, 1966.

5. Бублик Ф.П. Результаты исследований несущей способности целиков. Труды ВНИМИ, сб. № 76, 1970.

6. Бич Я.А., Бублик Ф.П. Об определении прочности пластов угля на сжатие. Труды ВНИМИ, сб.№ 50,1963.

7. Бублик Ф.П. Методическое пособие по определению основных параметров систем разработки с гидромеханизацией в условиях пологих пластов. Л.,ВНИМИ, 1967.

8. Evans J.,Pomeroy C.D.,Berenbaum P. The compressive strength of coal. Colliery Engineering,1961,38.

9. Holland C.T. Design or pillars for overburden support. Mining Congr.J.,March-April 1962.

10. Протодьяконов М.М. Методы оценки трещиноватости и прочности горных пород в массиве. М., изд-во ИГД им.А.А.Скочинского, 1964.

11. Чирков С.Е. Влияние масштабного фактора на прочность угля. М., "Наука", 1969.

12. Бублик Ф.П. Методическое пособие по определению основных параметров систем разработки с короткими забоями для пологих пластов Кузбасса, Л., ВНИМИ, 1965.

13. Bieniawski Z.T. The effect of specimen size on compressive strength of coal. Int.J.of Rock Mechanics and Mining Sciences.,1968,V.5,no.4.

14. Кузнецов Г.Н. Графические методы оценки предельных состояний трещиноватого массива вокруг горных выработок. Сб."Доклады Всесоюзной конференции по механике горных пород". Апатиты, 1970.

15. Протопопов И.И. Исследование вопросов, связанных с отображением показателя прочности горных пород при геометризации некоторых рудных месторождений полезных ископаемых (на примере медно-никелевых месторождений Печанги). Автореферат кандидатской диссертации.Л., 1968.

16. Руппенейт К.В., Тарасова И.В. Способы учета влияния различных классов трещин на деформируемость массивов горных пород. Сб."Доклады Всесоюзной конференции по механике горных пород", Апатиты, 1970.

17. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. Углетехиздат, 1947.

18. Карташов Ю.М. Методические указания по ускоренным лабораторным испытаниям слабых горных пород на длительную прочность. Л., ВНИМИ, 1966.

19. Вялов С.С., Городецкий С.Э., Ермаков В.Ф., Зацарная А.Г., Пекарская Н.К. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов. М., "Наука",1966.

20. Бич Я.А., Ставрогин А.Н. Методические указания по длительным испытаниям горных пород. Л.,ВНИМИ 1968.

21. Фисенко Л.Г. Устойчивость бортов угольных карьеров. Углетехиздат, 1956.

22. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложение. Алма-Ата, "Наука", 1964.

23. Гуменюк Г.Н. Экспериментальное изучение свойств ползучести карагандинских горных пород.Автореферат кандидатской диссертации. Алма-Ата, АН Каз.ССР, 1968.

24. Матвеева В.П. О некоторых особенностях проявления ползучести каменного угля. Сб. "Проблемы механики горных пород". Алма-Ата, 1966.

25. Манасевич А.Д. Физико-механические свойства углей пласта Волковского шахты "Центральная" треста Кемеровуголь. Сб. Научн.тр. Кемеровского горного института. Кемерово, 1956.

26. Кузнецов Г.Н., Бублик Ф.П., Кузнецов С.Т. Прочность неоднородных междукамерных целиков. Труды ВНИМИ, сб.№ 45, 1962.

27. Бублик Ф.П. Оценка несущей способности неоднородных целиков. Сб. "Проблемы сланцедобывающей промышленности Эстонской ССР. Л., "Недра", 1968.

28. Ким Д.Н. Влияние структуры на сдвиговую прочность массива и определение расчетных механических характеристик. Труды ВНИМИ, сб.№ 72, 1969.

29. Иванов Г.А. К определению несущей способности целиков с пластичными прослойками. Труды ВНИМИ, сб. № 78, 1970.

30. Бублик Ф.П., Иванов Г.А. Исследование длительной прочности и ползучести неоднородных целиков. Труды ВНИМИ, сб.№ 78, 1970.

31. Бублик Ф.П., Иванов Г.А. Исследование длительной прочности неоднородных целиков. "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1970, № 6.

32. Слесарев В.Д. Определение оптимальных размеров целиков различного назначения. Углетехиздат, 1948.

33. Трумбачев В.Ф., Мельников Е.А. Распределение напряжений в междукамерных целиках и потолочинах. Госгортехиздат, 1961.

34. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. Углетехиздат, 1954.

35. Раденко Е.С. К определению несущей способности рудных целиков с прослойками слабых пород. "Добыча и обогащение руд цветных металлов", 1964, № 2.

36. Безкаравайный В.Г. Устойчивость неоднородных целиков. Записки ЛГИ, т.49, вып.1, 1964.

37. Ливицкий А.А. Методы расчета междукамерных целиков и потолочин при разработке крутопадающих рудных месторождений. В сб. "Методы определения размеров опорных целиков и потолочин". М., Изд-во АН СССР, 1962.

38. Бублик Ф.П., Авершин С.С. Исследование зависимости несущей способности целиков от их формы и условий на контактах. Труды ВНИМИ, сб.№ 70, 1968.

39. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. Гостехиздат, 1954.

40. Авершин С.Г. Вопросы определения параметров камерных систем разработки полезных ископаемых. В сб."Методы определения размеров опорных целиков и потолочин".М., Изд-во АН СССР, 1962.

41. Ильштейн А.М., Либерман Ю.М., Мельников Е.А. и др. Методы расчета целиков и потолочин камер рудных месторождений. "Наука", 1964.

42. Иванов К.И., Бетанели К.П., Архипов Н.А. К расчету опорных угольных целиков. "Технология и экономика угледобычи", 1966, № 5.

43. Borecki M., Kidybinski A. Coal strength and bearing capacity of coal pillars. Proceedings of the 2-nd Congress of the Int. Society for Rock Mechanics., Beograd, No.3-21.

44. Бублик Ф.П., Палий В.Д., Орлов Ю.Д., Иванов Г.А. К вопросу о прочности неоднородных целиков. "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1966, № 2.

45. Бублик Ф.П. Некоторые вопросы определения несущей способности целиков. Сб. "Безлюдная выемка", ЦНИИТЭИ, 1965.

46. Борисов А.А., Нифантов Б.И., Ро-

м а д и н Н.М. Расчет напряжений в междукамерных целиках. Записки ЛГИ, т.1, вып.1, 1966.

47. K u z n e c o v G.N. Einige Elemente des Bruchmechanismus klüftiger Schichtgesteine über Abbauen und die Bedingungen der Standfestigkeit des Hangenden. Bericht über das 9. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik. Akademie-Verlag, Berlin, 1968.

48. Б у б л и к Ф.П., Г р о м о в Ю.В., Б ы ч к о в Ю.Н. Выбор параметров управления кровлей и конструктивных элементов комбинированных систем разработки мощных пологих пластов. Л., ВНИМИ, 1970.

49. Б у б л и к Ф.П., Ж а р к о в С.Н., П л а х о в А.В. Временные указания по определению конструктивных элементов систем разработки с управлением кровлей целиками на сланцевых шахтах Прибалтийского бассейна. Л., ВНИМИ, 1972.

50. Ф и с е н к о Г.Л., М о ч а л о в А.М. Методические указания по производству натурных испытаний сопротивления сдвигу неоднородных, слоистых и трещиноватых пород. Л., ВНИМИ, 1965.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение 3

Глава 1. Основные положения методики определения несущей способности целиков 5

1. Факторы, влияющие на прочность целиков. . . . 5

2. Основные положения методики определения механических свойств горных пород и несущей способности целиков 10

Глава 11. Определение основных механических характеристик однородных горных пород. 12

1. Схемы натурных испытаний для определения основных характеристик горных пород. 12

2. Методика натурных испытаний. 15

3. Сравнение данных натурных и лабораторных испытаний 19

Глава Ш. Исследование длительной прочности однородных горных пород 24

1. Методика исследований 24

2. Результаты исследований 29

Глава 1У. Определение прочности неоднородных горных пород 39

1. Исследование прочности при условно-мгновенном режиме нагружения 39

2. Исследование длительной прочности 53

3. Оценка предложенных зависимостей 59

Глава У. Определение несущей способности целиков. 63

1. Способы определения несущей способности однородных целиков 63

2. Влияние свойств боковых пород на прочность целиков 72

3. Влияние неоднородности строения целиков . 76

4. Влияние длительности действия нагрузки . 80

5. Пример определения несущей способности целика 83

Литература 86

Печатный цех ВНИМИ Заказ № 82 Тираж 600 21/XII-72

1 Объем 4 п.л. Цена 53 к.

gost.e-ecolog.ru