МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА
ВНИМИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА СЖАТИЕ

Ленинград
1973

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА
ВНИМИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА СЖАТИЕ

Ленинград
1973

УД. [illegible]:539.411

Аннотация

В настоящих «Методических указаниях . . .» описаны разработанные лабораторией механических испытаний ВНИМИ методы испытаний горных пород при одноосном и объемном сжатии. Указания составлены канд.техн.наук Ю.М.Карташовым и инж. А.А.Грохольским.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ). 1973.

Введение

Прочностные показатели горных пород являются важнейшими физико-механическими характеристиками, учет которых необходим при решении различных горнотехнических задач. Среди этих показателей основное положение занимает предел прочности на одноосное сжатие — основная константа различных материалов, в том числе и горных пород. Практически в каждой лаборатории, занимающейся исследованием физико-механических свойств пород, прежде всего определяют предел прочности на одноосное сжатие. К настоящему времени имеется большое количество результатов испытаний пород на одноосное сжатие, разработаны и разрабатываются новые методы определения этого показателя, предлагаются различные нормативные положения по проведению испытаний.

С одной стороны, повышенный интерес исследователей к определению основного прочностного показателя горных пород является положительным фактором, так как позволяет более обоснованно решать целый ряд горнотехнических задач. Однако различие в методиках испытаний не позволяет сопоставлять результаты испытаний отдельных исследователей, приводит к дублированию работ, удорожает проведение исследований и затрудняет использование опытных данных. В различных организациях используются образцы кубической, призматической или цилиндрической формы, образцы-диски (для испытаний методом соосных пуансонов), образцы полуправильной и неправильной формы и т.д. Торцевые усилия при этом также различны: жесткая заделка торцов, сухое трение, смазка и различного рода прокладки (парафин, свинец, пластмасса и др.).

В работе [1] детально изложены основные факторы, влияющие на прочность пород при сжатии (масштабный фактор, форма образца, торцевые условия, скорость нагружения, вертикальный размер образца и т.д.). Можно ли пренебречь влиянием этих факторов, так ли велико их влияние на прочность? Для примера можно указать, что только различные условия на торцах образца для одной и той же породы, как доказывается в вышеупомянутой монографии, могут вызвать изменение предела

прочности породы на одноосное сжатие более чем в пять раз. Почти такое же влияние на прочность оказывает и вертикальный размер образцов.

Необходимость стандартов на методы испытаний признается всеми исследователями. В последнее время некоторыми организациями разрабатываются проекты стандартов на различные виды испытаний: одноосное сжатие и растяжение, изгиб, срез и т.д. Можно отметить, что по некоторым отдельным нормативным положениям особых разногласий среди исследователей не имеется (скорость нагружения, масштабный фактор, форма образца и др.). По другим положениям, к которым в первую очередь надо отнести торцевые условия при испытаниях, вертикальный размер образца, наличие шаровой центрирующей опоры, пока не удалось прийти к общему мнению. Имеющиеся предложения по стандартизации метода испытаний на сжатие, в том числе и «Проект международного стандарта», основаны, как правило, на волевом принятии торцевых условий и вертикальных размеров образцов, без достаточного научного и экономического обоснования этих положений.

В настоящей работе описаны методы и приборы, разработанные и применяемые в лаборатории механических испытаний ВНИМИ, для определения прочности горных пород на одноосное сжатие. Особое внимание при разработке методов испытаний было обращено на детальное обоснование торцевых условий при испытаниях и вертикальный размер испытываемых образцов, даны рекомендации по проведению испытаний пород на сжатие, описаны некоторые интересные особенности деформирования и разрушения пород при условии создания в них однородного напряженного состояния.

Необходимо учитывать, что стандарты могут быть разработаны как для грубого, приближенного определения прочности на сжатие, так и для более точного (эталонного) определения этого показателя [2]. Наличие нескольких методов определения какого-либо показателя свойств пород обосновано целью проводимых испытаний: так, например, на ранних стадиях освоения месторождения, на этапе подготовки проектного задания, когда требуются ориентировочные сведения о свойствах пород, вполне могут быть применены простые, приближенные методы испытаний, без применения сложной и дорогой испытательной аппаратуры, с меньшими требованиями к качеству обработки поверхности образцов. В тех же случаях, когда требуется получение более детальных и точных сведений о свойствах пород, необходимы более точные и представительные методы испытаний. В последнем случае особую важность представляет возможность получения истинной* (см. стр.5), или действительной прочности горных пород на одноосное сжатие (эталонная прочность).

При разработке метода определения истинной прочности горных пород на одноосное сжатие большое внимание было уделено созданию в материале образца однородного напряженного состояния.

Результаты испытаний пород на одноосное сжатие позволили также авторам дать предложения по упрощенному определению показателей объемной прочности горных пород (сцепления и угла внутреннего трения). Краткое изложение упрощенного метода испытаний приведено в настоящей работе.

Введение, гл.II и § 1, 2, 3, 5 гл.I написаны канд.техн.наук Ю.М. Карташовым и инж. А.А.Грохольским; § 4 гл.I — канд.техн. наук Ю.М.Карташовым; приложения составлены инж. А.А.Грохольским.

---

* Под истинной или действительной прочностью породы на одноосное сжатие подразумевается прочность образца горной породы конкретных геометрических размеров, при условии создания в материале образца напряженного состояния, близкого к однородному. В настоящих Указаниях не затрагивается вопрос о масштабном факторе, о переходе от свойств образца к свойствам массива (к стр.4).

ГЛАВА I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРОД НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ

Применяемые в настоящее время методы испытаний образцов горных пород на одноосное сжатие отличаются, как уже указывалось выше, большим разнообразием. Подробное описание наиболее часто применяемых методов и приборов можно найти в работах [1, 2, 3, 4 и др.]. Однако, как ни парадоксально это звучит, несмотря на большой экспериментальный и теоретический материал, до сих пор проблема одноосного сжатия не решена полностью. Это объясняется тем, что условия проведения испытаний пород на сжатие не обеспечивают создание в материале образца напряженного состояния, близкого к однородному. Прочностные показатели и характер разрушения образцов во многом определяются этими условиями эксперимента (особенно — торцевыми условиями), а в различных теориях прочности, например, трактуются как данные испытаний при однородном напряженном состоянии материала образца. Это противоречие может быть разрешено только при постановке опытов с идеальными торцевыми условиями. Поэтому в последние годы основное внимание исследователей обращено на решение именно этой проблемы.

При любом из известных методов определения прочности пород на одноосное сжатие в образце возникает неоднородное напряженное состояние, искажающее значение прочности: концентрация напряжений у торцов при испытании образцов с жесткой заделкой (с трением по торцам) или растягивающие напряжения на торцах при испытаниях со смазкой или с низкомодульными прокладками. Неоднородность напряженного состояния в образце обусловлена, в основном, двумя причинами: внутренней, связанной с несовершенством строения пород и их структурными особенностями, и внешней, зависящей во многом от торцевых условий и от формы и размеров образцов [1]. Для большей части слабых и пластичных горных пород, а также для некоторых типов прочных пород неоднородностью напряженного состояния, связанной с внутренним строением пород, можно пренебречь, если размеры частиц породы по сравнению с размерами образца несоизмеримо малы. В этом случае внутри образца также неизбежны концентрации напряжений на границах частиц, включений, трещин, но при достаточно большом числе по-

следних, их малых размерах и относительно равномерном распределении в объеме образца можно оценивать эти концентрации напряжений как «однородность неоднородностей».

Говоря об однородном напряженном состоянии, следует иметь в виду только внешние причины, связанные со способом передачи нагрузки, обеспечивающим в максимально возможной степени однородность напряженного состояния и равномерное деформирование образца по его высоте. Ясно, что для пород с крупными включениями, редкими трещинами, ясно выраженной неравномерной слоистостью и т.д. принципиально невозможно обеспечить высокую однородность напряженного состояния при любом способе нагружения.

§1. Краткий анализ основных схем испытаний

Разработка методов испытаний для создания в материале образца однородного напряженного состояния (или близкого к однородному) шла, в основном, по четырем направлениям:

1) применение образцов специальной формы;
2) применение специальных давильных плит;
3) применение смазки и прокладок на торцах образца;
4) применение особой технологии испытаний.

Применение образцов специальной формы. Для исключения влияния торцевых условий на прочность и деформируемость образцов пород Г.Н.Кузнецовым предложена специальная форма цилиндрического образца (рис.1,*а*) с утолщенными концами и плавным переходом к рабочей части, в которой происходит разрушение [5]. Аналогичная форма образца была применена Паульдингом [6], изучавшим рост трещин при хрупком разрушении горных пород. Диаметр образцов в средней части был равен 12,5 *мм*, высота — 50 *мм*. Для уменьшения влияния концентраций напряжений концы образца делались несколько большего диаметра.

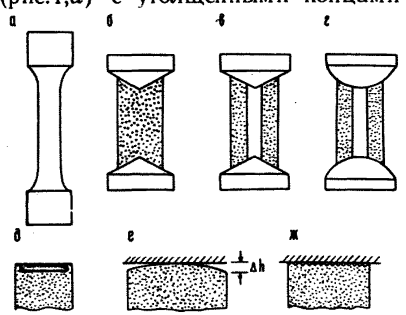


Рис.1

Принципиально новый подход к улучшению торцевых условий предложен в 1927 г. Зибелем и Помпом [7]. Для получения равномерного распределения напряжений они предложили сжимать цилиндрические образцы между двумя конусами, а сами образцы изготавливать с коническими углублениями на обоих торцах (рис.1.*б*). Если угол между плоскостью давления и образующими конусов будет равен углу трения испытываемого материала, то в образце будут приближенно получены

чисто осевые сжимающие напряжения. Недостатком этой схемы испытания является то, что в местах соприкосновения вершины конусной накладки с образцом возникают местные концентрации напряжений. Для их уничтожения В.М.Макушиным [8] предложена конструкция полых образцов (рис.1,*в*). Конусные накладки, применяемые вначале для испытания металлов, нашли применение и при исследовании физико-механических свойств горных пород [3, 9] и других материалов [10]. Наклон образующих принимается приблизительно равным углу, соответствующему направлению возникающих в образце «конических» трещин при испытании пород с трением по торцам. Модификацией этого метода является применение не конусных, а шаровых накладок и полых образцов со сферической выточкой на торцах (рис.1,*г*). Образцы при использовании конусных накладок деформируются без образования бочки.

Для пластичных горных пород может быть применена форма образца, разработанная М.В.Растегаевым [11]. Для уменьшения трения в торцевой части образца выполняется плоская выточка и заполняется каким-либо пластичным материалом, например парафином (рис.1,*д*). В зависимости от свойств испытываемого материала торцевое углубление может заполняться также свинцом, оловом, воском, пальмитиновой кислотой и др. [12].

Применительно к прочным горным породам одним из способов уменьшения сил трения и создания в образце напряженного состояния, близкого к однородному, является тщательная шлифовка (полировка) торцов образца. Исследованием влияния чистоты обработки торцевых поверхностей на прочность и деформируемость горных пород занимались Г.Н.Кузнецов [4], Г.Л.Фисенко [13], Б.В.Матвеев [14], М.Ф.Кунтыш [15] и др. Из теоретических исследований можно отметить работу Кокера [4], доказавшего, что при тщательной пригонке торцов образца, в последнем получается распределение напряжений, близкое к однородному.

Г.Л.Фисенко в 1951 г. проводил испытания на сжатие образцов песчаника с полированными торцами между полированными плитами, без смазки торцов [13, 85]. Между полированными поверхностями образцов и плит коэффициент трения был около 0,05—0,10. Разрушение образцов в этом случае происходило путем отрыва по плоскостям, параллельным линии действия нагрузки.

М.Ф.Кунтыш провел тщательное изучение влияния макро- и микронеровностей на торцах на изменение механической прочности образцов [15]. При повышении степени чистоты поверхности, получаемой шлифовкой и полировкой, наблюдалось закономерное снижение прочности. Исследования показали, что все образцы после шлифовки и полировки в той или иной

степени имеют овальность торцевой поверхности (рис.1,*е*). Погрешность при расчете напряжений, вызвавших разрушение, может достигать 100% и более. Результаты исследований М.Ф.Кунтыша необходимо учитывать при применении образцов с шлифованными торцами.

Так как тщательная шлифовка торцов образца не всегда может дать желаемые результаты, отдельные исследователи испытывали образцы пород с определенной степенью шероховатости на торцах. Так, в работе [16] для создания поля однородного напряженного состояния при сжатии рекомендовалось применение образцов с торцевыми частями, выполненными в виде гребенки (плоское напряженное состояние), с определенной высотой зубьев. М.Ф.Кунтышем отмечалось [15], что образцы пород, изготовленные с применением алмазной отрезки торцов, имели максимальные значения прочности (по сравнению с образцами, на которых торцы были отполированы или отшлифованы). Это объясняется тем, что при сжатии образца между шлифованными плитами практически вся его торцевая поверхность вступает в работу. Многочисленные неровности торца (рис.1,*ж*) вызывают, естественно, местные концентрации напряжений в начальной стадии нагружения. Однако повышенная шероховатость имеет и положительный эффект: породные выступы легко разрушаются при относительно небольшом усилии, а образующаяся породная крошка способствует равномерной передаче давления по всей поверхности образца.

Применение специальных давильных плит. Одним из оригинальных технических решений является устройство, предложенное С.Т.Кузнецовым и Ю.Г.Кротовым [17]. В предложенном устройстве (рис.2,*а*) для выравнивания контактных напряжений в образце на опорных плитах смонтированы накладки с зубчатой рабочей поверхностью. Торцы образцов после изготовления не шлифуют. Если образец представлен неровной поверхностью, поверхность распределения контактных напряжений достигается за счет хрупкого разрушения (выкрашивания) неровностей с образованием мелкой крошки, выполняющей роль эластичной подушки, выравнивающей напряжения. Основная идея, заключенная в этом способе, — разрушение приторцевой зоны образца и создание при этом породной подушки, выравнивающей напряжения на торце.

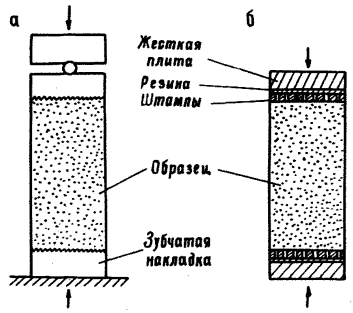


Рис.2

Усовершенствованием этого способа является предложение [18], сущность которого подроб-

но будет изложена ниже. Принципиальное отличие этого метода испытаний от изображенного на рис.2,*а*, заключается в том, что кроме шариковых инденторов, выполняющих такую же роль, как и зубцы на рис.2,*а*, имеется эластичная податливая прокладка (например, пластмасса), обеспечивающая равномерное нагружение образца при грубо обработанных его торцах.

Реализация поля однородного плоского напряженного состояния при сжатии осуществлена в работе [16], в которой предлагается применять вместо давильных плит жесткие гребенки с зубьями.

Одним из способов передачи равномерной нагрузки на образец является дискретная передача давления по отдельным участкам образца через различного рода площадки.

В исследованиях Хельмута [19] влияние трения по торцам устранялось оригинальной конструкцией давильных плит, которые набраны в виде пакета из стальных брусков сечением 3×5 *мм*. Между брусками оставляются зазоры в 0,02 *см* и в этих же пределах обеспечена их поперечная подвижность. Для устранения трения на поверхности образца А.Е.Десовым [82] разработана следующая схема испытаний. На поверхности образца устанавливаются специальные прокладки, представляющие собой металлические пластинки толщиной 16 *мм*, с наклеенной на них мягкой резиной толщиной 4—5 *мм*. Сверху резины укладываются металлические кубики размером $2\times2\times2$ *см*, с зазорами в обоих направлениях 1—2 *мм*. В работе [20] влияние трения по торцам устранялось аналогичным образом: вместо плоских давильных плит применялись стальные стержни сечением 3×5 *мм*, собранные в пакет, соответствующий размеру грани образца, и имеющие возможность взаимного поперечного перемещения в пределах 0,2 *мм*. В работе [21] для равномерного распределения нагрузки давление на образец передавалось через заполненную маслом медную подушку и через 64 прилегающих к образцу стальных кубика сечением $1{,}27\times1{,}27\times1{,}27$ *см*. Наборные штампы и резиновые прокладки описаны в работе [22]. Наборные штампы, состоящие из отдельных элементов призматической формы, контактируют с образцом и имеют размеры 10×10 *мм* с высотой 30 *мм*. Давление на штампы передается от гидравлической камеры; между отдельными призмами оставлены зазоры. Прочность испытанных кубиков бетона ($10\times10\times10$ *см*) была практически равной прочности призм ($10\times10\times60$ *см*). Отдельные нагружающие элементы применялись авторами работы [23]; реализация однородного напряженного состояния при этом осуществляется с помощью специальных стержневых прокладок. Наиболее распространенная схема испытаний со штампами изображена на рис.2,*б*.

Применение смазки и низкомодульных прокладок между торцами образца и давильными плитами — пожалуй, самый

старый способ создания однородного напряженного состояния в материале испытываемого образца.

Еще в 1900 г. Феппль пришел к выводу, что применение смазки между образцом и давильными поверхностями пресса позволяет добиться более однородного напряженного состояния в материале испытываемого образца [24]. Феппль установил также, что при испытании кубика материала со смазкой прочность получается ниже, чем при испытании того же материала с трением по торцам.

В качестве смазки (или тонких низкомодульных прокладок) различные исследователи применяли машинное масло, селиконовую пасту, жир, резину, мягкую и жесткую древесно-волокнистую плиту, фанеру, кальку, картон, цементный раствор, гипсовый слой, песок, графит, свинец, медь, пластмассу и другие материалы.

Сохранение цилиндрической формы образцов зернистых материалов при сжатии было достигнуто применением на торцах образца селиконовой пасты [25]. При этих исследованиях было отмечено, что смазка на торцах обеспечивает однородность напряженно-деформированного состояния. Селиконовый жир, например, уменьшает коэффициент трения на торцах до 0,03. Сохранение цилиндрической формы испытываемых образцов было также осуществлено с помощью резиновых прокладок (рис.3,*а*), снижающих трение по торцам образца [26]. В работе [27] изложены результаты исследований И.Н.Ахвердова и Л.К.Лукша. Усилие на образцы пород передавались через тонкую прослойку песка (рис.3,*б*).

Детальные исследования влияния прокладок и смазки на прочность и деформируемость различных материалов, в том числе и горных пород, приведены в работах [1, 4, 28, 29, 30, 31 и др.].

Главным аргументом при обосновании применения смазки или низкомодульных прокладок является следующее положение: смазка (или прокладка) уменьшает трение. Однако уменьшение трения еще не может гарантировать создания в образце напряженного состояния, близкого к однородному. Одновременно с уменьшением трения смазка и особенно

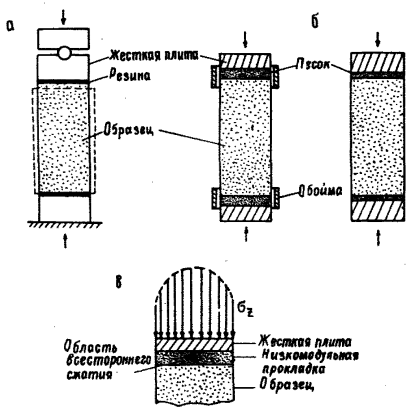


Рис.3

низкомодульные прокладки могут вызвать следующие нежелательные явления:

1. **Проникновение смазки (прокладки) в поры образца.** В работе [32] было доказано, например, что мягкие тефлоновые прокладки, применяемые для обеспечения равномерного распределения напряжений по обоим основаниям образца породы, искажали его прочность из-за внедрения прокладки в трещины и поры, что вызывало появление растягивающих напряжений на торцах. Такое же расклинивающее влияние оказывает свинец, олово, парафин и другие материалы.

2. **Растяжение торца образца.** Мягкие прокладки (смазка), существенно отличаясь упругими свойствами от материала испытываемого образца, деформируются при сжатии в большей степени, чем образец. Поэтому они вызывают растяжение приторцевой зоны образца. Так, например, опыты с измерением поперечных деформаций при испытании образцов пород на сжатие со смазкой определенной толщины показали, что деформации у торцов больше, чем в средней его части [33].

3. **Неравномерность распределения напряжений по торцу образца.** Мягкая прокладка (или смазка) в средней части находится в объемном напряженном состоянии, а вблизи от боковых граней образца наблюдается одноосное напряженное состояние. Это вызывает концентрацию нагрузки в средней части торца образца (рис.3,*в*). Если между мягкой прокладкой и образцом положить лист копировальной бумаги, то форма отпечатка будет свидетельствовать о характере распределения напряжений по торцу образца. Проведенные авторами настоящей работы исследования показали, что при использовании смазки и низкомодульных прокладок (парафин, резина) максимум напряжений приходится на центральную часть образца. Такое распределение напряжений вызывает появление дополнительных растягивающих напряжений и искажает значение прочности.

Влияние смазки легко проверить, испытав образцы породы с различным отношением высоты образца к его диаметру: чем ниже образец, тем меньше его прочность. Этот факт также свидетельствует о том, что смазка (или низкомодульная прокладка) может вызвать появление в торцевых зонах образца растягивающих напряжений, искажающих истинную прочность.

Существенное влияние на напряженно-деформированное состояние материала образца породы оказывает материал смазки (прокладки) и его толщина. На рис.4 приведены типичные кривые испытания пород со смазкой или с низкомодульными прокладками. Кривая *1* соответствует результатам испытаний породы с трением по торцам; кривые *2—5* — со смазкой (прокладкой) различной толщины (кривая *5* соответствует результатам испытаний с прокладкой максимальной толщины). В принципе можно рассматривать результаты испытаний с трением по торцам,

как испытания со смазкой (прокладкой) при толщине ее равной нулю. При увеличении толщины смазки (прокладки) получается «веер» кривых прочности, среди которых некоторая линия *3* будет примерно соответствовать прочности материала при напряженном состоянии, близком к однородному. Кривые, расположенные выше линии *3*, соответствуют условиям опыта с трением по торцам, а расположенные ниже — условиям опыта со смазкой.

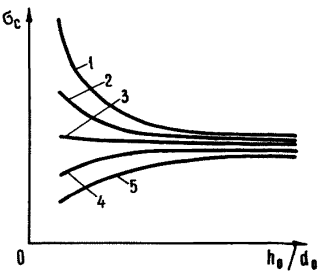


Рис.4

Данный подход (смазка торцов образца) к получению однородного напряженного состояния материала образца трудно рекомендовать как стандартный для различных типов горных пород, отличающихся по прочности и деформируемости. Еще в 1909 г. исследованиями Ринне было установлено, что для каждого типа породы необходимо экспериментально подбирать определенную «оптимальную» прокладку [34]. При применении таких низкомодульных прокладок, как, например, резина ($E \approx 0{,}20 \cdot 10^3$ *кг/см*^{2}; $\mu \approx 0{,}5$), в образце могут возникать растягивающие радиальные и тангенциальные напряжения, составляющие на контакте с прокладкой значения, равные примерно половине приложенного осевого сжимающего напряжения [35]. Напряжения в образце весьма чувствительны к отношению μ / E и отношению толщины прокладки к ее диаметру. При исследованиях следует стремиться к тому, чтобы μ / E для прокладки было меньше μ / E для образца [35].

Интересные результаты опытов с применением различных прокладок и смазок приведены М.Ф.Кунтышем [1]. Для исследований был взят известняк с разным отношением высоты образца к его диаметру (от 0,5 до 2,0). В качестве смазки (или низкомодульных прокладок) применялись парафин толщиной 1—2 *мм*, плотная резина, капрон, свинец, картон и металлические шлифованные стальные пластины. Толщина прокладок была выбрана равной 5 *мм*. Наибольшая прочность была у образцов, испытанных с трением по торцам и с прокладкой из картона, минимальная — при испытании пород с резиновой прокладкой. Прочность образцов известняка, испытанных с парафиновой смазкой, оказалась постоянной при различном отношении высоты образца к его диаметру (в пределах от 0,5 до 2,0). Это дает основание предполагать, что для данного типа породы (известняк) материал смазки (парафин) и его толщина (1—2 *мм*) оказались оптимальными, а величина прочности, полученная при таком испытании, оказалась близка к истинной прочности породы. Коэффициент внутреннего трения парафина был близок к коэффициенту внутреннего трения известняка.

Г.И.Ширко испытывал образцы бетона при различных торцевых условиях [29]. При определенной толщине парафиновой смазки на торцах образцов их прочность практически не изменялась с изменением отношения h_0/d_0 от 0,3 до 3,0 (h_0 и d_0 — соответственно высота и диаметр испытываемого образца).

Авторами настоящей работы, совместно с сотрудниками ВНИИПромгаза Н.С.Хачатурьяном и Е.С.Оксенкругом, проведены детальные исследования влияния торцевых условий на прочность и деформируемость соляных горных пород [31]. Однородное напряженно-деформированное состояние материала образцов было обеспечено при двух типах прокладок: 1) тонкий слой резиновой прокладки толщиной 0,25 *мм*; 2) парафиновая смазка (0,5 *мм*) в сочетании с медной фольгой (0,1 *мм*), примыкающей к торцу образца. В обоих случаях деформирование образца было однородным, без образования «бочки» или «антибочки» у торцов образца, а прочность не изменялась при изменении отношения h_0/d_0 от 0,5 до 3,0.

В работе [36] приведены результаты испытания на сжатие образцов чистой меди при различной толщине смазки (политетрафторэтилена) и при сухом трении образца о давильные плиты. При испытании с трением по торцам образец деформировался в виде «бочки», с двумя листами прокладки — наблюдалась обратная бочка, с одним листом — деформация была равномерная.

Результаты вышеприведенных исследований показали, что для одного типа горной породы (или какого-либо материала) можно подобрать какую-либо одну определенную смазку (прокладку), при которой напряженное состояние материала образца будет близким к однородному. Но эта прокладка (смазка) будет совершенно не пригодна для других типов горных пород.

Оригинальный тип прокладок был применен Кокером и описан в работе [4]. Кокером оптическим методом было изучено напряженно-деформированное состояние образца при применении прокладок из того же материала, что и испытываемый образец. Соприкасающиеся поверхности прокладки и образца были тщательно пригнаны друг к другу; толщина прокладки была больше, чем 0,5 диаметра образца. При этих условиях в образце реализовалось почти равномерное распределение напряжений. Подобные породные прокладки применялись при изучении физико-механических свойств пород различными исследователями [9, 30, 37 и др.]. Однако при детальном рассмотрении целесообразность применения таких прокладок весьма проблематична. В самом деле, представим себе образец горной породы диаметром d_0 и высотой h_0. Допустим, что к обоим торцам образца прилегают прокладки из той же породы диаметром d_0 и высотой, равной $0{,}6d_0$. Как было доказано, в испытываемом образце может быть создано однородное поле напряжений, если тор-

цы образца и прокладки плотно пригнаны друг к другу. Но наилучшая пригонка двух частей одного и того же материала получится, если прокладка будет естественным продолжением образца, без механического разделения. В таком случае надо брать высоту образца, равной $(3,0—3,5)d_0$, и условно рассматривать торцевые области его как породные прокладки. Нетрудно видеть, что в этом случае (наилучшем в отношении «пригонки» прокладки и образца) остаются нерешенными многие проблемы одноосного сжатия.

Основной вывод из анализа результатов испытаний пород на сжатие со смазкой: специальными смазками (прокладками) можно обеспечить напряженное состояние материала образца, близкое к однородному. Для каждого испытываемого материала необходима своя специальная смазка или прокладка. Ошибкой многих исследователей являлось то, что сжатие образца породы со смазкой или с низкомодульными прокладками без достаточного основания рассматривалось ими как испытание, позволяющее обеспечить в любых породах однородное напряженное состояние. Но проверка этой однородности (например, равномерность деформаций по высоте образца) практически не производилась.

Применение особой технологии испытаний. Для уменьшения сил трения между торцами образца и плитами пресса некоторые исследователи применяют специальную технологию испытаний, обеспечивающую более равномерное распределение напряжений по торцу.

Г.Д.Полосаткиным было предложено уменьшать трение на торцах при испытании металлических образцов вращением передающих давление накладок [38]. При определенном режиме вращения влияние изгибающего момента в образце может быть сведено к минимуму.

К.К.Лихарев для уменьшения торцевого трения применял фильтровальную бумагу, пропитанную парафином [39]. Нагрузка на образец металла подавалась ступенями. После каждой ступени нагрузки образец полностью разгружался и производилась смена фильтровальной бумаги на обоих концах. При такой последовательности этапов нагружения образцы деформировались равномерно, без образования бочки.

Одним из возможных путей к уменьшению трения на торцах образца может быть вибрационное приложение нагрузки [40]. На рис.5 изображены образцы из парафина, разрезанные (после нагружения) по вертикальной плоскости. На рисунке видны нити, вмонтированные в образцы перед испытанием. При испытании образцов выбрационными нагрузками, величина которых изменялась от 0 до некоторого давления с частотой $f = 8$ *гц*, характер распределения деформаций значительно равномернее, чем при статическом нагружении, так как торцы образца периодически освобождаются от нагрузки, что способствует уменьшению торцевого трения.

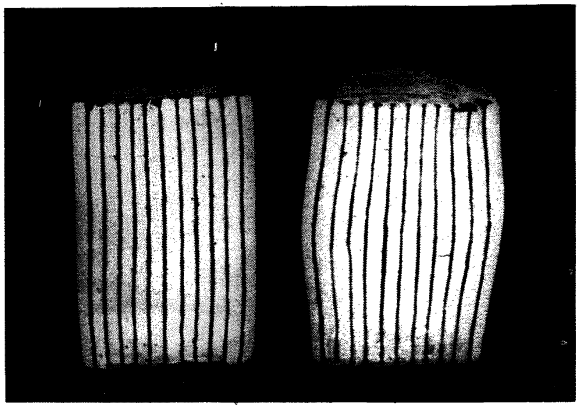


Рис.5

Оригинальный способ испытаний металлов на сжатие предложен А.А Родионовым и Е.С.Сизовым [41]. Если при нагрузке цилиндрический образец деформируется больше в средней части (явление «бочки»), то возникающее утолщение удаляют любым способом (химическим, электроискровым и т.д.), не создающим дополнительных деформаций в испытуемом образце. Таким образом, сжатие образца осуществляют с равным исходному и постоянным по всей высоте поперечным сечением. При последующем сжатии образца характер нового утолщения будет иным, так как более упрочненные участки образца будут при одном и том же усилии деформироваться меньше. По мнению авторов способа, таким приемом достигается повышение точности определения истинных напряжений. Метод целесообразно проверить на пластичных горных породах (соль, глины, мергель, мел и т.д.). Последовательность операций по этому методу изображена на рис.6.

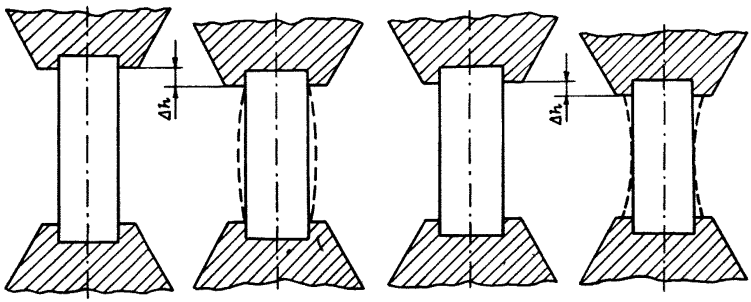


Рис 6

§ 2. Влияние отношения высоты образца к его диаметру на прочностные и деформационные свойства горных пород

Даже краткий анализ основных схем испытаний различных материалов, в том числе и горных пород, показывает, какое большое внимание уделяют исследователи получению показателей прочности при однородном напряженном состоянии материала. Однако наиболее распространенный метод испытаний пород на сжатие — испытание образцов цилиндрической формы между жесткими давильными плитами с сухим трением на торцах образца. Метод является наиболее простым в техничесом исполнении и широко применяется как в СССР, так и за рубежом. Схема испытаний образцов пород по этому методу изображена на рис.7. Для исключения погрешностей испытания от непараллельности торцов образца во ВНИМИ разработана конструкция самоустанавливающейся легкоподвижной шаровой опоры [2], которая позволяет надежно центрировать образец при нагружении и обеспечивает передачу давления на всю площадь торца образца в том случае, если поверхности торцов не параллельны друг другу Целесообразность применения таких шаровых опор была подтверждена, например, исследованиями ИГД им. А.А.Скочинского [86]. Применение шаровых опор, устанавливаемых на верхний торец образца, как доказано в работе [14], значительно уменьшает погрешности испытаний.

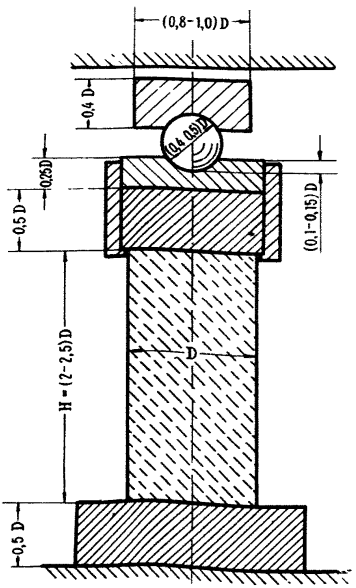


Рис.7

Основной недостаток метода испытаний пород с трением по торцам — неоднородность напряженного состояния материала образца, оказывающая влияние на его прочность и деформируемость. Но для большей части горнотехнических задач нет необходимости в точном (эталонном) определении прочностных показателей. Поэтому основные положения этого метода могут быть положены в основу для разработки стандарта по приближенному

определению прочности пород на одноосное сжатие (именно этот метод был, например, положен в основу при выработке проекта Международного добровольного стандарта и при разработке «Проекта стандартов» ИФЗ АН СССР).

Основной вопрос, по которому нет до сих пор согласования между отдельными исследователями,— какое отношение высоты образца к диаметру должно быть при таком методе испытания. Известно, что изменение этого отношения изменяет прочность образца в 3—5 раз. По этому вопросу существуют две точки зрения. Одни исследователи рекомендуют брать отношение высоты образца h_0 к его диаметру d_0, равное двум, другие предлагают брать это отношение равным единице Такой норматив, например, рекомендуется в «Проекте стандартов», разработанном ИФЗ АН СССР. На наш взгляд, это отношение выбрано волевым решением. Ссылки на то, что при таких соотношениях размеров образцов можно обеспечить экономию средств и времени на изготовление образцов, несостоятельны, так как еще большую экономию можно обеспечить, испытывая образцы, например, при отношении $h_0/d_0 = 0{,}5$ и т.д.

Анализ результатов испытаний пород с различным соотношением размеров образцов и с трением по торцам показывает следующее.

При сжатии образца породы с отношением $h_0/d_0 = 1$ в материале последнего наблюдается весьма неоднородное напряженное состояние. Торцевое трение препятствует свободному расширению торцов образца под нагрузкой и обусловливает объемное напряженное состояние материала образца. Это явление изучалось многими исследователями и изложено в работах [1, 3, 4, 29, 42 и др.]. Основные результаты этих исследований: чем меньше отношение h_0/d_0, т.е. чем ниже образец, тем больше его прочность

Напряженное состояние образцов разных пород зависит от соотношения упругих характеристик образца и давильных плит, а также от условий на торцах образца. Если, например, прочность образца с отношением $h_0/d_0 = 2$ принять условно за действительную прочность породы на одноосное сжатие, то испытание образцов с отношением $h_0/d_0 = 1$ аналогично испытанию высокого образца при объемном сжатии. Величина условного бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3$ при этом зависит от многих факторов и различна для разных типов пород. Испытания на сжатие низких образцов аналогичны испытаниям высоких образцов в стабилометре с неопределенной величиной бокового давления, различного для разных пород (сопоставление фактически несопоставимых величин). В этом явлении заключается одна из основных причин, по которой отсутствуют надежные формулы пересчета прочности в зависимости от вертикального размера об-

разцов. Как отмечалось в работе [1], для каждого материала существует собственная зависимость прочности от соотношения размеров образцов.

Одним из существенных недостатков метода испытаний с трением по торцам является также то, что шлифованная поверхность контактирующих с образцом давильных плит быстро изнашивается, особенно после испытания крепких горных пород, что приводит к значительным погрешностям испытаний. Необходимость частой замены давильных плит и повышенные требования к качеству обработки торцов образца связаны с определенными материальными затратами.

В работах [14, 43, 44, 45] приведены данные о влиянии высоты образца на его упругие постоянные. С увеличением вертикального размера образцов наблюдается закономерное снижение модуля упругости и увеличение коэффициента Пуассона. Изменение упругих постоянных породы практически прекращается при $h_0/d_0 \geqslant 2$. При таких соотношениях размеров образцов величины упругих постоянных не зависят от торцевых условий. Практические результаты обоснованы теоретическими расчетами, изложенными, например, в работах [14, 46, 47 и др.]. В этих исследованиях доказывается, что при одноосном сжатии образца горной породы у его торцов образуется конусная зона всестороннего сжатия, влияние которой распространяется по высоте образца на величину $(0{,}5—0{,}6)d_0$.

Результаты испытаний на ползучесть различных материалов, в том числе и горных пород, показали, что относительные деформации ползучести увеличиваются при увеличении высоты образца [48, 49, 50]. При величине $h_0/d_0 \geqslant 2$ деформации ползучести стабилизируются. Поэтому оптимальным отношением высоты образца к его диаметру при испытании пород на ползучесть принято отношение, равное двум.

Большое влияние оказывает это отношение и при исследовании предельных деформаций горных пород [51].

При различных методах испытаний горных пород отношение высоты образца к его диаметру рекомендуется принимать равным двум. Среди таких исследований можно отметить следующие:

1) изучение влияния жесткости испытательной машины на деформируемость и прочность горных пород, а также на поведение пород за пределом прочности [52];

2) исследование влияния скорости нагружения на прочность и деформации пород [53];

3) исследование влияния формы образца на величину энергоемкости разрушения [54];

4) исследование влияния эксцентриситета нагрузки на прочность и деформируемость различных материалов [55];

5) исследование влияния способа нагружения на прочность и деформируемость пород [56];

6) исследование влияния масштабного фактора на прочность пород [57];

7) исследование процесса разрушения пород [58] и т.д.

В большинстве случаев размеры образцов выбираются не волевым решением, а на основе детального обоснования. В работе [59] доказывается, например, что наиболее надежные и стабильные результаты при испытаниях на сжатие горных пород получаются, если отношение h_0/d_0 равно двум. В работе [60] анализируются различные факторы, влияющие на прочность и деформацию горных пород при сжатии (геометрия образца, твердость плит пресса, торцевое трение, равномерность распределения деформаций и др.). Для значительного уменьшения погрешностей испытаний, вызванных перечисленными факторами, предлагается испытывать образцы с отношением $h_0/d_0 = 2$. При таком соотношении размеров образца значительно увеличивается точность результатов испытаний и уменьшается влияние различных факторов на прочность и деформацию пород [60].

В работе [58] исследован процесс разрушения горных пород. Исследования показали, что начальную стадию процесса разрушения можно с уверенностью изучить только в том случае, если высота образца не менее чем в два раза превышает его диаметр.

Влияние масштабного фактора на прочность песчаника изучалось в работе [57]. Диаметр образцов изменялся в пределах от 15 до 76 *мм*, отношение h_0/d_0 — от 1,0 до 3,5. Результаты испытаний показали, что оптимальным соотношением, характеризующим форму образца, является соотношение $h_0/d_0 = 2{,}0—2{,}5$, при котором достигается максимальная стабильность результатов испытаний и их независимость от торцевых условий. Наиболее ненадежные данные были получены при отношении $h_0/d_0 = 1$; характеристики масштабного эффекта на таких образцах неточны и дают неверную информацию о влиянии масштабного фактора. Аналогичные результаты приведены в работе [61], где отмечалось, что кривые зависимости коэффициента формы, с увеличением отношения h_0/d_0 до двух и более, выполаживаются и затем практически не изменяются.

Влияние торцевого трения на результаты испытаний пород на сжатие исследовано в работе [62]. При отношении $h_0/d_0 \geqslant 2$ влияние трения на результаты испытаний оказывается незначительным. Наиболее полный анализ экспериментальных данных о влиянии высоты образца на прочность пород приведен в работе [1]. Анализ показал, что при отношении $h_0/d_0 \geqslant 2$ прочностные показатели пород практически не изменяются. Результаты специальных исследований [1, 33, 63] показали, что прочность пород при однородном напряженном состоянии близка к прочности пород, испытанных с трением по торцам при отношении $h_0/d_0 \geqslant 2$. Этот вывод относится как к результатам испытаний на одноосное сжатие, так и к результатам испытаний на

объемную прочность в стабилометрах. Следует отметить, что при испытаниях пород на объемную прочность в стабилометрах большинство исследователей также принимают это отношение, равное двум [63, 64, 65, 66, 70 и др.].

Б.П.Овчаренко предлагает в качестве стандартной величины сопротивления сжатию принимать прочность цилиндрических образцов с отношением $h_0/d_0 = 2$ [67]. Это же отношение рекомендуется, на основании детальных экспериментальных и аналитических исследований, Б.В.Матвеевым и др. [14]. В работе [1] сказано следующее: «На основе анализа теоретических данных и сравнительных испытаний образцов пород, а также при наличии достаточного количества материала и более совершенного оборудования по изготовлению образцов с применением для их обработки алмазных коронок и алмазных режущих дисков определение прочности при одноосном сжатии целесообразно проводить на цилиндрических образцах с соотношением высоты к диаметру, равным 2». Эти рекомендации обоснованы тем, что испытание на сжатие при таком соотношении размеров образцов дает величину прочности, близкую к действительной прочности породы. С увеличением этого отношения прочность практически не изменяется и порода находится в одном и том же напряженном состоянии, которое условно можно назвать однородным.

В работе [68] дан обзор исследователей США в области изучения физико-механических свойств горных пород. В обзоре отмечается, что большинство американских исследователей применяет при испытаниях пород на сжатие отношение $h_0/d_0 = 2{,}0 \div 2{,}5$. Это отношение рекомендуется как оптимальное для стандартных и для специальных испытаний горных пород.

Вопрос о стандартизации метода испытаний пород на сжатие нельзя рассматривать изолированно от других методов испытаний. Нельзя не учитывать, что в большинстве случаев при определении различных физико-механических характеристик горных пород применяются цилиндрические образцы с отношением $h_0/d_0 = 2$. Это отношение, как показал анализ, выбирается не произвольно, а на основе детальных исследований напряженного состояния материала образца и результатов испытаний пород на сжатие, и обеспечивает значительное увеличение точности испытаний. Во многих случаях проводить испытание с меньшей высотой образца принципиально невозможно. Известно, что при различных исследованиях горных пород определяется их прочность на сжатие. Так, при определении показателей объемной прочности пород (сцепления и угла внутреннего трения) в стабилометрах величина предела прочности на сжатие является необходимым элементом при построении паспорта прочности породы. Перед испытанием пород на ползучесть и релаксацию также определяется прочность на сжатие для правильного выбора нагрузок на образцы и подготовки аппарату-

ры к испытаниям. После определения упругих постоянных породы образец обычно раздавливается на прессе и полученное значение прочности сопоставляется с величинами упругих постоянных. Перечень методов испытаний, при которых необходимо определять прочность пород на сжатие на высоких образцах, можно продолжить. Что же произойдет, если при разработке стандарта испытаний на одноосное сжатие соотношение размеров образцов принять равным, например, единице? В этом случае при различных исследованиях необходимо будет определять два показателя прочности: один показатель, основанный на методике тех или иных испытаний, соответствующий отношению $h_0/d_0 = 2$; второй показатель — по стандарту, с отношением $h_0/d_0 \neq 2$. Вместо намечаемой экономии средств и материалов окажется увеличение объема испытаний и путаница при обработке результатов испытаний.

Исходя из вышеизложенного, отношение высоты образца к его диаметру при определении прочности пород на сжатие (с трением по торцам) необходимо принимать равным двум (или близким к этому значению). Это обеспечит необходимую точность испытаний, минимальный разброс данных, надежное сопоставление результатов с другими методами испытаний и исключит необходимость двойного определения показателя прочности.

§ 3. Разработка эталонных (точных) и приближенных методов определения прочности пород на одноосное сжатие

Необходимость в разработке точных методов испытаний диктуется следующими соображениями.

1. Большое количество разнообразных методов испытаний на сжатие исключает сейчас возможность сопоставления полученных различными исследователями результатов испытаний по определению прочностных показателей пород. Для надежного сопоставления этих результатов необходимо знать величину истинной (или действительной) прочности образцов горных пород на сжатие.

2. Эталонный метод позволит оценить существующие методики испытаний, выявить их достоинства и недостатки и обоснованно рекомендовать для применения упрощенные или грубые методы испытаний.

3. Отсутствие надежных корреляционных связей между прочностью горных пород на сжатие и другими их физико-механическими свойствами обусловлена в значительной степени различием методик испытаний. Сопоставление этих показателей может быть надежно проведено только при точном их определении. При хорошей корреляции отдельных параметров можно

будет упростить методику определения некоторых физико-механических свойств пород и пользоваться расчетными соотношениями.

4. В настоящее время существует некоторое противоречие между теориями прочности и экспериментальным материалом. Так, например, получаемая при испытании образцов на одноосное сжатие с трением по торцам форма разрушения определяется неоднородностью напряженного состояния материала образцов, а в теориях прочности эта форма разрушения рассматривается как соответствующая однородному напряженно-деформированному состоянию. Исследование характера деформирования и разрушения образцов различных горных пород при однородном напряженном состоянии позволило бы выяснить физическую сущность этих процессов и уточнить отдельные положения имеющихся теорий прочности.

Разработка эталонного метода испытаний. Анализ схем испытаний, обеспечивающих в материале образца однородное напряженное состояние, показывает, что наиболее приемлемыми с точки зрения простоты эксперимента и точности испытаний являются методы испытаний, предусматривающие применение различных смазок или низкомодульных прокладок. Основным недостатком этих методов является то, что для каждого материала (или типа горной породы) необходима индивидуальная смазка (прокладка) определенной толщины или же комбинация прокладок (смазок).

Во ВНИМИ разработан новый метод испытаний и прибор* для его осуществления, исключающие указанный недостаток.

Известно, что при существующих методах испытаний пород исследователь не имеет возможности управлять напряженным состоянием материала образца в процессе его нагружения и только пассивно фиксирует деформации образца. Сущность предложенного способа заключается в активном управлении деформациями одного и того же образца породы при нагрузке и, следовательно, в управлении напряженным состоянием материала образца. Управление деформациями образца осуществляется путем изменения величины касательных напряжений на торцах образца таким образом, чтобы распределение поперечных деформаций по высоте образца было равномерным. Это может быть достигнуто различными конструктивными решениями: принудительной смазкой, нагревом или сжатием-растяжением контактных опорных плит, сжатием торцевой области образца и др.

Схема испытания по предложенному способу изображена на рис.8. Образец *1* горной породы устанавливают на испыта-

* Карташов Ю.М. Устройство для испытания образцов грунта, бетона и т.п. на одноосное сжатие. Авторское свидетельство № 331277. «Бюллетень изобретений», № 9 за 1972 г.

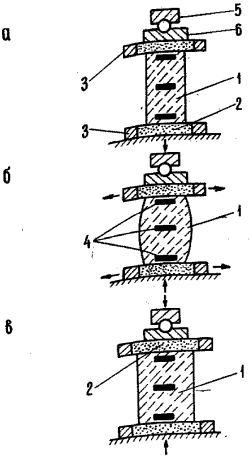


Рис.8

тельный пресс (на рисунке пресс не показан) между двумя низкомодульными прокладками *2*, помещенными в жесткие цилиндрические обоймы *3*. Для измерения поперечных деформаций на образец укрепляются специальные тензометры *4* у торцов и в средней части образца (например, для крепких пород — тензодатчики сопротивления, наклеиваемые на образец; для слабых или пластичных пород — накладные съемные тензометры, хомутики и т. д.). Для передачи давления от пресса на образец используется шаровая опора *5* и пуансон *6*.

Подготовленный к испытанию образец (рис. 8,*а*) сжимают на прессе усилием (первая ступень нагрузки), составляющим 2—15% от разрушающей нагрузки, после чего измеряют поперечные деформации образца. Если деформации у торцов меньше, чем в средней части образца (рис. 8,*б*), увеличивают (не снимая нагрузку) внутренний диаметр обоймы *3* (например, с помощью болтов, соединяющих элементы разрезной обоймы), обеспечивая тем самым податливость прокладки в поперечном направлении; при этом, благодаря сцеплению образца с прокладкой, торец образца получает дополнительную деформацию.

Увеличение внутреннего диаметра обоймы производят до тех пор, пока поперечные деформации образца у торцов не станут равны поперечным деформациям в средней части образца (рис.8,*в*). После этого проводят следующий цикл нагружения (вторая ступень нагрузки) и т. д., повторяя последовательность описанных операций до разрушения образца.

Если после какого-либо цикла нагружения деформации у торцов образца будут больше, чем в его средней части, производят уменьшение внутреннего диаметра обоймы, сжимая прокладку и уменьшая деформации в торцевой области до величины, равной значению деформации в средней части образца.

Равномерность деформирования образца по его высоте свидетельствует о наличии напряженного состояния материала образца, близкого к однородному.

На рис. 9 изображена схема прибора для реализации описанного метода испытаний. Образец *1* с тензодатчиками *2* прилегает к прокладкам *3* из низкомодульного материала. Каждая прокладка помещена в жесткую цилиндрическую обойму *4*, выполненную в виде трех сегментов, соединенных между собой регулировочными болтами *5*. Нагрузка на образец передается от давильных плит

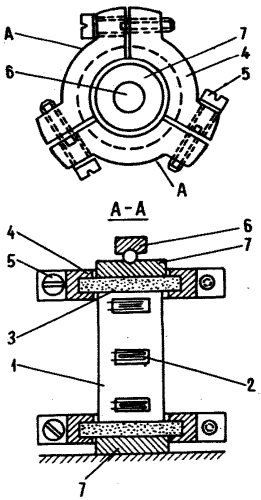


Рис 9

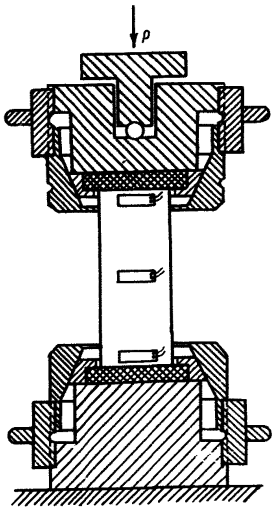


Рис.10

пресса через нагрузочное приспособление, включающее шаровую опору *6*, стальные пуансоны *7* и прокладки *3*. Вращением болтов *5* обеспечивают необходимую податливость прокладки в поперечном направлении.

Модификацией этого прибора является прибор с цанговым регулированием податливости прокладки (рис.10), позволяющий обеспечить более равномерное деформирование материала образца.

Конструкторским бюро ВНИМИ и авторами разработан прибор сжатия типа БП19 (см. приложение I), который позволяет проводить испытания пород на сжатие с различными торцевыми условиями: трение по торцам, испытание с регулируемой прокладкой и т.д. Прибор изготовлен на ОЭЗ ВНИМИ.

В качестве низкомодульных прокладок для различных типов горных пород применяли резину и пластмассы.

Разработка упрощенных методов испытаний. Исследования, проведенные авторами, показали, что помещение низкомодульных прокладок определенного типа в жесткую обойму позволяет обеспечить напряженное состояние материала образца, близкое к однородному, на широком круге пород, без регулирования податливости прокладок. Прибор* (см. стр.26), разработанный авторами, изображен на рис.11. Цилиндрический образец *1* горной породы торцами прилегает к низкомодульным прокладкам *2*. Каждая прокладка помещена в цилиндрическую

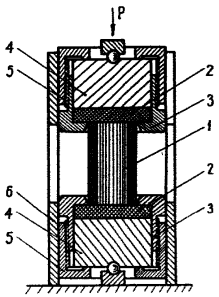


Рис.11

жесткую обойму, состоящую из стакана *3*, пуансона *4* и накидной гайки *5*. В отверстие обоймы с небольшим зазором входит торец образца. Обе обоймы помещены в корпус *6*, предотвращающий их перекос при нагружении образца.

Перед испытаниями прокладки уплотняются на прессе под определенной нагрузкой (см.приложение2). При уплотнении используется металлическая предохранительная шайба с диаметром, равным диаметру образца, и с высотой, равной толщине дна стакана *3* (на рисунке шайба не показана). Предохранительная шайба устанавливается на плоскость прокладки и препятствует выдавливанию прокладки при ее уплотнении. При достижении нагрузкой расчетной величины зажимается накидная гайка *5*. Таким образом, прокладки перед испытанием образцов пород находятся в напряженном состоянии. В качестве материала для прокладки применялась резина, отвердевшая эпоксидная смола или пластмасса «полиамид-66». Результаты испытаний показали, что при принятых конструктивных размерах прибора (толщина прокладки — 7,5 *мм*, диаметр прокладки — 50 *мм*, зазор между образцом и цилиндрической обоймой — 0,5 *мм*, диаметр образца — 30 *мм*) величина выдавливания прокладки (выпуклость) после снятия нагрузки не превышает 0,01÷0,02 *мм*. Предварительное сжатие прокладки повторяют после испытания 100—200 образцов пород. В отличие от применяемых ранее методов испытаний с низкомодульными прокладками или смазкой в предложенном приборе материал прокладок не имеет возможности свободно деформироваться под нагрузкой, так как он находится в замкнутом объеме, а предварительное нагружение прокладки обеспечивает заполнение ею пустот и зазоров во внутренней полости прибора. Благодаря такому конструктивному решению обеспечивается равномерная передача нагрузки на торец образца и исключается возможность появления растягивающих напряжений на его торцах при сжатии. Методика работы с прибором детально изложена в приложении 2.

---

* Грохольский А. А., Карташов Ю.М., Мазур-Джуриловский Ю.Д. Устройство для определения прочностных и деформационных характеристик образцов хрупких горных пород. Авторское свидетельство № 256699. «Бюллетень изобретений», № 35 за 1969 г. (к стр. 25).

Интересной особенностью разработанных приборов с низкомодульными прокладками является то обстоятельство, что требования к качеству обработки торцов могут быть менее жесткими, чем при испытании с применением шлифованных давильных плит, так как низкомодульная прокладка, деформируясь под нагрузкой, практически всей своей площадью передает давление на торец образца. В то же время точность испытаний, как будет показано ниже, при применении низкомодульных напряженных прокладок значительно выше, чем при испытании образца между жесткими давильными плитами, а трудоемкость исследований в обоих случаях одинакова.

Для приближенного определения прочности пород на одноосное сжатие авторами разработан прибор* , схема которого изображена на рис.12. Основой для разработки прибора послужила схема (рис.2,*а*), описанная в работе [17], при которой контакт образца с давильными плитами осуществлялся при помощи различного рода зубцов и насечек, разрушающих приторцевую зону образца. Некоторым недостатком этой схемы является то, что при грубо обработанном торце не все зубцы или насечки вступают в надежный контакт с образцом, так как зубцы жестко соединены с накладкой. Таким образом, неизбежны концентрации напряжений на выпуклых поверхностях торца образца. С целью исключения указанного недостатка давильные плиты прибора были выполнены с цилиндрическими выточками, в которые помещены эластичные прокладки с шариковыми инденторами.

Прибор (рис. 12) состоит из шаровой опоры *2*, накладок *3*, эластичных прокладок *4* и шариковых инденторов

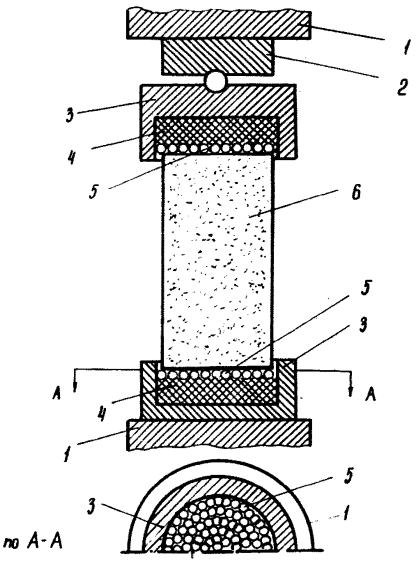


Рис.12

* Карташов Ю.М., Грохольский А.А. Прибор для испытания образцов горных пород или строительных материалов на одноосное сжатие. Авторское свидетельство №331278. „Бюллетень изобретений", №9 за 1972 г.

5, между которыми устанавливают образец *6*. При сжатии образца между давильными плитами *1* пресса шариковые инденторы внедряются в торец образца; при этом под шариками возникают соединяющиеся между собой зоны раздробленной породы, через которые передается давление на образец. Шариковые инденторы *5* не соединены жестко друг с другом и благодаря применению эластичной прокладки равномерно располагаются по торцу образца, с одинаковым усилием контактируя как на выпуклостях, так и на впадинах торца. Расположение эластичных прокладок и шариковых инденторов в замкнутом объеме, образованном выточкой в накладке, препятствует возникновению растягивающих напряжений в образце, неизбежных при применении «свободных» эластичных прокладок.

Диаметр внутренней выточки в накладке выбирают в зависимости от диаметра образца. Зазор между образцом и стенками выточки для предотвращения «зажимания» торцов образца боковыми шариковыми инденторами должен быть не более 0,35 *мм*. Эластичной прокладкой в приборе служит эпоксидная смола; шариковые инденторы диаметром 2 *мм* плотно укладывают на плоскость затвердевшей эпоксидной смолы и заливают затем эпоксидной смолой на 3/4 их высоты (шарики диаметром 2 *мм* выступают над поверхностью эпоксидной смолы на 0,5 *мм*). Толщина прокладки при испытаниях равна 7 *мм*.

Методика работы с прибором описана в приложении 3.

§4. Результаты испытаний

Основной объем испытаний проведен авторами в приборе с напряженными прокладками без регулировки их податливости (см. рис.11). Для исследований были выбраны десять разновидностей горных пород и искусственных материалов (табл.1).

Испытания были проведены с измерением деформаций различных участков образцов горных пород. Были определены также прочностные показатели образцов. Диаметр образцов d_0 при испытаниях составлял 30 *мм*, высота h_0 — от 0,3 до 3,0 d_0. Торцевые условия при испытаниях были выбраны следующими: смазка торцов парафином (толщина смазки — от 0,5 до 1,5 *мм*); сухое трение по торцам с их плотным прилеганием к жестким давильным плитам; испытание в приборе с напряженными прокладками. Описание первых результатов испытаний в приборе приведено в работе [33].

На рис.13 представлены результаты испытаний образцов мрамора ($d_0 = 30$ *мм*, $h_0 = 70$ *мм*) на деформируемость. Материал прокладки — эпоксидная смола. На боковую поверхность образца были нанесены тензодатчики (7 штук по высоте), измеряющие поперечные деформации. Нагрузка на образец давалась ступенями (P_1, P_2, P_3 и т.д.); на каждой ступени изме-

Таблица 1

Порода	h_0/d_0	Прочность на сжатие					
		При смазке торцов		При трении по торцам		В приборе с напряженными прокладками	
		Колич. образцов	σ_c, кгс/см²	Колич. образцов	σ_c, кгс/см²	Колич. образцов	σ_c, кгс/см²
Эквивалентные материалы	0,3	3	10	3	11	4	18
	0,5	4	12	3	15	5	17,5
	1,0	3	13	4	15,6	5	17,5
	2,0	5	14,5	5	16,5	5	18,2
Глина (Ленметро)	0,3	3	25,3	3	80	4	50,3
	0,5	3	32,5	3	77,5	4	47,5
	1,0	3	40	3	65	5	50,8
	2,0	4	43	5	55	5	51,0
Кирпич строительный	0,5	2	104	4	370	4	235
	1,0	5	145	4	265	3	228
	1,5	4	174	5	200	3	206
	2,0	3	176	4	190	3	212
	2,5	2	172	—	—	2	195
Мергель (Мирный)	0,5	3	160	3	416	4	270
	1,0	3	225	5	306	4	250
	1,5	4	215	4	258	3	248
	2,0	5	240	4	260	4	252
Алевролит (карьер Кара-Су)	0,5	4	91	3	432	4	335
	1,0	5	134	4	400	5	315
	1,5	5	160	4	285	5	304
	2,0	6	236	5	262	5	293
Песчаник (Петродворец)	0,5	3	259	3	705	3	515
	1,0	3	312	3	610	3	506
	1,5	2	340	3	544	3	508
	2,0	2	375	1	508	3	520
	2,3	—	—	1	485		
	2,5	—	—	—	—	1	496
	2,7	—	—	2	460	2	524
Известняк (Эстонсланцы)	0,5	4	370	4	1170	4	730
	2,0	3	550	5	670	4	738
Мрамор I (Коелга, Урал)	0,5	12	335	10	1250	20	723
	1,0	14	376	15	870	25	739
	1,5	15	470	20	800	25	747
	2,0	23	575	25	750	30	733
Песчаник (Донбасс)	0,3	5	276	7	1736	8	733
	0,5	7	342	8	1660	7	787
	1,0	8	464	8	1105	7	768
	1,5	7	588	6	886	8	770
Мрамор II (месторождение неизвестно)	0,5	3	545	3	1070	3	795
	1,0	4	605	3	918	3	800
	1,5	3	640	2	850	2	802
	2,0	2	690	1	820	3	810
	2,5	—	—	—	—	1	814

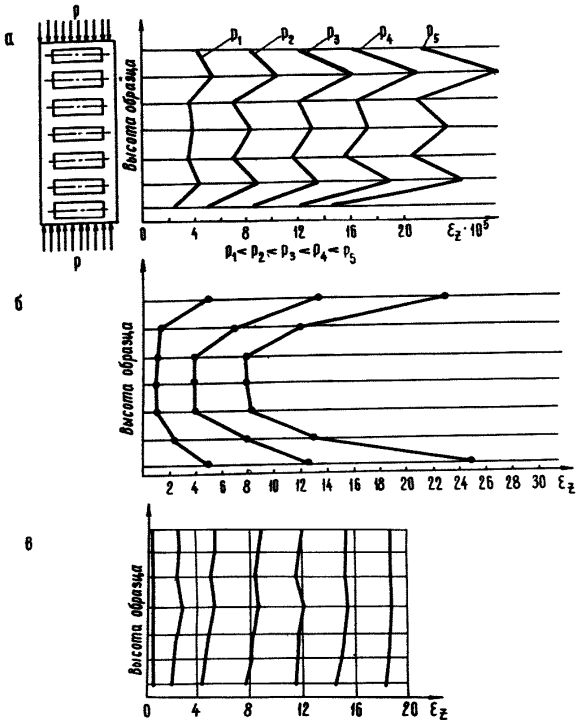


Рис.13

рялись поперечные деформации. Результаты испытаний с трением по торцам (рис. 13,*а*) показали наличие существенной неравномерности в деформировании образца. Деформации у торцов меньше, чем деформации в средней части образца. Обращает на себя внимание наличие «горбов» на кривой распределения деформаций по высоте образца. Аналогичная неравномерность была получена также при аналитических расчетах [14]. При использовании смазки (парафин толщиной 0,5 *мм*) торцевые области подвергаются значительным растягивающим напряжениям: деформации у торцов в 2—3 раза превышают деформации в средней части образца (рис. 13,*б*). Испытания в приборе с напряженными прокладками (рис. 13,*в*) показали равномерный характер распределения деформаций по высоте образца, что, в первом приближении, может свидетельствовать о напряженном состоянии материала испытываемого образца, близком к од-

нородному. Аналогичные результаты были получены при испытании и других пород.

Таким образом, при использовании прибора с напряженными прокладками торцевые условия значительно улучшаются.

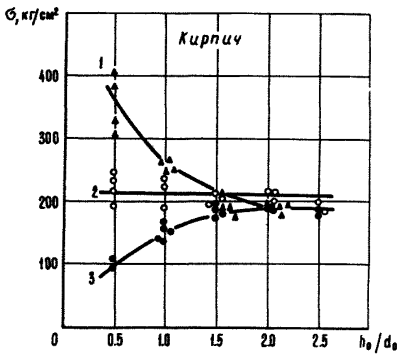


Рис.14

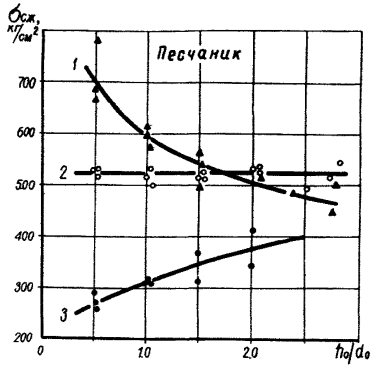


Рис.15

Результаты испытаний образцов различных горных пород на прочность представлены в табл.1 и на рис.14—16 (*1* — с трением по торцам, *2* — при испытании в приборе с напряженными прокладками, *3* — со смазкой торцов). Испытания со смазкой торцов и с трением по торцам подтвердили аналогичные результаты других исследователей: с увеличением отношения высоты образца к его диаметру прочность образцов, испытанных со смазкой торцов, увеличивается, а с трением по торцам — уменьшается. (Исключение составили только образцы из эквивалентных материалов на парафиновой основе). Результаты же испытаний образцов пород с применением напряженных прокладок показали, что прочность образцов остается практически постоянной при изменении отношения h_0/d_0 от 0,3 до 3,0. Эта закономерность оказывается единой для всех испытанных материалов.

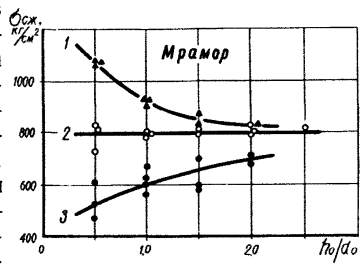


Рис 16

Обращает на себя внимание тот факт, что прямая *2* (см. рис.14—16), соответствующая прочности пород при однородном напряженном состоянии, располагается выше, чем среднее значение между прочностью с трением по торцам и прочностью со смазкой торцов, и при определенных значениях h_0/d_0 пересекает кривую *1*, соответствующую прочности пород с трением

Таблица 2

Порода	σ_c, кгс/см²	σ_p, кгс/см²	σ_c/σ_p
Глина кембрийская (Ленметро)	48,9	4,6	10,6
Кирпич серый строительный	222	15,0	14,8
Мергель (Мирный)	258	23,0	11,2
Алевролит (карьер Кара-Су)	312	24,5	12,7
Песчаник красный крупнозернистый (Петродворец)	517	28,0	18,4
Известняк (Эстонсланец)	734	50,8	14,5
Мрамор (Коелга, Урал)	736	47,5	15,5
Горючий сланец (Ленсланец)	156	13,6	11,5
Песчаник серый крупнозернистый (Донбасс)	775	46,5	16,7
Талькохлорит (Сег-Озеро)	800	50,5	15,8
Соль каменная (Солотвино)	196	12,6	15,6

по торцам. Явно выраженной зависимости установить пока не удалось. В первом приближении можно принять, что чем прочнее порода, тем при большем соотношении h_0/d_0 происходит пересечение кривых *2* и *1* (см. рис.14—16).

Кроме испытаний на одноосное сжатие, были проведены испытания тех же пород на одноосное растяжение на установке ПР-2, разработанной ВНИМИ, позволяющей получать точные (эталонные) значения прочности [84]. Результаты испытаний представлены в табл.2. Отношение σ_c/σ_p для испытанных пород изменялось в довольно широких пределах: от 10,6 до 18,4.

В приборе с регулируемыми прокладками (см. рис.9—10) были проведены исследования, в основном, методического характера. Относительно небольшой объем исследований деформационных и прочностных свойств пород в этом приборе не по-

зволяет в настоящее время дать широкое обобщение результатов испытаний. Основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1. Применение прибора с регулируемыми низкомодульными прокладками позволило в процессе нагружения одного и того же образца активно управлять деформациями в его торцевой зоне и изменять напряженно-деформированное состояние материала образца. Управление деформациями образца удавалось осуществлять до нагрузки, составляющей 85—95% от разрушающей, после чего из-за начинающегося интенсивного процесса деформирования практически невозможно было обеспечить это управление. Однако этот процесс является процессом разрушения, подготовленным предыдущей историей деформирования, и поэтому, как показали исследования, отличия в последней стадии характера деформирования образца от равномерного не оказывают существенного влияния ни на прочность образца, ни на его характер разрушения.

2. Прибор позволил проводить испытания со следующими условиями деформирования: поперечные деформации у торцов образца могли быть равны деформациям в средней части образца (однородное напряженно-деформированное состояние), превышать их (условия испытаний со смазкой), быть меньше этих деформаций (условия испытания с трением по торцам) или неизменными в процессе испытания (условия жесткой заделки).

3. Исследования образцов в приборе с регулируемыми прокладками позволили установить интересный факт значительного влияния торцевых условий на деформации в средней части образца. Для испытаний были взяты образцы мрамора диаметром 30 *мм* и высотой 80 *мм*. Изменение деформаций у торца образца при неизменной нагрузке и регулировании низкомодульной прокладки вызывало соответствующее изменение поперечных деформаций в средней части образца, несмотря на то, что средний поперечный тензометрический датчик находился от торца на расстоянии, превышающем диаметр образца.

4. Величина прочности на одноосное сжатие была практически равна прочности той же породы, полученной при испытании в приборе с напряженными прокладками (без регулирования).

5. Форма разрушения образцов соответствовала форме разрушения образцов при испытании в приборе с напряженными прокладками (анализ форм разрушения образцов при разных торцевых условиях будет дан ниже).

Испытания образцов пород в приборе с шариковыми инденторами (см. рис. 12) показали надежную работоспособность прибора и возможность испытания образцов пород с грубообработанными торцами.

На рис. 17 изображены для примера результаты испытаний образцов известняка в приборе с шариковыми инденторами.

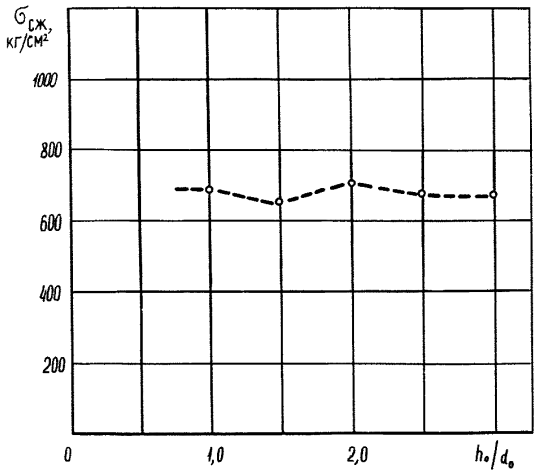


Рис 17

Прочность образцов при испытании с шариковыми инденторами, как и при испытании с напряженными прокладками, практически не зависит от отношения h_0/d_0, однако значение прочности на 5÷15% меньше, чем во втором случае. Поэтому при использовании этого метода рекомендуется пересчитывать прочность по следующей формуле:

$$\sigma_c = 1{,}13\,\sigma_ш,$$

где σ_c — действительная прочность образца на одноосное сжатие; $\sigma_ш$ — прочность при испытании в приборе с шариковыми инденторами.

Весьма интересным оказался характер разрушения при испытаниях на сжатие образцов пород с различными торцевыми условиями. При испытаниях с трением по торцам образцов мрамора (рис.18,*1*) разрушение, как правило, происходит на наклонной плоскости, образец разрушается от действия касательных напряжений путем среза. При внимательном рассмотрении разрушенного образца у торцов его видны два конуса, вершины которых направлены к центральной части образца. При испытании образцов со смазкой торцов (рис.18,*2*) разрушение происходит по плоскости, параллельной направлению действия нагрузки (разрушение от отрыва). В большинстве случаев наблюдается одна основная плоскость разрушения, проходящая через центр образца. Характер разрушения образцов пород при однородном напряженном состоянии материала образца в приборе с напряженными прокладками (рис.18,*3*) внешне напоминает характер разрушения образцов со смазкой: разрушение

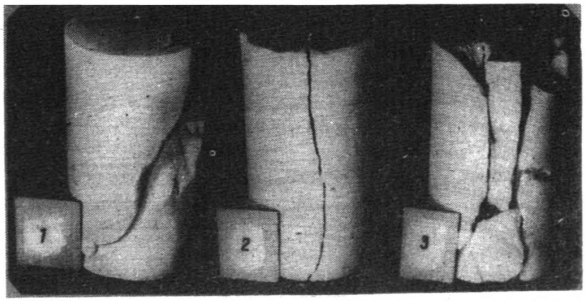


Рис.18

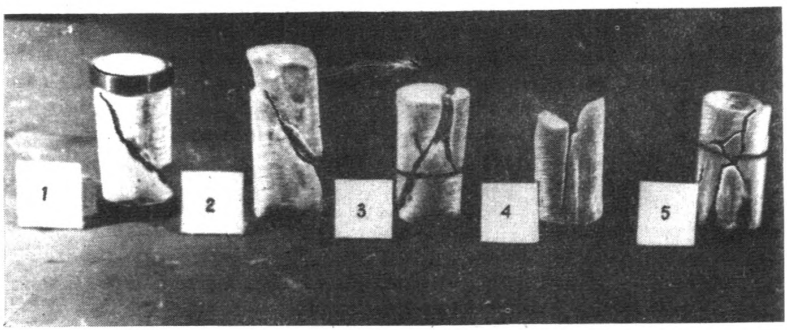


Рис.19

происходит по плоскостям, параллельным направлению действия нагрузки. Однако в этом случае количество плоскостей разрушения составляет не менее двух-трех (в некоторых случаях наблюдалось 6—8 плоскостей разрушения)

Аналогичный характер разрушения наблюдался для всех испытанных пород. На рис.19 изображена форма разрушения для образцов известняка: *1* — при испытании с жесткой заделкой торцов; *2* — с сухим трением; *3* — с прослойкой резинового клея; *4* — со смазкой парафином; *5* — в приборе с напряженными прокладками. Интересно отметить, что форма разрушения в последнем случае практически не зависит от отношения h_0/d_0.

В опытах со смазкой торцов характер разрушения легко может быть объясним действием растягивающих напряжений, обусловленных влиянием смазки: разрывающее действие смазки, неоднородность распределения напряжений по торцу с максимумом в центре торца и т.д О наличии растягивающих напряжений при смазке торцов свидетельствует и тот факт, что

прочность образцов уменьшается при уменьшении высоты образца, а деформации образца у торцов, как показали результаты испытаний, превышают деформации в средней части образца.

Появление вертикальных трещин разрыва в образце, находящемся в однородном напряженном состоянии, на первый взгляд представляется неожиданным. Напомним, что, если безоговорочно принимать положения классических теорий прочности, в направлении, перпендикулярном к оси образца при его одноосном сжатии, растягивающие напряжения отсутствуют. Предполагается, что продольные деформации образца вызываются осевым усилием, а поперечное расширение образца происходит без действия напряжений в этом направлении, вплоть до момента разрушения. Однако известно, что всякое изменение расстояния между частицами материала при постоянной температуре сопровождается соответствующим изменением напряженного состояния. Поэтому поперечному расширению образца должны сопутствовать растягивающие напряжения. В противном случае невозможно объяснить физически разрушение образца путем отрыва при одноосном сжатии. Подобный характер разрушения наблюдался для всех испытанных пород и материалов (эквивалентные материалы, глины, мел, мергель, соль, песчаник, мрамор и др.) при изменении отношения h_0/d_0 от 0,5 до 3.

Предположение о наличии растягивающих напряжений внутри образца при его одноосном сжатии и экспериментальные данные о характере разрушения образца в виде отрыва при его однородном напряженном состоянии приводят к следующим следствиям:

1. Действующие на образец сжимающие или растягивающие напряжения, вызывающие равномерные деформации по его высоте, не соответствуют напряженному состоянию внутри образца. Поэтому обеспечить одноосное напряженное состояние материала образца как при одноосном сжатии, так и при одноосном растяжении принципиально невозможно.

2. Прочность на одноосное сжатие образца породы, находящегося в однородном напряженном состоянии, характеризует сопротивление материала образца отрыву в условиях одновременного действия сжимающих и растягивающих напряжений. Разрушение образцов вызывается действием растягивающих напряжений, направление которых перпендикулярно оси образца и плоскости разрушения.

3. При однородном напряженном состоянии материала образца как при сжатии, так и при растяжении разрушение происходит путем отрыва. Поэтому характеристика прочности породы на растяжение является основной константой горных пород. Разрушение путем среза по наклонным плоскостям объяс-

няется не свойствами материала образца, а неоднородностью напряженного состояния, обусловленного влиянием торцевых условий (жесткая заделка торцов образца, сухое трение и т.д.), при которых исключена возможность равномерного деформирования образца.

Критерием однородности напряженного состояния материала образцов при их испытании на одноосное сжатие является наличие следующих основных условий:

1) равномерность деформации по всей высоте образца;

2) независимость прочностных показателей от отношения высоты образца к его диаметру;

3) характер разрушения в виде отрыва по плоскостям, направление которых совпадает с направлением действия нагрузки.

§5. Основные рекомендации

Результаты исследований, изложенные в настоящих Указаниях, могут быть полезны при разработке стандартных методов определения прочности горных пород на одноосное сжатие.

Одной из главных задач при стандартизации методов испытаний должно быть обеспечение соответствующих организаций необходимыми для этих испытаний приборами и инструктивными положениями. В настоящее время ВНИМИ разработал прибор сжатия, БП19, в котором, путем замены испытательных головок, можно обеспечивать различные условия по торцам (жесткая заделка, трение по торцам, контакты с шариковыми инденторами, напряженная низкомодульная прокладка, регулируемая низкомодульная прокладка). Описание прибора дано в приложении 1. В 1974 г. будут также серийно выпускаться ОЭЗ ВНИМИ отдельные испытательные головки с напряженными прокладками.

Применение прибора с регулируемыми прокладками целесообразно только для точного (эталонного) определения прочности пород. Трудоемкость испытаний по этому методу довольно высокая и нет смысла рекомендовать его для массовых испытаний. Метод может быть полезен при сопоставлении различных методик испытаний, детального исследования особенностей деформирования и разрушения горных пород при однородном напряженном состоянии материала испытываемого образца. Изучение формы разрушения пород при этом позволит выяснить основные закономерности разрушения, более обоснованно применять те или иные теории прочности и уточнить их отдельные положения

Опыт работы с прибором с напряженными прокладками дает основание рекомендовать этот метод для массовых испытаний. Последние исследования, проведенные авторами настоящей работы, показали, что при испытаниях в приборе с напря-

женными прокладками можно использовать только одни нагружающие головки без центрирующего корпуса (см. рис.11). Точность испытаний при этом практически не изменяется. Трудоемкость испытаний по этому методу практически такая же, как и при широко распространенном методе испытаний с трением по торцам (при контакте образца с жесткими металлическими давильными плитами). Преимущество предлагаемого метода заключается в том, что прочность образцов в довольно широких пределах не зависит от отношения высоты образца к его диаметру. Поэтому для испытаний можно брать образцы с различным отношением h_0/d_0, получая одинаковые результаты, без рекомендуемых в настоящее время пересчетов прочности по формулам, применимость которых для всех типов горных пород вызывает большое сомнение. Проведение испытаний на образцах с небольшим отношением h_0/d_0 позволит уменьшить объем камнерезных работ и расход камнерезных материалов, а также уменьшить объем породного материала, что даст большую экономию средств при проведении испытаний. Кроме того, определенная экономия средств и времени обусловлена возможностью более грубой, по сравнению с обычным методом испытаний, обработкой торцевых поверхностей образца. Следует учитывать также, что напряженно-деформированное состояние материала образцов при испытании предложенным методом близко к однородному; при этом значения прочности пород на сжатие должны рассматриваться не как условные, а как действительные (истинные) характеристики образцов.

Методику испытаний с прибором, снабженным эластичной прокладкой с шариковыми инденторами, можно рекомендовать как грубый (приближенный) метод определения прочности пород на сжатие, с применением образцов с грубо обработанными торцами.

Анализ работ различных исследователей, приведенный в настоящих Указаниях, показал нецелесообразность применения при испытаниях с трением по торцам образцов с отношением $h_0/d_0 = 1$. Как доказано многочисленными исследованиями, это отношение является наихудшим при изучении различных физико-механических свойств горных пород, в том числе и прочности на одноосное сжатие. Поэтому необходимо применять при испытаниях с трением по торцам это отношение, близкое к двум; при этом прочностные показатели близки по величине к истинной прочности образцов пород на сжатие и могут быть надежно сопоставлены между собой. Кроме того, учитывая возрастающий объем других исследований (объемная прочность, ползучесть, релаксация, кратковременная деформируемость — определение E, μ и др.), в которых отношение h_0/d_0 принимается равным двум, применение для одноосного сжатия отношения $h_0/d_0 = 1$ вызовет дублирование испытаний и получение двойного показателя прочности, т.е. дополнительные затраты средств и времени.

Необходимо кратко остановиться на значении коэффициента вариации. Существует мнение, что, чем меньше величина коэффициента вариации, тем лучше сам метод испытаний. Это положение является справедливым только для однотипных методов испытаний, вызывающих примерно одинаковое воздействие на материал образца в отношении его напряженно-деформированного состояния. В других случаях величина коэффициента вариации может быть неправильно истолкована. Поясним эту мысль примером. Сопоставим два метода испытаний: испытание образца с отношением $h_0/d_0 = 1$ между жесткими давильными плитами и испытание образца в приборе с напряженными прокладками. В первом случае напряженно-деформированное состояние материала образца весьма неоднородное, получаемые значения прочности являются условными характеристиками. Во втором случае материал образца находится в однородном напряженном состоянии, получаемое при испытаниях значение прочности близко к величине истинной (действительной) прочности пород на сжатие. Результаты исследований показали полное преимущество второго метода испытаний. Но величина коэффициента вариации во втором случае может быть больше, чем в первом. Это объясняется тем, что при испытании с трением по торцам образец находится в объемном напряженном состоянии, при котором уменьшается влияние различных дефектов строения породы на ее прочность. Коэффициент вариации в этом случае (при испытаниях с трением по торцам) не отражает действительную вариацию свойств испытываемой горной породы при одноосном сжатии, а является условным показателем, характеризующим комплексно методику испытаний и свойства породы при каком-то уровне неопределенного и неоднородного объемного напряженного состояния.

Разброс испытаний при этом получается меньше, чем природный разброс прочностных показателей породы (если, конечно, сама методика испытаний не вносит в результаты существенных погрешностей).

Во втором случае, при испытании в приборе с напряженными прокладками, когда в материале образца обеспечивается однородное напряженное состояние, коэффициент вариации будет действительно отражать вариацию свойств породы при одноосном сжатии. При этом различные дефекты строения породы будут выявляться в большей степени.

Основные положения разработанных ВНИМИ методов испытаний изложены в приложениях настоящих Указаний.

ГЛАВА II. УПРОЩЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБЪЕМНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Некоторые особенности деформирования и разрушения горных пород при одноосном сжатии позволили авторам предло-

жить упрощенный метод определения показателей объемной прочности пород. Сущность метода изложена ниже.

§1. Краткий анализ существующих методов испытаний

Известные способы определения показателей объемной прочности пород (сцепления C и угла внутреннего трения φ) можно разделить на три группы:

1) методы, основанные на непосредственных испытаниях пород в объемном напряженном состоянии;

2) упрощенные (косвенные) методы испытаний;

3) расчетные методы.

Наибольшее распространение среди методов, основанных на непосредственных испытаниях пород, получил метод испытаний в стабилометрах [1,70,71], в специальных камерах [72] и в срезных приборах [1,3,13,73,74]. Метод испытаний пород в стабилометрах позволяет получить наиболее достоверные данные о показателях объемной прочности, однако, недостатками данного метода являются большая трудоемкость испытаний и необходимость в сложной испытательной аппаратуре. При испытании пород методом косого среза получаемые данные занижены из-за концентраций напряжений в местах передачи нагрузки [1].

Оба метода (испытание в стабилометрах и срезных приборах) детально описаны в литературе и не нуждаются в подробном пояснении. Схемы испытаний по этим методам изображены на рис. 20 (*а* — в стабилометре, *б* — в срезных приборах).

Расчетные методы определения показателей объемной прочности (без проведения испытаний пород при объемном сжатии) основаны, как правило, на представлениях о форме огибающей предельных кругов напряжений Мора (гипербола, парабола и т. д.) и на использовании в расчетах пределов прочности породы при одноосном сжатии и растяжении [1,4,75—77].

Проведенное сопоставление экспериментальных и расчетных методов определения показателей объемной прочности [78] показало ограниченную область применения расчетных методов. Расчетным методам присущи недостатки большинства косвенных методов, заключающиеся в определенной погрешности (иногда существенной) показателей объемной прочности; необходимо указать также на то, что показатели объемной прочности, рассчитанные по различным методам, значительно отличаются друг от друга. В то же время во многих случаях расчетные методы целесообразны, особенно для грубых или приближенных определений величин сцепления и угла внутреннего трения пород, если это оправдывается поставленной задачей исследований.

В табл.3 приведены сведения об основных расчетных методах определения показателей объемной прочности.

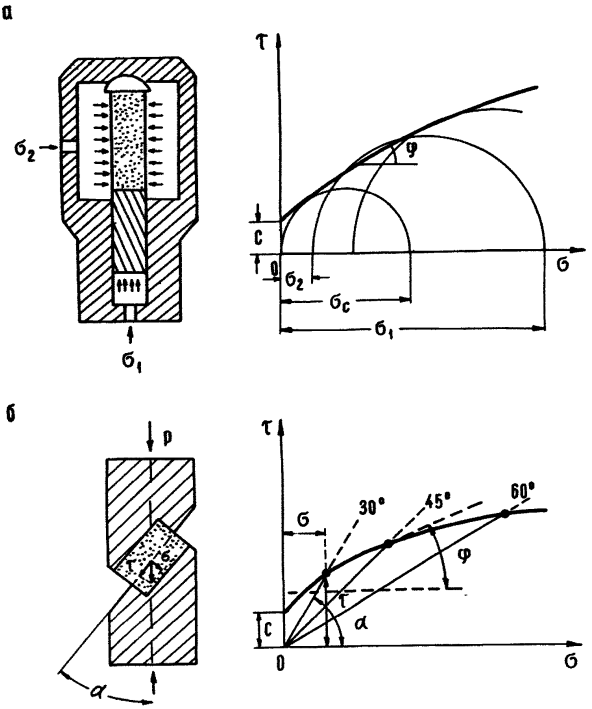


Рис.20

В связи с трудоемкостью работ по непосредственному определению показателей объемной прочности отдельными исследователями разрабатываются упрощенные методы испытаний.

Оригинальный метод испытаний разработан Б.В.Матвеевым [79], предложившим проводить построение огибающей и определение ее параметров по результатам испытаний дисковых образцов соосными пуансонами (рис.21,*а*). Для испытаний необходимы один сплошной дисковый образец и один образец с центральным отверстием, заполняемым пластичной мастикой (или резиновым цилиндром). При нагружении образцов измеряются их деформации. Необходимость в тензометрическом оборудовании и самодельных тензодатчиках специальной конструкции послужили причиной того, что метод не получил широкого распространения.

Дальнейшим развитием этого метода являются исследования М. П. Нестерова [80]. Он предложил новую методику обра-

Таблица 3

Расчетный метод (автор)	Уравнение огибающей	Примечание
Кузнецов Г Н [4]	$\tau=\sqrt{(\sigma_p-\sigma)\left[2\sigma_p-2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p+\sigma_c)}+\sigma_c\right]}$	Напряжения соответствующие сжатию, отрицательны
Руппенейт К В [77]	$\tau=\frac{\sigma_p}{2\operatorname{tg}\eta}\operatorname{sh}2t,\ \operatorname{tg}\eta=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma_p}-3};$ $\sigma+\sigma_p=\frac{\sigma_p}{2\operatorname{tg}^2\eta}(\operatorname{ch}2t-1),\ \operatorname{ch}^2 2t-\operatorname{sh}^2 2t=1;$	Метод пригоден для описания свойств хрупких горных пород на начальном участке огибающей в области сжатия
Протодьяконов М М [75]	$y=y_{max}\left(\frac{x^2}{x^2+a^2}\right)^{\frac{2}{3}},$ $y=\tau,\ x=\sigma+\sigma_p';$ $y_{max}=\tau_{max};\ \tau_{max}\ a\approx 0{,}73$ $a=\frac{\sigma_c}{2}\ q_2=\frac{\sigma_p}{2}:q_1;\ \frac{\sigma_c}{\sigma_p}=\frac{q_2}{q_1}$	Значения q_1 и q_2 находятся по таблицам
Гун Бень-и [76]	$\tau=A\ \sigma_c,\ \sigma=B\cdot\sigma_c$ $A=a+\sigma_c\operatorname{tg}\psi,\ B=b+\sigma_c\operatorname{tg}\psi$	Показатели A и B находятся по графикам и зависят от участка огибающей

В уравнениях огибающих σ_c и σ_p соответственно пределы прочности на сжатие и растяжение Определяются по испытаниям образцов

ботки результатов испытании при раздавливании сплошных дисковых образцов сосными пуансонами различного диаметра, позволяющую находить не только предел прочности породы на сжатие, но и показатели объемной прочности (рис.21,*б*).

В работе [81] указывается, что «возможность получения методом сосных пуансонов оценки прочностных характеристик материала при различной степени сложности напряженного состояния позволяет построить условные паспорта прочности для горных пород в области сжатия» Авторы [81] приводят методику испытаний и паспорта прочности пород, полученные упрощенным методом

§2. Разработка упрощенного метода испытаний

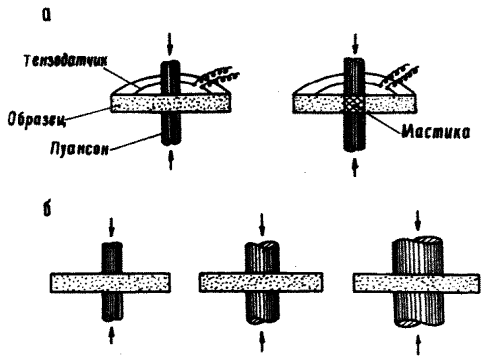


Рис.21

Предложенный авторами приближенный способ определения показателей объемной прочности основан на некоторых экспериментальных данных. Известно, что прочность пород на одноосное сжатие при испытании с сухим трением между торцами образца и плитами пресса зависит от отношения высоты образца к его диаметру, причем существенное увеличение прочности наблюдается в области $h_0/d_0 \leqslant 1{,}0—1{,}5$ Чем меньше это отношение, тем больше прочность образца Это увеличение прочности объясняется влиянием трения между торцами образца и плитами пресса, благодаря чему в области, близкой к торцам образца, порода находится в объемном напряженном состоянии. Авторами проведены дополнительные исследования влияния отношения h_0/d_0 на прочность различных типов горных пород (рис.22) Полученные закономерности подтвердили результаты аналогичных исследований Чем меньше (по высоте) образец, тем большая часть образца находится в объемном напряженном состоянии, тем больше влияние торцевого трения Таким образом, результаты испытаний «низких» образцов аналогичны результатам испытаний «высоких» образцов при определенном боковом давлении Назовем условное боковое давление для низких образцов, испытанных при одноосном сжатии, эквивалентным

В работе [81] величину эквивалентного давления рекомендуется находить из следующего выражения (для цилиндрического образца):

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0'}\,\sigma_c' + \frac{8}{\pi}\,\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_0'}\,\sigma_y',$$

где σ_c — средняя величина истинного предела прочности на одноосное сжатие; σ_c' — предел прочности образца, определяемый при испытании; ε_0 — средняя относительная продольная деформация образца, определенная в середине образца, соответствующая области чистого сжатия; ε_0' — средняя относительная продольная деформация всего образца; ε_y — средняя относительная деформация поперечного сечения; σ_y' — величина пригрузочного бокового напряжения, вызванного силами трения по торцам образца (боковое эквивалентное давление).

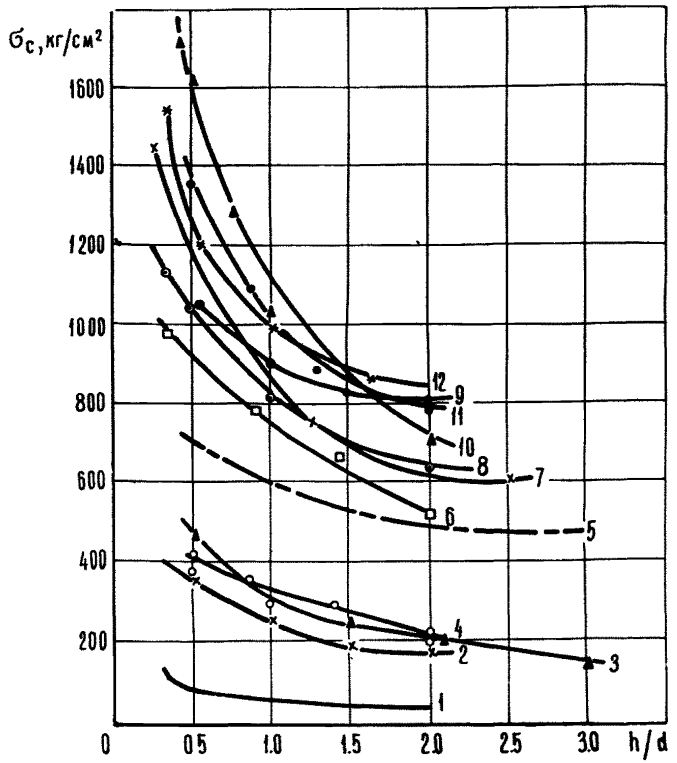


Рис.22

1 — глина кембрийская, *2* — кирпич, *3* — известняк, *4* — горючий сланец, *5* — песчаник крупнозернистый, *6* — песчано-глинистый сланец, *7* — известняк, *8* — талькохлорит, *9* — мрамор, *10* — песчаник, *11* — мергель, *12* — песчаник мелкозернистый

Величины ε_0, ε'_0, ε_y, σ'_c определяются из опыта.

Величины σ_c и σ_y определяются при испытании двух образцов с различным отношением h_0/d_0, из системы двух уравнений.

Недостатком этого метода является необходимость в измерении, кроме прочностных показателей, трех значений деформаций (общей продольной деформации образца, продольной деформации в средней части образца, поперечной деформации). Сложность методики заключается также в том, что эти значения деформаций должны соответствовать моменту разрушения, что выдвигает дополнительные требования к автоматизации измерения деформаций. Кроме того, в качестве одного из основных условий проведения испытаний, авторы указывают на необходимость измерения деформаций в средней части образца, соответствующей области «чистого сжатия». Известно, что влияние торцевого трения проявляется до глубины $(0{,}5 \div 0{,}6)d_0$. Допустим, что для измерения продольных деформаций база тен-

зодатчика в средней части образца составляет 10—15 *мм* (минимальное требование), а диаметр образца $d_0 = 40$ *мм*. Тогда минимальная высота образца должна быть $2(0{,}5 \div 0{,}6)d_0 + (10 \div 15)$ *мм* $\approx$ 50—63 *мм*, а отношение h_0/d_0 будет составлять 1,25—1,57 (в среднем 1,40). Именно такое минимальное отношение необходимо для проведения испытаний по предложенному авторами работы [81] методу. Меньшее отношение при испытании брать нельзя, так как в этом случае в средней части образца не будет наблюдаться области «чистого сжатия» из-за влияния торцевых условий. Для других диаметров образцов это минимальное отношение может изменяться (так, для $d_0 = 30$ *мм* среднее значение $h_0/d_0 = 1{,}50$; для $d_0 = 60$ *мм* среднее значение $h_0/d_0 = 1{,}30$). Таким образом, для испытаний описанным способом могут быть применены образцы с отношением h_0/d_0 в диапазоне от 1,3—1,5 до 2,0—3,0. Однако изменение прочности пород при таком изменении высоты образца практически незначительно. Поэтому при изменении этого метода можно построить паспорт прочности только для небольшого начального участка огибающей в области сжатия.

Наибольшее изменении прочности пород происходит при изменении h_0/d_0 от $1{,}3 \div 1{,}0$ до $0{,}5 \div 0{,}3$ (меньшие значения принимать нецелесообразно из-за усложненной техники изготовления образцов и трудностей при определении разрушающего усилия), т.е. в том диапазоне, для которых метод, описанный в работе [81], принципиально не может быть использован.

Для определения эквивалентного бокового давления при испытании образцов пород с любым соотношением h_0/d_0 нами предлагается иная методика, основанная на экспериментальном сопоставлении результатов испытаний на одноосное сжатие образцов различной высоты.

При экспериментальной проверке предложенного метода была подготовлена группа образцов для испытания в стабилометре, с целью определения действительных характеристик объемной прочности (рис.23,*а*, образцы *1*—*3*) с отношением высоты образца к его диаметру, равным 2. Количество образцов для испытаний в стабилометре составляло обычно 12—16 штук (на схеме для простоты дальнейших построений условно показано три образца). Образец *1* испытывался на одноосное сжатие без бокового давления; образцы *2* и *3* испытывались в стабилометре с различным боковым давлением и доводились до разрушения. На рис.23,*а* обозначены предельные значения разрушающих нагрузок (максимальное σ_1 и минимальное σ_2 главные напряжения):

для образца *1* $\sigma_1 = \sigma_c$ (прочность на одноосное сжатие), $\sigma_2 = 0$;

для образца *2* $\sigma_1 = \sigma_1'$, $\sigma_2 = \sigma_2'$;

для образца *3* $\sigma_1 = \sigma_1''$, $\sigma_2 = \sigma_2''$.

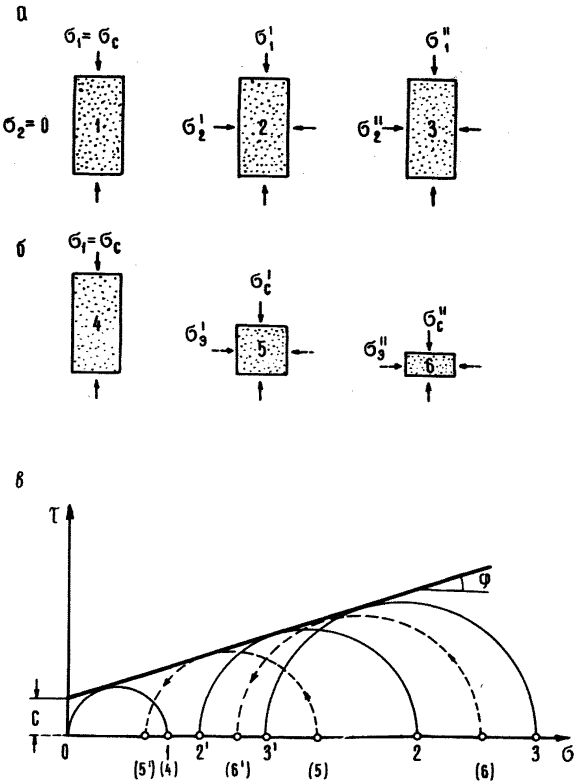


Рис 23

Если $\sigma_2'' > \sigma_2'$, то $\sigma_1'' > \sigma_1'$ (прочность образца породы возрастает при объемном напряженном состоянии, т.е. при увеличении бокового давления)

На рис.23,*в* представлен условный паспорт прочности горной породы, на котором сплошными линиями изображены результаты таких испытаний: для образца *1* — круг с диаметром 0—1, для образца *2* — круг с диаметром $2'$—2, для образца *3* — круг с диаметром $3'$—3, причем большее значение прочности в точке касания круга с осью σ соответствует максимальному главному напряжению, а меньшее — минимальному. Огибающая кругов (для простоты принята прямая линия) является паспортом прочности породы, по которой определяется сцепление *C* и угол внутреннего трения φ

Из рассмотрения графика (рис.23,*в*) видно:

$\sigma_1 = \sigma_c = 0—1$ $\quad\quad$ $\sigma_2 = 0$

$\sigma_1' = 0—2$ $\quad\quad$ $\sigma_2' = 0—2'$

$\sigma_1'' = 0—3$ $\quad\quad$ $\sigma_2'' = 0—3'$

Из той же породы, из которой изготавливались образцы для испытаний в стабилометре, были изготовлены образцы с разным, от 0,3 до 2,0, отношением высоты образца к его диаметру (образцы *4—6*, рис.23,*б*) и испытаны только на одноосное сжатие на прессе. Образец *4* равен образцу *1*, поэтому значения прочности в этом случае тоже равны ($\sigma_1 = \sigma_c$). Значение прочности σ_c' при испытании образца меньшей высоты (образец *5*) было больше, чем при испытании образца *4*, из-за влияния объемного напряженного состояния материала образца (для высоких образцов с отношением высоты к диаметру, равным или большим *2*, этим влиянием можно пренебречь). При испытании образца еще меньшей высоты (образец *6*) значение прочности σ_c'' возрастает ($\sigma_c'' > \sigma_c' > \sigma_c$).

При рассмотрении результатов испытаний двух серий образцов (1—3 и 4—6) можно заметить следующую аналогию: и в том и в другом случае прочность образцов возрастает; в обоих случаях причина этого — объемное напряженное состояние материала образца.

Цель исследований по разработке метода состояла в том, чтобы определить для «низких» образцов, испытываемых на одноосное сжатие, эквивалентное боковое давление (т.е. такое минимальное главное напряжение σ_2, которое при испытании «высоких» образцов в стабилометре обуславливает величину значения прочности σ_1', равное величине прочности при испытании «низкгого» образца σ_c). Это боковое давление условно принимается равномерно распределенным по высоте образца.

Для этого результаты испытаний «низких» образцов наносились на полученный паспорт прочности: $\sigma_c = 0—4$; $\sigma_c' = 0—5$; $\sigma_c' = 0—6$. Эти значения были приняты за главные максимальные напряжения. Минимальные главные напряжения определялись с учетом огибающей паспорта прочности. Полученные круги напряжений при этом строились так, чтобы они касались этой огибающей (показаны на рис.23,*в* пунктиром). Из графика видно, что минимальные главные напряжения (их назвали эквивалентными, поскольку на самом деле боковое давление при испытании «низких» образцов отсутствует) для испытанных «низких» образцов равны:

для образца *4* $\sigma_3 = 0$ (одноосное сжатие);

для образца *5* $\sigma_3' = 0—5'$;

для образца *6* $\sigma_3'' = 0—6'$.

Аналогичные испытания были проведены на 12 разновидностях горных пород.

На основании описанного выше сопоставления результатов испытаний было установлено, что эквивалентное боковое дав-

ление является функцией следующих величин, получаемых непосредственно из опыта:

$$\sigma_э = f\left(\sigma_c, \frac{\sigma_c^i}{\sigma_c}, \frac{h_0}{d_0}\right),$$

где σ_c — прочность образца породы на одноосное сжатие при $h_0/d_0 = 2{,}0$; σ_c^i — прочность образца породы на одноосное сжатие с любым (от 0,3 до 2,0) отношением h_0/d_0; h_0/d_0 — соответственно высота и диаметр испытываемого образца.

Для испытанных пород была выведена эмпирическая зависимость, имеющая вид:

$$\sigma_э = \sigma_2^i = K\sqrt{\frac{\sigma_c^i}{\sigma_c} \ln \frac{\sigma_c^i}{\sigma_c} \ln \frac{2d_0}{h_0}}, \qquad (1)$$

где K — коэффициент, зависящий от контактных условий и от прочности породы на одноосное сжатие; для испытанных с сухим трением по торцам горных пород, с пределом прочности на одноосное сжатие от 400 до 900 *кгс/см*^{2}, этот коэффициент мало изменяется и равен 70 *кгс/см*^{2}.

Аналитическое решение задачи о напряженном состоянии материала образца, сжимаемого между жесткими плитами, возможно, если известны некоторые физико-механические свойства испытываемого образца и плит, а также определены условия на контактах. Эти обстоятельства во многом затрудняют использование аналитических решений в предлагаемом приближенном способе испытаний.

Методика испытаний образцов пород по предложенному способу заключается в следующем. Изготавливаются образцы пород с отношением $h_0/d_0 = 2{,}0$; 1,5; 1,0; 0,5; 0,3 (допускается изготовление образцов и с промежуточными значениями). Обработка торцов образца (плоскостность и параллельность торцов, чистота их поверхности и т.д.) производится по принятым нормам. Изготовленные образцы устанавливаются на прессе между двумя стальными шлифованными давильными плитами, с сухим трением по торцам образцов, и нагружаются осевой нагрузкой до разрушения. Значение прочности породы для образцов с отношением $h_0/d_0 = 2{,}0$ принимается за предел прочности при одноосном сжатии (σ_c) и откладывается на графике (см. рис.23,*в*). Для каждого значения прочности образца с отношением $h_0/d_0 < 2{,}0$ по зависимости (1) определяется величина эквивалентного бокового давления σ_2^i. Каждая пара напряжений (прочность образца σ_c^i при $h_0/d_0 < 2{,}0$ и соответствующее эквивалентное боковое давление σ_2^i) рассматривается как пара разрушающих (предельных) главных напряжений, по величинам которых строится предельный круг Мора (см. рис.23,*в*). После построения кругов Мора для всех испытанных образцов и

проведения огибающей этих кругов (паспорта прочности) определяются показатели объемной прочности породы: сцепление C и угол внутреннего трения φ.

Экспериментальная проверка на различных типах горных пород показала достаточно хорошее совпадение между паспортами прочности (и, соответственно, между показателями объемной прочности), полученными в стабилометре и определенными по предложенному способу.

На рис.24 сплошными линиями изображены паспорта прочности пород, определенные при испытании образцов в стабилометре; пунктирными линиями — паспорта прочности, определенные по предлагаемому способу (*1* — песчаник крупнозернистый, *2* — талькохлорит, *3* — мрамор, *4* — песчаник серый, *5* — песчаник).

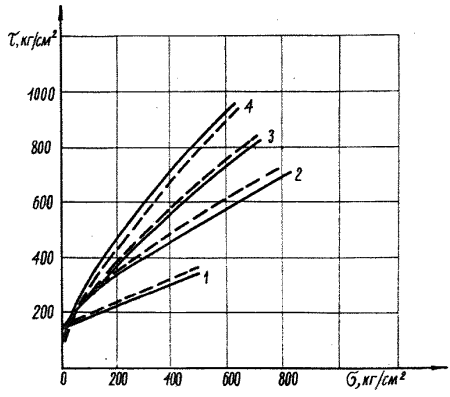


Рис 24

Отличительной особенностью предложенного метода является то, что в нем учитывается экспериментально степень увеличения прочности в зависимости от напряженного состояния материала образца, а показатели объемной прочности не зависят однозначно только от пределов прочности на сжатие и растяжение, как в известных расчетных методах. Кроме того, для определения показателей объемной прочности не требуется сложной аппаратуры и трудоемких испытаний. Возможность учета результатов испытаний очень низких образцов расширяет диапазон напряженных состояний в породе.

Значительное расширение диапазона эквивалентных боковых давлений и уточнение определяемых показателей (сцепления и угла внутреннего трения) можно обеспечить также при жесткой заделке торцов образца в специальных нагрузочных обоймах (например, эпоксидной смолой, сплавом Вуда и др.). При этом исключается некоторая неопределенность торцевых условий, а коэффициент K в уравнении (1) будет иным. В настоящее время в лаборатории механических испытаний ВНИМИ проводятся сопоставительные испытания на разных типах горных пород, с различными условиями на торцах (сухое трение, жесткая заделка торцов) с целью уточнения коэффициента K в уравнении (1) и выявления зависимости этого коэффициента от прочности пород.

Предложенный способ может найти применение как в лабораторных, так и в натурных (испытание на сжатие породных призм разной высоты) условиях для быстрого и приближенного определения показателей объемной прочности горных пород.

Методика испытаний и обработка результатов испытаний изложена в приложениях 4 и 5.

Приложение 1

Прибор сжатия БП19

Прибор БП19 предназначен для испытания на сжатие образцов горных пород при разных условиях на контактах:

1) сухое трение породного образца о стальные шлифованные накладки;
2) защемление торцов образца (на высоту 5 *мм*);
3) напряженные низкомодульные прокладки;
4) регулируемые низкомодульные прокладки,
5) накладки с шариковыми инденторами и эластичной прокладкой.

Диаметр испытываемых образцов — от 30 до 43 *мм*, высота — от 0,5 до $(2{,}0 \div 3{,}0)d_0$.

На рис.25 изображена конструктивная схема прибора БП19. Прибор состоит из следующих элементов:

а) металлической массивной рамы в виде скобы с цилиндрическим шлифованным сквозным отверстием в верхней части для размещения нагрузочного штока;

б) набора специальных нагрузочных приспособлений (головок), обеспечивающих непосредственную передачу нагрузок на испытываемый образец.

На раме-сооснике *1* скомпанованы следующие элементы: нагрузочный силовой шток *2*; плита накладная с центральным цилиндрическим выступом, на котором устанавливаются испытательные головки *7* с шариком *3*; кожух для устранения разлета осколков образца в момент его разрушения (на рисунке не показан), основание *4*; колодка *5* для размещения тензовыводов от датчиков, наклеиваемых на образец (при определении деформационных характеристик породы).

Передача нагрузки на испытываемый образец осуществляется через накладку *6* с шариком *3*, шток *2* и специальную нагрузочную головку *7*.

В нижней части рамы-сооснika, на основании *4* устанавливается нижняя испытательная головка *7*.

Во время проведения испытаний прибор сжатия устанавливается в средней части испытательной машины (пресса) соответствующей мощности (в зависимости от прочности и диаметра испытываемой породы), испытываемый образец горной породы размещается между испытательными головками, кото-

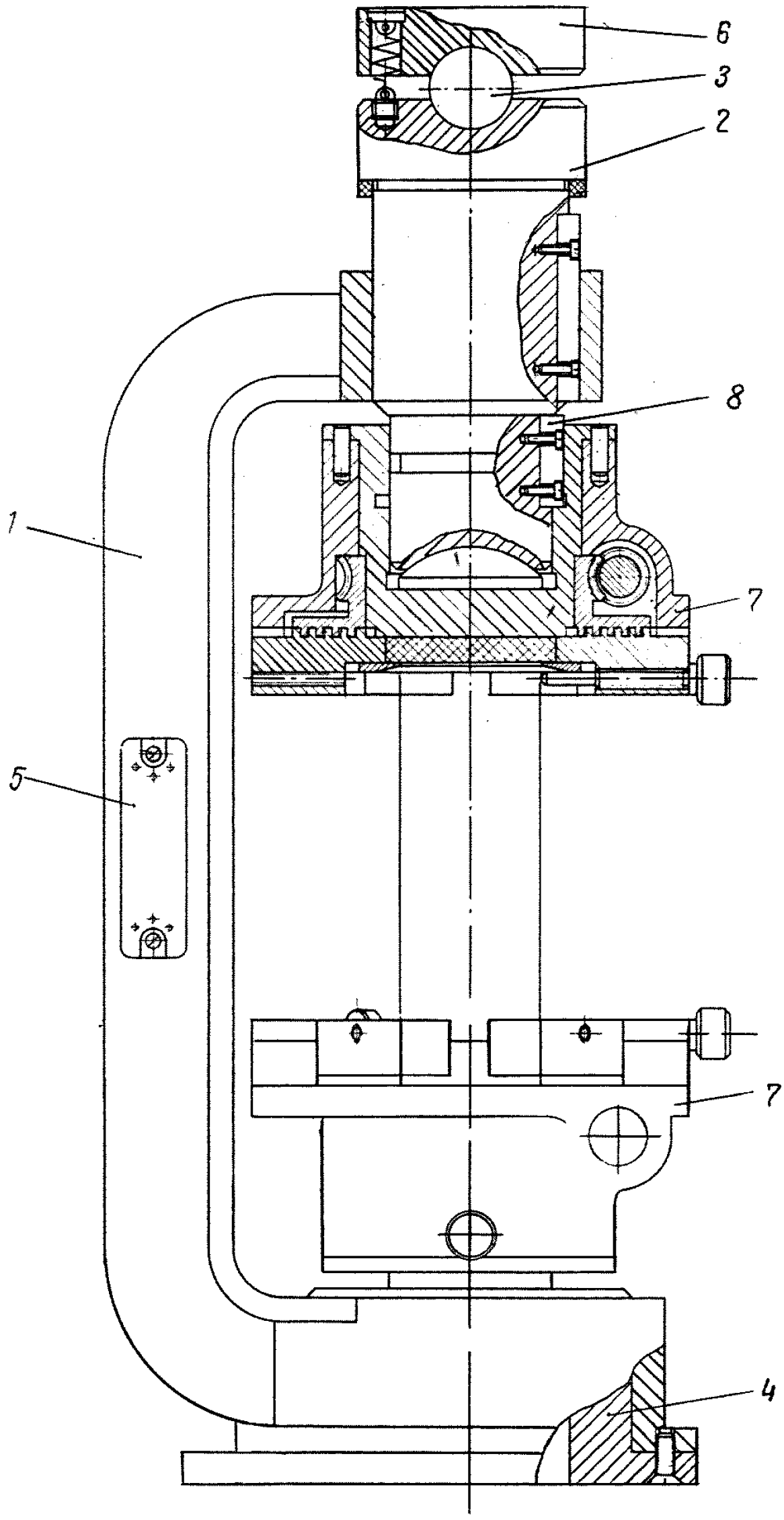


Рис.25

рые снабжены специальными устройствами для центрирования образца.

Испытательные головки, в зависимости от допускаемых условий на контактах, изготавливаются 3 модификаций: 1) с регулируемыми при нагрузке низкомодульными прокладками, 2) с напряженными низкомодульными прокладками, 3) с прокладками, армированными шариковыми инденторами малого диаметра (ϕ 2 *мм*).

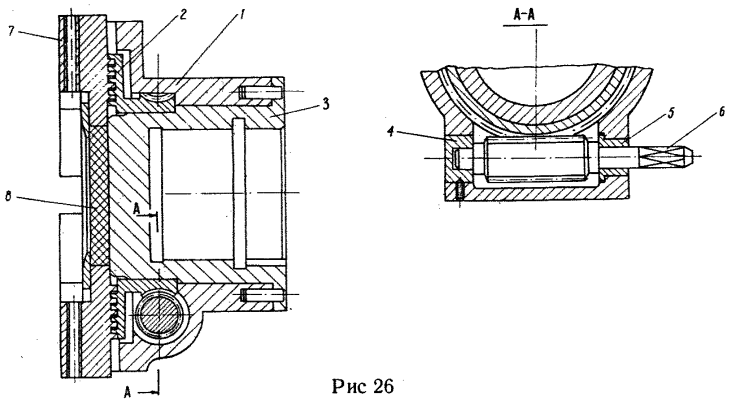


Рис 26

Испытательная головка с регулируемыми низкомодульными прокладками изображена на рис.26. Головка состоит из корпуса *1*, червячного колеса *2*, стакана *3*, втулки *4*, втулки *5*, червяка *6*, кулачка *7*, низкомодульной прокладки *8*.

Перед проведением испытаний низкомодульные прокладки уплотняются при помощи червяка *6* и червячного колеса *2*.

Материал низкомодульных прокладок выбирается в зависимости от прочности испытываемого материала или породы: для пород с пределом прочности на одноосное сжатие от 10 до 100 *кгс/см*^{2} применяется резина (пластина МБ-А-Т, ГОСТ 7338-65); для пород с пределом прочности от 80 до 250 *кгс/см*^{2} — фторопласт (ГОСТ 1007-62); для пород с прочностью от 200 до 1500 *кгс/см*^{2} — смола эпоксидно-диановая ЭД-6 (ГОСТ 10586-63), отвержденная малеиновым ангидридом (ГОСТ 5854-51) или «полиамид-66» (пластина круглая). При этом толщина прокладки при испытаниях составляет 7—8 *мм*. Зазор между внутренним диаметром корпуса *1* и испытываемым образцом составляет 0,3—0,5 *мм* на сторону.

На рис.27 изображена испытательная головка для испытаний образцов с грубошлифованными торцами, армированная податливой шаровой постелью. Головка состоит из металлической накладки *1*, в центральной выточке которой расположена прокладка из эпоксидно-диановой смолы, в которой в определенном порядке размещаются шариковые инденторы малого диаметра (2 *мм*); корпуса *2*; цанг *3* и *4*; установочных винтов *5* с гайками *6*, расположенных под углом 120°. Конструкция цангового устройства позволяет центрировать образец с точностью 0,1—0,15 *мм*.

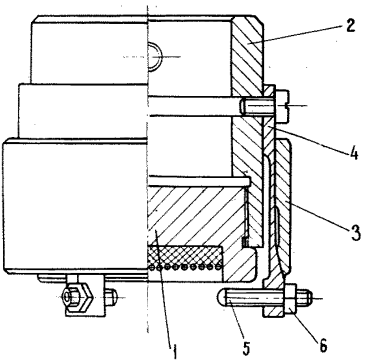


Рис 27

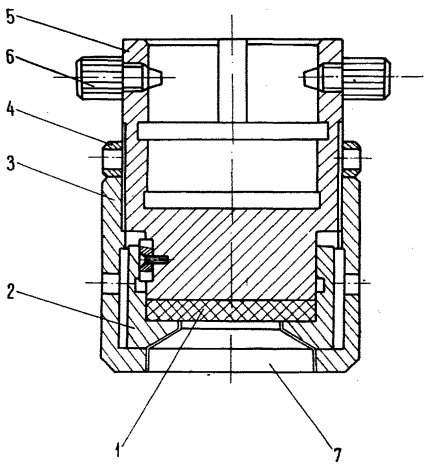


Рис.28

На рис.28 изображена испытательная головка с низкомодульными напряженными прокладками, состоящая из стакана *5*, обоймы *3*, низкомодульной прокладки *1*, центрирующей направляющей *2*, контргайки *4*, специального стопорного винта *6*, вкладыша *7*.

Перед проведением испытаний производится обжатие напряженных низкомодульных прокладок на прессе до оптимальной нагрузки. Для каждого материала прокладки существует своя оптимальная нагрузка обжатия. Так, для прокладки из резины она составляет 100 *кгс*, для прокладки из фторопласта — 2000 *кгс*, для прокладки из «полиамида—66» и эпоксидной смолы — 4000 *кгс*. При проведении испытаний прокладки сжимаются таким образом, чтобы избежать возможности выдавливания их в нижнее цилиндрическое вертикальное отверстие направляющей *2*. С целью устранения этого выдавливания

в отверстия направляющих устанавливаются предохранительные шайбы (вкладыши) *7* с диаметром, равным диаметру отверстия, и высотой, равной толщине дна направляющей *2* и обоймы *3*. Нагрузка от пресса передается штоком с диаметром равным диаметру внутренней цилиндрической выточки стакана *5*. Таким образом, в момент обжатия низкомодульная прокладка *1* находится под нагрузкой в замкнутом объеме направляющей *2*. Фиксация нагрузки обжатия прокладки производится при помощи цилиндрической обоймы *3* с резьбой и контргайки *4*.

Конструкция головки (см. рис.27) позволяет проводить испытания образцов горных пород и при условии трения о стальные шлифованные плиты. Для достижения этого из корпуса *5* испытательной головки вывинчивается накладка *1* и заменяется специальной металлической шлифованной накладкой.

Конструкция головки (см. рис.26) позволяет проводить испытания образцов при условии защемления их торцов на высоту 5 *мм*. Для достижения этого из головки с регулируемыми низкомодульными прокладками (см. рис.26) убираются кулачки *8* и заменяются другими специальными кулачками, которые в дальнейшем обеспечивают защемление торцов образца при проведении испытаний.

Высота прибора в сборе с испытательными головками 520 *мм*. Диаметр 200 *мм*. Вес прибора в сборе с головками 20 *кг*.

Приложение 2

Метод испытаний прочности пород на одноосное сжатие в устройстве с напряженными прокладками

1. Назначение метода

1. Лабораторный метод испытаний образцов твердых горных пород разработан для точного определения предела прочности пород на одноосное сжатие при статическом режиме нагружения с надежностью 95%. Метод не распространяется на полевые и натурные испытания горных пород, на испытания пород с величиной предела прочности на одноосное сжатие менее 10 *кгс/см*^{2} и более 1000 *кгс/см*^{2}. Метод включает в себя требования к отбору проб горных пород, изготовлению породных образцов, технике и методике проведения испытаний

2. Сущность метода

Образец горной породы сжимается между предварительно обжатыми (напряженными) низкомодульными прокладками, помещенными в замкнутый объем нагрузочного приспособления. Усилие обжатия зависит от материала прокладки. При испытании по этому методу устраняется влияние контактного трения торцов о нагрузочное устройство, исключается возможность появления растягивающих напряжений на торцах образца и достигается напряженное состояние в образце, близкое к однородному.

3. Требования к отбору и изготовлению образцов

Отбор проб горных пород должен производиться с места, типичного для целей, обусловивших постановку испытаний: из горных обнажений, горных выработок, буровых скважин и т.д.

Строение, состав и состояние породных кусков должно в максимальной степени отражать типичность массива горных пород в месте отбора. Пробы горных пород могут быть представлены либо в виде буровых кернов, либо монолитов. Способ извлечения проб из массива должен быть таким, чтобы не нарушалась целостность естественного сложения породы. При отборе проб должно соблюдаться условие сохранения естественной влажности в исследуемых породах.

Монолиты-глыбы должны быть размером не менее 300×$\times$300×200 *мм*. В случае невозможности отбора проб таких размеров допускается присылка монолитов размерами не менее 250×200×200 *мм*.

Пробы горных пород в виде кернов должны быть диаметром не менее 30 *мм* (для слабых пород не менее 50 *мм*) и длиной не менее 100 *мм*.

Документирование проб горных пород должно проводиться одновременно с их отбором. Документация должна включать в себя: наименование организации, производящей отбор, номер выработки или скважины, номер пробы, наименование породы, дата отбора пробы и т.д.

Форма образцов — круглая, цилиндрическая с плоскими основаниями, перпендикулярными оси. Величина диаметра образцов устанавливается в пределах от 30 до 43 *мм*. Кроме того, эта величина должна не менее чем в 10—12 раз превышать среднюю величину элемента структуры, слагающей образцы породы (размеры зерна, расстояния между структурными ослаблениями и т.п.). Наибольшая разность диаметров поперечного сечения — 0,3 *мм*. Отношение высоты образца к его диаметру — от 0,5 до 3,0. Наибольшая разность длин образующих — 0,5 *мм*. Стрелка кривизны поверхности оснований не ниже класса 4 по ГОСТ 2789-51. Необходимое для испытаний количество образцов, изготовляемых из каждой пробы, устанавливается от 8 до 13 штук.

4. Испытательное оборудование

Источник нагрузки — стационарная испытательная машина (пресс) с чувствительностью не ниже 1% (для нормального уровня надежности не ниже 3%) и с контролируемыми нагрузками в пределах до 10, 40 и 100 *тс* (в зависимости от прочности и диаметра испытываемой породы). Испытательная машина должна обеспечивать плавное и постепенное регулирование скорости нагружения в пределах от 1 до 3000 *кгс/сек*. Силоизмерительное устройство источника нагрузки (пресса) должно позволять непрерывно контролировать значение испытательных усилий и точно фиксировать максимальное значение. Инерционность контроля усилия, развиваемого источником нагрузки (прессом), должна обеспечивать этот контроль с опозданием не более 0,3—0,5 *сек*.

Для испытания образцов применяется специальное нагрузочное приспособление, обеспечивающее необходимые контактные условия нагружения образцов (рис.29). Нагрузочное приспособление состоит из диска нажимного *1*, шарика *2*, накидной гайки *3*, стакана *4*, пуансона *5*, низкомодульной прокладки *6* толщиной 7 *мм*.

Материал низкомодульных прокладок: для пород с пределом прочности от 10 до 100 *кгс/см*^{2} — жесткая резина (пластина) 8 Т-т (ГОСТ 7338-65); для пород с пределом прочности от 80 до 250 *кгс/см*^{2} — фторопласт (ГОСТ 1007-62); для пород

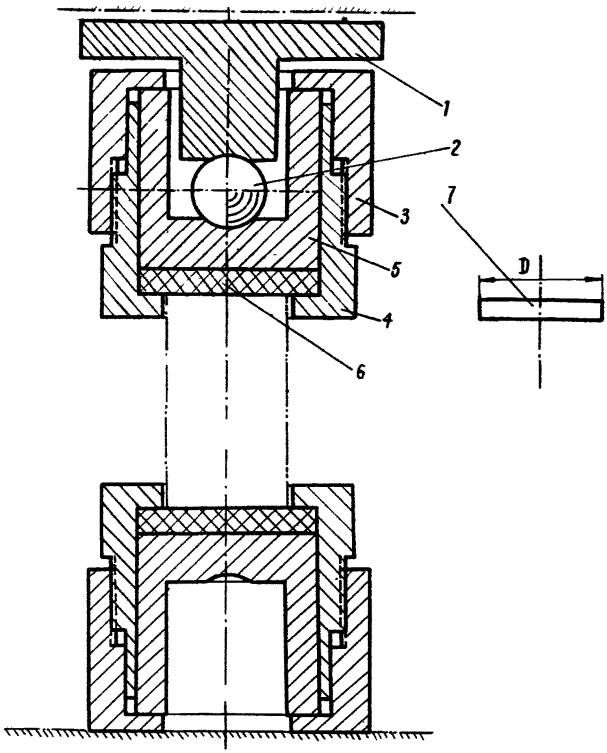


Рис.29

с пределом прочности от 200 до 1500 *кгс/см*^{2} — капрон, смола эпоксидно-диановая ЭД-6 (ГОСТ 10586-63), отвержденная малеиновым ангидридом (ГОСТ 5854-51) или пластмасса «полиамид-66». Низкомодульные прокладки помещены в полость нагрузочного устройства (с зазором по диаметру не более 0,05—0,1 *мм*) и предварительно (до проведения испытаний) обжаты нагрузкой, составляющей: для резины — 100 *кгс*, для фторопласта — 2000 *кгс*, для эпоксидно-диановой смолы и полиамида — 4000 *кгс*, для капрона — 8000 *кгс* (при общей площади сечения прокладки 20—30 *см*^{2}).

Для устранения выпучивания прокладок при их предварительном обжиме применяются предохранительные шайбы 7, диаметр которых на 0,3—0,4 *мм* меньше, чем диаметр дна стакана, а высота равна толщине дна стакана.

Величина усилия, с которым сжимается прокладка, фиксируется затяжкой накидной гайки разводным (гаечным) устройством с усилием 10—30 *кгс*. Проведение этих мероприятий способствует тому, что напряжение в прокладках сохраняется постоянным и после снятия обжимающей нагрузки. Регулирование обжатия низкомодульных прокладок осуществляется периодически через 100—200 циклов испытаний.

5. Подготовка испытательных прокладок к проведению испытаний

Для предварительного обжатия испытательных прокладок производится укомплектование нагрузочных приспособлений, в соответствии с диаметром образца и приближенным значением предела прочности породы при одноосном сжатии. Производится предварительное обжатие низкомодульных прокладок по схеме, изображенной на рис.30. Давлением испытательной машины (пресса) нагружается через шарик *1* пуансон *2*, который по всей площади сжимает низкомодульную прокладку *3*, находящуюся в замкнутом объеме стакана *4*. При нагружении пуансон *2* передает нагрузку на прокладку, которая расширяясь, выбирает диаметральный зазор. Измерение податливости рабочей прокладки во время нагружения производится стойкой с индикатором часового типа *5*.

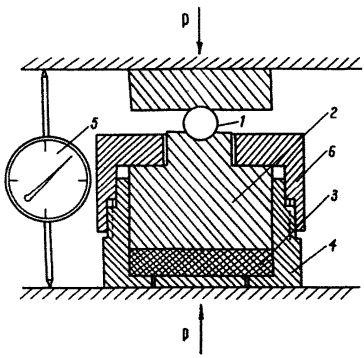


Рис.30

Показания индикатора растут до того момента, пока не выбран полностью весь зазор между внутренним диаметром обоймы и прокладкой. После того как зазор выбран полностью, наступает момент, когда прокладка при дальнейшем увеличении нагрузки начинает упруго сжиматься, при этом происходит стабилизация показаний деформаций, измеряемых стойкой с индикатором. Нагрузка, при которой происходит стабилизация роста деформаций, считается оптимальной нагрузкой обжатия данной рабочей прокладки. Для каждого материала, из которого состоят прокладки, существует своя оптимальная нагрузка обжатия. Отсюда, условием подготовки рабочей испытательной прокладки к работе следует считать достижение оптимальной нагрузки для каждой из прокладок (по измерению деформаций) с последующей фиксацией ее накидной гайкой *6*. Оптимальные

нагрузки для прокладок, применяемых в приборе, приведены выше.

6. Проведение испытаний

Производится установка испытываемого образца в сборе с нагрузочными приспособлениями в центральной части рабочей поверхности испытательной машины (пресса) соответствующей мощности. Производится плавное нагружение образца, вплоть до его разрушения, таким образом, чтобы разрушение образца произошло в течение 30—60 *сек* от момента начала нагружения. Регистрируется по силоизмерительному устройству испытательной машины (пресса) показание (P, *кгс*), которое отвечает максимальной нагрузке.

7. Обработка результатов испытаний

Обработка результатов испытаний на одноосное сжатие производится в следующей последовательности:

1. Вычисляется значение предела прочности при одноосном сжатии:

$$\sigma_{c(i)} = \frac{4P}{\pi Д^2},$$

где P — зарегистрированная максимальная нагрузка, достигнутая при испытаний образца, *кгс*; $Д$ — диаметр образца, *см*; i — номер образца в пробе.

2. Вычисляется среднее значение предела прочности породы при одноосном сжатии по результатам испытаний всех испытанных образцов:

$$\sigma_{c(ср)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{c(i)}}{n},$$

где n — число испытанных образцов.

3. Определяется доверительный интервал отклонения результатов испытаний отдельных образцов от величины $\sigma_{ср}$:

$$\Delta\sigma \cong \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (\sigma_i - \sigma_{ср})^2}.$$

4. Вычисляется коэффициент вариации определяемого показателя:

$$v = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{ср}} 100\%.$$

5. Определяемый показатель ($6_{сж}$) оценивается по показателю надежности (эта зависимость вычислена на основании положений теории выборок по значениям функции Стьюдента) в соответствии с нижеприведенной таблицей

Число образцов	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16
Надежность, %	61,0	77,0	86,0	91,0	94,0	96,0	97,5	99,0	99,2	99,4	99,7	99,8

В тех случаях, когда при малом числе образцов надежность результатов испытаний по какой-либо причине не может быть принята как удовлетворительная, повышение надежности без увеличения числа образцов может быть достигнуто за счет соответствующего расширения доверительного интервала.

Приложение 3

Метод испытаний прочности горных пород на одноосное сжатие с шариковыми инденторами и эластичной прокладкой

1. Назначение метода

Лабораторный метод испытаний образцов твердых горных пород разработан для приближенного определения предела прочности пород на одноосное сжатие при статическом режиме нагружения. Метод допускает применение для испытаний образцов с неточно шлифованными торцами. Метод распространяется на лабораторные и полевые испытания горных пород с пределом прочности от 100 до 1500 *кгс/см*^{2}.

2. Сущность метода

Испытываемый образец горной породы сжимается между рифленым наборно-шариковыми накладками нагрузочного устройства плавно возрастающим до разрушения образца усилием. Равномерность распределения нагрузки на торцы образца и устранение влияния контактного трения торцов о нагрузочное устройство достигается тем, что усилие торцу сообщается равномерно распределенными по площади мелкими стальными шариками нагрузочного устройства.

3. Требования к отбору и изготовлению образцов

Отбор проб горных пород должен производиться с мест, типичных для целей, обусловивших постановку испытаний: из горных обнажений, горных выработок, буровых скважин и т.д.

Строение, состав и состояние породных кусков должно в максимальной степени отражать типичность массива горных пород в месте отбора. Пробы горных пород могут быть представлены либо в виде буровых кернов, либо монолитов. Способ извлечения проб из массива должен быть таким, чтобы не нарушалась целостность естественного сложения породы. При отборе проб должны соблюдаться условия сохранения естественной влажности в исследуемых породах.

Монолиты-глыбы должны быть размером не менее 300×$\times$300×200 *мм*. В случае невозможности отбора проб таких размеров допускается присылка монолитов размерами не менее 250×200×200 *мм*.

Диаметры буровых кернов должны быть не менее 30 *мм* (для слабых пород не менее 50 *мм*) и длиной в пределах от 100 до 150 *мм*.

Каждая проба горной породы должна быть снабжена соответствующей документацией [83].

Форма образцов — круглая, цилиндрическая с плоскими грубообработанными (отрезанными) торцами, перпендикулярными оси образца. Величина диаметра — от 30 до 43 *мм*. Наибольшая разность диаметров поперечного сечения — 1,0—1,5 *мм*. Величина диаметра должна не менее чем в 10—12 раз превышать среднюю величину элемента структуры, слагающей образец породы. Допускаемое отклонение торцов от перпендикулярности оси — 1 *мм*. Высота образцов допускается в пределах 0,8—2,0 диаметра. Допускаемая величина отклонения поверхности торцов от плоскости (общая кривизна и выступы от отрезки) — не более 0,3 *мм*.

Для проведения испытаний породы требуется от 8 до 12 образцов.

4. Испытательное оборудование

Источник нагрузки — стационарная или портативная испытательная машина (пресс) с чувствительностью не ниже 1% (для нормального уровня надежности не ниже 3%), с контролируемыми нагрузками в пределах до 10, 40 и 100 *тс* (в зависимости от прочности и диаметра испытываемой породы).

Испытательная машина (пресс) должна допускать резкие спады нагрузок при хрупком разрушении породных образцов без ущерба для исправности машины и для результатов проведенного испытания. Машина должна обеспечивать плавное и постепенное регулирование скорости нагружения в пределах от 1 до 3000 *кгс/сек*. Силоизмерительное устройство источника нагрузки (пресса) должно позволять непрерывно контролировать значения испытательных усилий и точно фиксировать максимальное значение разрушения P_{max} при доведении образца до разрушения. Инерционность контроля усилия, развиваемого источником нагрузки (прессом), должна обеспечивать этот контроль с опозданием не более 0,3—0,5 сек. Источник нагрузки (пресс) должен обладать такими механическими параметрами, которые могли бы обеспечивать возможность размещения испытываемого образца в сборе со специальными нагрузочными приспособлениями в вертикальном направлении.

Для непосредственного испытания образцов применяется специальное нагрузочное приспособление, обеспечивающее контактные условия нагружения образцов (см. рис.12). Нагрузочное приспособление состоит из следующих элементов: из опорных плит *1* пресса, шаровой опоры *2*, накладок *3*, эластичных прокладок *4* и шариковых инденторов *5*, между которыми устанавливается испытываемый образец *6*.

При сжатии образца шариковые инденторы внедряются в торец образца, при этом под шариками возникают соединяющиеся между собой зоны раздробленной породы, через которые передается давление на образец.

Диаметр внутренней выточки в накладке должен выбираться в зависимости от диаметра образца. Зазор между образцом и стенками выточки для предотвращения «зажимания» торцов образца шариковыми инденторами должен быть не более $0{,}25d_ш$ (где $d_ш$ — диаметр шарика).

Эластичной прокладкой в приборе служит эпоксидная смола. Толщина прокладки 7 *мм*. Благодаря применению эластичной прокладки, шариковые инденторы не соединены жестко друг с другом, а равномерно располагаются по торцу образца, с одинаковым усилием контактируя как на выпуклостях, так и на впадинах торца.

Применение жестких накладок, эластичных прокладок и шариковых инденторов образует гибкую нагрузочную систему, следящую за неровностями торцов образца, причем нагрузка равномерно распределяется между всеми шариковыми инденторами.

5. Проведение испытаний

Испытываемый образец в сборе с нагрузочными приспособлениями устанавливается в центральной части рабочей поверхности испытательной машины (пресса) соответствующей мощности. Производится плавное нагружение образца, вплоть до его разрушения, таким образом, чтобы разрушение образца произошло в течение 30—60 сек. от момента начала нагружения. Регистрируется по силоизмерительному устройству испытательной машины (пресса) показание (*P, кгс*), которое отвечает максимальной нагрузке, достигнутой при доведении образца до разрушения.

6. Обработка результатов испытаний

Обработка результатов испытаний на одноосное сжатие производится в следующей последовательности:

1. Вычисляется значение предела прочности при одноосном сжатии:

$$\sigma_{с(i)} = \frac{4{,}5P}{\pi Д^2},$$

где P — зарегистрированная максимальная нагрузка, достигнутая при испытании образца, *кгс*; Д — зарегистрированный диаметр образца, *см*; i — номер образца в пробе.

2. Вычисляется среднее значение предела прочности породы при одноосном сжатии по результатам испытаний всех испытанных образцов:

$$\sigma_{c(cp)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{c(i)}}{n},$$

где n — число испытанных образцов.

3. Определяется доверительный интервал отклонения результатов испытаний отдельных образцов от величины σ_{cp} :

$$\Delta\sigma \cong \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (\sigma_i - \sigma_{cp})^2}.$$

4. Определяется коэффициент вариации определяемого показателя:

$$v = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{co}} 100\%.$$

5. Определяемый показатель (σ_c) оценивается по показателю надежности (эта зависимость вычислена на основании положений теории выборок по значениям функции Стьюдента) в соответствии с нижеприведенной таблицей.

Число образцов	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16
Надежность, %	61,0	77,0	86,0	91,0	94,0	96,0	97,5	99,0	99,2	99,4	99,7	99,8

В тех случаях, когда при малом числе образцов надежность результатов испытаний по какой-либо причине не может быть принята как удовлетворительная, повышение надежности без увеличения числа образцов может быть достигнута за счет соответствующего расширения доверительного интервала.

Упрощенный метод определения показателей объемной прочности горных пород

1. Назначение метода

Упрощенный метод определения показателей объемной прочности предназначен для определения параметров объемной прочности в лабораторных условиях.

Предложенный метод испытаний может применяться также с целью определения показателей объемной прочности в полевых и натурных условиях шахты (разреза). Надежность определения исходных показателей по этому методу 75—80%. Отличительными особенностями метода определения показателей объемной прочности является его простота и доступность.

2. Сущность метода

Упрощенный метод определения показателей объемной прочности базируется на экспериментальных данных по испытанию пород на одноосное сжатие при разных отношениях h_0/d_0. Основная задача метода — установление общей зависимости между значениями основных параметров, определяющих паспорт прочности горной породы при различных условиях напряженного состояния, и значением прочности образцов с разной высотой при одноосном сжатии σ_c .

3. Требования к отбору и изготовлению образцов

Пробы горных пород могут быть представлены либо в виде буровых кернов, либо монолитов.

Размеры монолитов не менее $300\times300\times200$ *мм* (допускаются монолиты размером $250\times200\times200$ *мм*).

Диаметр буровых кернов должен быть не менее 30 *мм*, высота — не менее 100—150 *мм*.

Каждая проба должна быть снабжена соответствующей документацией [83].

Форма образцов — круглая, цилиндрическая с плоскими основаниями, перпендикулярными оси. Величина диаметра образцов устанавливается в пределах от 30 до 60 *мм*. Отношение высоты образца к его диаметру от 0,3 до 2,0 (0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0). Наибольшая разность диаметров поперечного сечения 0,1—0,3 *мм*. Стрелка кривизны поверхности оснований в пределах 0,1—0,3 *мм*. Чистота поверхности оснований не ниже класса 4 по ГОСТ 2789-51. Необходимое для испытаний количество образцов, изготовляемых из каждой пробы, устанавливается от 15—18.

4. Испытательное оборудование

Источник нагрузки — стационарная испытательная машина (пресс), с чувствительностью не ниже 1% (для нормального уровня надежности не ниже 3%), с контролируемыми нагрузками в пределах до 10, 40 и 100 *тс* (в зависимости от прочности и диаметра испытываемой породы). Машина должна обеспечивать плавное и постепенное регулирование скорости нагружения в пределах от 1 до 3000 *кгс/сек*. Силоизмерительное устройство источника нагрузки (пресса) должно позволять непрерывно контролировать значения испытательных усилий и точно фиксировать максимальное значение при разрушении образца. Инерционность контроля усилия, развиваемого источником нагрузки (прессом), должна обеспечивать этот контроль с опозданием не более 0,3—0,5 сек. Источник нагрузки (пресс) должен обладать такими механическими параметрами, которые обеспечивали бы возможность размещения испытываемого образца в сборе с нагрузочными приспособлениями в вертикальном направлении.

Нагрузочное приспособление состоит из накладок (верхней и нижней), центрирующей плиты и шарика. Накладки изготовлены из стали 45, закалены до твердости по Роквеллу $R_C = 56$—60, шлифованы (по 8 классу чистоты). Толщина давильных накладок должна быть не менее 0,5 диаметра образца. Верхняя накладка (с шариком) должна иметь круговой выступ для центрировки образца относительно центра сферы с точностью до 1 *мм*.

5. Проведение испытаний

Подготовленные образцы устанавливаются на испытательном прессе (в средней части) между стальными шлифованными давильными накладками (кольцевой зазор между образцом и внутренним диаметром накладки заливается сплавом Вуда или эпоксидной смолой ЭД-6) и испытываются на сжатие до разрушения. По силоизмерительному устройству пресса фиксируется предельная нагрузка, при которой происходит разрушение образца горной породы .

6. Обработка результатов испытаний

Обработка результатов испытаний производится в следующей последовательности:

1. Значение предела прочности на сжатие при испытании образцов с отношением $h_0/d_0 = 2{,}0$ принимается как истинный предел прочности на одноосное сжатие σ_c .

2. Значения пределов прочности на сжатие при испытании образцов с отношением $h_0/d_0 = 1{,}5$; 1,0; 0,5; 0,3 (допускаются и

промежуточные значения, но не менее 0,3) принимаются как максимальные главные напряжения σ_1^i.

3. Значение минимального главного напряжения σ_2^i вычисляется по зависимости, выведенной на основе обобщения проведенных экспериментов по испытанию пород на одноосное сжатие при условии заделки торцов образца и отношении $h_0/d_0 = 0{,}3 \div 2{,}0$:

$$\sigma_2^i = K \sqrt{\frac{\sigma_c^i}{\sigma_c} \ln \frac{\sigma_c^i}{\sigma_c} \ln \frac{2d_0}{h_0}}, \qquad (1)$$

где σ_c^i — прочность образца при $h_0/d_0 < 2$; σ_c — прочность образца при $h_0/d_0 = 2$; d_0 — диаметр образца; h_0 — высота образца; K — коэффициент, зависящий от условий на контактах и от прочности породы на одноосное сжатие (для испытанных горных пород с пределом прочности на одноосное сжатие от 400 до 900 *кгс/см*^{2} этот коэффициент мало изменяется и равен 70,0 *кгс/см*^{2}).

4. Каждая пара напряжений (прочность образца σ_c^i при $h_0/d_0 < 2{,}0$ и соответствующее боковое эквивалентное давление σ_2^i) рассматривается как пара предельных разрушающих главных напряжений, по величинам которых строятся предельные круги Мора в осях «$\sigma - \tau$».

5. После построения всех кругов Мора проводится предельная огибающая (паспорт прочности) и определяются показатели объемной прочности: сцепление C и угол внутреннего трения φ.

6. При необходимости более строгой оценки результатов испытаний, обработка их производится по способу наименьших квадратов (с ручной или машинной обработкой результатов испытаний по каждой паре главных напряжений σ_1 и σ_3). Выходными данными программы являются: 1) значение величины сцепления C; 2) значение величины угла внутреннего трения φ; 3) значение коэффициента вариации по сцеплению ΔC; 4) значение коэффициента вариации по углу внутреннего трения $\Delta\varphi$.

Программа машинной обработки (на ЭВМ «Наири») по способу наименьших квадратов приведена в приложении 5.

Программа машинной обработки результатов испытаний образцов горных пород в стабилометре

Обозначение в программе

Выходные данные

ш — величина сцепления, *кгс/см²*
р — погрешность сцепления, *кгс/см²*
г — величина угла внутреннего трения (градус)
о — погрешность угла внутреннего трения (градус)
j и m — количество исходных точек

Вводимые параметры

t_i — величина главного вертикального напряжения
$\imath_\imath$ — величина главного минимального напряжения

1. Допустим i = 1 j = 12 m = 12
2. Введем $t_\imath, \imath_\imath$
3. Вставим i = i + 1
4. Если i ⩽ j идти к 2
5. Допустим i = 1; s = 0; т = 0; л = 0; $\alpha = 0$
6. Вычислим s = s + $t_\imath$
7. Вычислим т = т + $\imath_\imath$
8. Вычислим л = л + $\imath_\imath^2$
9. Вычислим $\alpha = \alpha + t_i \imath_\imath$
10. Вставим i = i + 1
11. Если i ⩽ j идти к 6
12. Вычислим u = $(s_л - \alpha_r)/(m_л - т^2)$
13. Вычислим z = $(m_\alpha - s_r)/(m_л - т^2)$
14. Вычислим ш = $0{,}5u/\sqrt{z}$
15. Вычислим г = $57{,}3(\alpha\, r_c \sin(z-1)/(z+1))$
16. Допустим i = 1 x = 0
17. Вычислим $\delta_\imath = (u + z\imath_i - t_i)^2$
18. Вычислим x = x + $\delta_\imath$
19. Вставим i = i + 1
20. Если i ⩽ j идти к 18
21. Вычислим $\imath = \sqrt{((x/(m-2))}$
22. Вычислим b = $(m_л - т^2)/т$
23. Вычислим c = $(m_л - т^2)/m$
24. Вычислим H = $\imath/\sqrt{b}$
25. Вычислим ы = $\imath/\sqrt{c}$
26. Вычислим O = $57{,}3^{ы}/((z+1)\sqrt{z})$
27. Вычислим p = $0{,}5^{н}/\sqrt{z} + 0{,}25^{ны}/(z\sqrt{z})$
28. Печатаем с 2-мя знаками ш, р
29. Печатаем с 2-мя знаками г, о
30. Идти к 1

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф. Свойства горных пород и методы их определения. М., «Недра», 1969.

2. Матвеев Б. В. Временные требования по составу и методам механических испытаний горных пород при разведке месторождений полезных ископаемых для проектирования подземной разработки. Л., изд. ВНИМИ, 1965.

3. Барон Л. И., Логунцов Б. М., Позин Е. З. Определение свойств горных пород. Госгортехиздат, 1962.

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

5. Кузнецов Г. Н. Доклад на совещании по вопросам горного давления. Углетехиздат, 1948.

6. Paulding B. W. Jr. Techniques used in study and the fracture mechanics of rock.«Test. Techn. Rock Mech.» Philadelphia, Pa, Amer. Soc Test. and Mater., 1966.

7. Siebel E., Pomp. Die Ermittlung der Formänderungsfestigkeit von Metallen durch den Stauchversuch Mitt. Kaiser-Wilhelm Inst. Eisenforsch, 9, Düsseldorf, 1927, 157

8. Пономарев С. Д. и др. Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении. М., 1950.

9. Vutukuri V. S., Lama R. D. Stress distribution under compression. «Mining Mag.», 1972, 126, № 5.

10. Лексашев Ю. Ф. и др. Действительные и истинные диаграммы сжатия винипласта и органического стекла. «Научные труды Ташкентского текстильного института», 1967, вып. 2(21).

11. Суяров Д И. и др. Определение сопротивления деформации металлов. «Заводская лаборатория», т XXI, № 1, 1955

12. Mika J., Ondraček E. Vliv třeni při tlakově zkonšce a zpúsoly jena zmenšeni. «Strojirenstvi», 1966, 16, № 5.

13. Фисенко Г. Л. Определение сцепления и коэффициента внутреннего трения полускальных горных пород Коркинского месторождения. В кн. «Исследования по вопросам маркшейдерского дела», сб. XXVII. Л.—М., Углетехиздат, 1953.

14. Матвеев Б.В., Михеева М. М., Карташов Ю М. Методические указания по лабораторным испытаниям деформативности крепких горных пород при одноосном сжатии. Л., изд. ВНИМИ, 1967

15. Кунтыш М. Ф. Влияние чистоты обработки рабочих поверхностей образцов пород на прочность при сжатии. Сб. «Физико-механические свойства горных пород». Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского, XXXVII. М., «Недра», 1967.

16. Lorrain Michel, Pomade Philippe, Bascoul Alain. Sur la réalisation d'un champ homogéne de contraintes planes en compression «C.R Acad Sci», 1972, 274, № 1.

17. Кузнецов С. Т., Кротов Ю. Г. Устройство для испытаний образцов. Авторское свидетельство № 230492 за 1968 год

18. Карташов Ю. М., Грохольский А. А. Прибор для испытаний образцов горных пород или строительных материалов на одноосное сжатие. Авторское свидетельство № 331278 за 1972 год

19. Kupfer Helmut, Hildsdorf Hubert K., Rusch Hubert. Behaviour of concrete under biaxial stresses. «J. Amer. Concrete Inst», 1969, 66, № 8.

20. Sell Rudolf. Festigkeit und Verformung von Gasbeton unter zweiaxialer Druckzug—Beanspruchung. Untersuchungen über die Gasbeton—Schubfestigkeit zum Studium des Bruchverhaltens. «Deutsch. Ausschuss Stahlbeton», 1970, № 209.

21. Brown E. T., Hudson I. A. Progressive collapse of simple block-jointed systems. «Austral. Geomech. J.», 1972, 2, № 1.

22. Чече А. А., Корзун С. И., Кулик И. И. Новый способ испытания образцов строительных материалов на прочность. «Заводская лаборатория», т. 38, № 9, 1972.

23. Nelissen L.I.M. Biaxial testing of normal concrete. «Neron», 1972, 18, № 1.

24. Föppl A. Mitteilungen aus dem Mechan. Techn Lab. der Techn. Hochsch., München, 1900.

25. Roy M., Lo K. Y. Effect of end restraint on high pressure tests of granular materials. «Can. Geotechn J», 1971, 8. № 4.

26. Байдюк Б. В., Шрейнер Л. А., Лагун Л. И. Исследование деформационных свойств горных пород Волго-Уральской нефтегазоносной области. В сб. «Экспериментальные исследования в области разработки глубоких нефтяных и газовых месторождений». М., «Наука», 1964

27. Ахвердов И. Н., Лукша Л. К. О характере разрушения бетона при различных напряженных состояниях. «Бетон и железобетон», 1964, № 7.

28. Бублик Ф. П., Авершин С. С. Исследование зависимости несущей способности целиков от их формы и условий на контактах. Труды ВНИМИ, сб. 70, Л., изд. ВНИМИ, 1968.

29. Ширко Г. И. Некоторые вопросы механического состояния и поведения горных пород при бурении сверхглубоких скважин. Инф. сборник ВИТРа, № 34, 1962.

30. Dzulynski, Mlle, L'essai de compression simple des materiaux pierreux. «Mem. Centre. etud. rech. et essais sci. genie civ.», 1969, № 28.

31. Карташов Ю. М., Грохольский А. А., Хачатурьян Н. С., Оксенкруг Е. С. К вопросу об определении прочности каменной соли на одноосное сжатие. Сборник материалов V Научно-технической конференции ВИОГЕМ, часть III, «Горное дело». Белгород, 1971.

32. Hardy H. R., Jr. A loading system for the investigation of the inelastic properties of geologic materials. «Test. Techn. Rock Mech. Philadelphia, Pa, Amer. Soc. Test. and Mater.», 1966.

33. Карташов Ю. М., Мазур-Джуриловский Ю. Д., Грохольский А. А Об определении прочности горных пород на одноосное сжатие. «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1970, № 3.

34. Rinne. Neues Jahrbuch für Miner. Geol. und Paläont. 1909, Bd, 11 S, 121.

35. Brady B. T. Effects of inserts on the elastic behaviour of cylindrical materials loaded between rough end-plates. «Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.». 1971, 8, № 4.

36. Hsu T. C, Young A. I Plastic deformation in the compression test of pure copper. «J. Strain. Anal.» 1967, 2, № 2.

37. Лисицын Г. Л. Экспериментальные исследования прочности бетона при двухосном сжатии. В сб. «Объединенная сессия научно-исслед институтов Закавказских республик по строительству». Ереван, 1969

38. Полосаткин Г. Д Уменьшение трения в торцах при сжатии цилиндрических образцов. «Заводская лаборатория», т. XXII, № 7, 1957.

39. Лихарев К. К. К методике построения действительных характеристик материалов при одноосных растяжении и сжатии. «Заводская лаборатория», т. XXII, № 12, 1957.

40. Карташов Ю. М. Методические указания по ускоренным вибрационным испытаниям слабых горных пород на ползучесть. Л., изд. ВНИМИ, 1967.

41. Родионов А. А., Сизов Е. С. Способ испытания металла на сжатие. Авторское свидетельство № 191860 за 1967 г.

42. Гончаров И. Г. Прочность каменных материалов в условиях различных напряженных состояний. Л.—М., Госстройтехиздат, 1960.

43. Templier Alian. L'effet de la forme et de l'hétérogénéité des échantillons sur leur résistance en compression. «Rev. ind. minéralle», 1969.

44. Халимовский М. А. Опорное трение, соотношение размеров образцов и упругие свойства горных пород. «Изв. высших учебных заведений. Горный журнал», 1969, № 6.

45. Lusche Manfred. Einfluß der Höhe von Betonzylinder auf das Ergebnis einer Druck-E-Modul—Messung. «Beton», 1971, 21, № 9.

46. Кунтыш М. Ф. О величине зоны влияния сил трения при испытании образцов на сжатие. «Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского», вып. № 89, 1971.

47. Peng S. D. Stresses within elastic circular cylinders loaded uniaxially and triaxially. «Int. J Rock Mech. and Mining Sci» 1971, 8, № 5.

48. Карапетян К. С. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии в зависимости от высоты опытного образца. «Айкакан ССР. Гитутюннери Академиа. Зекуйцнер. Докл. АН АрмССР», 1965, 40, № 5.

49. Höfer K.-H., Knoll P. Untersuchungen zum Mechanismus der Kriechverformung von Carnallitit und praktische Anwendungen. «Ber. Ländertreff. Int. Büros Gebirgsmech. Leipzig, 1968», Berlin, 1970.

50. Волков Ю. К., Гунькин С. П., Молотков А П, Зеленев Ю. М. Влияние масштабного фактора на деформационно-прочностные свойства полиэтилена (полипропилена). В сб. «Всесоюзный научно-технический симпозиум по инж. оценке полимерных материалов и конструкций из них». «Тезисы сообщения». Б м., 1971.

51. Савченко А. Ф. О предельных деформациях сжатия каменной соли Артемовского месторождения. «Труды ВНИИ соляной промышленности», вып. 14, ч. I, 1970.

52. Wawersik W. R., Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. «Int. J. Rock Mech. and Mining Sci», 1970, 7, № 5.

53. Perkins R. D., Green S. I., Friedman M. Uniaxial stress behaviour of porphyritic tonalite at strain rates to 10^3/second. «Int. J. Rock Mech. and Mining Sci», 1970, 7, № 5.

54. Конда Йоситэру, Ясима Сабуро, Симодзака Дзюндзо. Нихон коге кайси. «J. Mining and Met. Inst.», Japan, 1970, 86, № 987.

55. Karsan I. Demir, Iirsa James O. Behavior of concrete under varying strain gradients. «J. Struct. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.», 1970, **96**, № 8.

56. Swanson S. R., Brown W. S. An observation of loading path independence of fracture in rock. «Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.», 1971, 8, № 3.

57. Dhir R.K., Sangha C.M., Munday I G.L. Influence of specimen size in unconfined rock strength. «Colliery Guard.», 1972, **220**, № 1.

58. Brady B.T. Initiation of failure in a radially endconstrained circular cylinder of brittle rock. «Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.», 1971, 8, № 4.

59. Hobbs D. W. Rock compressive strength. «Colliery Engng.», 1964, 41, № 485.

60. Satyanarayana V. V., Singh D. P. Compressive strength of rock. «Metals and Minerals Rev.», 1968, 7, № 4.

61. Зурабишвили Н. И., Рамишвили П. Н. Прочностные показатели образцов горных пород применительно к определению размеров целиков. В сб. «Разработка месторождений полезных ископаемых Грузии». Тбилиси, «Мецниереба», 1969.

62. Sugawara Katsuhiko, Oka Yukitoshi, Hiramatso Yoshio. «Suijokwaishi Trans. Mining and Metallurg. Assoc.», 1971, 17, № 4.

63. Konig Gunter. Der Einfluß der Endflachenreibung im Dreiaxialversuch. «Mitt. Inst. Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmech. Techn. Hochsch. Aachen», 1970, № 51.

64. Фадеев А. Б. Анализ некоторых методов механических испытаний скальных горных пород. Труды ВНИМИ, сб. 70, Л., 1968.

65. Сипидин В. Н., Сидоров Н. Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Госстройиздат. Л.—М., 1963.

66. Hobbs D. W. The behavior of broken rock under triaxial compression. «Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.», 1970, 7, № 2.

67. Овчаренко Б. П., Шамаева М. П., Комаров А. И. Унификация методов изучения физико-механических свойств горных пород Донбасса. Труды Донецкого научно-исследовательского угольного института, сб. 11, 1968.

68. Пятковский П. И. Расчетное определение коэффициента крепости горных пород. «Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых», 1971, № 1.

69. Карташов Ю. М., Мазур-Джуриловский Ю. Д., Грохольский А. А. Устройство для определения прочностных и деформационных характеристик образцов хрупких горных пород. Авторское свидетельство № 256699 за 1969 год.

70. Матвеев Б. В. Руководство по проведению испытаний объемной прочности горных пород. Л., изд. ВНИМИ, 1962.

71. Ставрогин А. Н. Исследование горных пород в сложных напряженных состояниях. «Горный журнал», 1961, № 3.

72. Койфман М. И., Ильницкая Е. И., Карпов В. И. Прочность горных пород в объемном напряженном состоянии. «Наука», 1964.

73. Матвеев Б. В. Методика лабораторного определения прочности горных пород на сдвиг (срез). Л., изд. ВНИМИ, 1968.

74. Ильницкая Е. И. Определения сопротивлений углей сдвигу и разрыву. Тр. ИГД АН СССР, т. I. Изд. АН СССР, 1954.

75. Протодьяконов М. М. Обобщенное уравнение огибающих к предельным кругам напряжений Мора. В сб.: «Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением». Изд. АН СССР, 1962.

76. Гун Бэнь-и. Определение приближенного паспорта прочности горных пород по результатам испытаний на одноосное сжатие. Автореферат канд. диссертации. Л., ЛГИ, 1962.

77. Руппенейт К. В. Механические свойства горных пород. Углетехиздат, 1954.

78. Грохольский А. А. Некоторые результаты сопоставления аналитико-расчетных методов построения паспортов прочности с экспериментальными. Труды ВНИМИ, № 81. Л., изд. ВНИМИ, 1971.

79. Матвеев Б. В. Руководство по механическим испытаниям горных пород методом соосных пуансонов. Л., изд. ВНИМИ, 1960.

80. Нестеров М. П. О применении метода соосных пуансонов для определения прочностных характеристик горных пород. Сб. «Вопросы теоретической и экспериментальной реологии горных пород», вып. 1. Киев, «Наукова думка», 1972.

81. Ягодкин Г И., Мохначев М П., Кунтыш М. Ф. Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения М., «Наука», 1971

82. Десов А. Е. Новый способ испытания бетонов на сжатие. «Бетон и железобетон», 1971, № 1.

83. Карташов Ю. М. Инструкция по отбору проб горных пород. Л., изд. ВНИМИ, 1965.

84. Матвеев Б. В. Методические указания по испытанию прочности горных пород на одноосное растяжение. Л., изд. ВНИМИ, 1964.

85. Фисенко Г. Л. Методы количественной оценки структурных ослаблений массива горных пород в связи с анализом их устойчивости. Материалы IV Всес конференции. Современные проблемы механики горных пород. Л., изд. «Наука», 1972

86. Протодьяконов М. М., Мохначев М. П. К методике определения прочности горных пород. Изд. ИГД им. А. А Скочинского, 1966

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 3

ГЛАВА I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРОД НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ 6

§ 1. Краткий анализ основных схем испытаний 7

§ 2. Влияние отношения высоты образца к его диаметру на прочностные и деформационные свойства горных пород 17

§ 3. Разработка эталонных (точных) и приближенных методов определения прочности пород на одноосное сжатие 22

§ 4. Результаты испытаний 28

§ 5. Основные рекомендации 37

ГЛАВА II. УПРОЩЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБЪЕМНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД . . 39

§ 1. Краткий анализ существующих методов испытаний 40

§ 2. Разработка упрощенного метода испытаний . . . 43

ПРИЛОЖЕНИЯ 51

1. Прибор сжатия БП19 51

2. Метод испытаний прочности горных пород на одноосное сжатие в устройстве с напряженными прокладками 56

3. Метод испытаний прочности горных пород на одноосное сжатие в устройстве с шариковыми инденторами и эластичной прокладкой 62

4. Упрощенный метод определения показателей объемной прочности горных пород 66

5. Программа машинной обработки результатов испытаний образцов горных пород в стабилометре 69

ЛИТЕРАТУРА 70

Печатный цех ВНИМИ Зак. № 79 Тираж 300 21/XII—73 г.
М—07805 Объем 5 печ.л. Цена 63 коп.

Примечания

1. К стр. 36:

Изложенное на стр. 36 предположение о возникновении в однородно напряженном одноосно сжатом образце напряжений поперечного растяжения дается не в качестве результатов исследования авторов, а в порядке критического показа возможных выводов, следующих из этого предположения. Прямое возникновение растягивающих поперечных компонент напряжения одноосно и однородно сжимаемого образца опытами не определялось. Одним из возможных объяснений разрывного характера разрушения одноосно сжимаемых образцов является анализированный Гриффитсом и Грэмбергом механизм возникновения и действия растягивающих напряжений около имеющихся или возникающих дефектов сжимаемой породы. Известны также теории, предполагающие для сплошного (без дефектов) материала наличие растягивающих напряжений в образце при его одноосном сжатии (Брандербергер, Ульмэн); "балочная" теория, предполагающая изгиб (выпучивание) частей образца, разбитого вертикальными трещинами (Пенк) и др.

2. К стр. 37 и к Приложению 2:

1) Тип испытательных головок с напряженными прокладками - МА-7. Испытательные головки серийно изготавливаются на ОЭЗ ВНИМИ. Стоимость - около 300 рублей.

2) В настоящее время проходят экспериментальную проверку прокладки для испытания образцов пород прочностью на одноосное сжатие свыше 1000 кг/см^2.

gost.e-ecolog.ru