Министерство угольной промышленности СССР
Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский институт горной геомеханики
и маркшейдерского дела
ВНИМИ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОМПЛЕКСУ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД (ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ)

ЛЕНИНГРАД
1980

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА
В Н И М И

Р Е К О М Е Н Д А Ц И И
ПО КОМПЛЕКСУ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

(для инженерных расчетов горного давления)

Л е н и н г р а д
1980

УДК 622.023: (550.812+622.22+622.12) 553.94/96(083. 75)

Рекомендации предназначены для практического использования геологическими и проектными организациями Министерства угольной промышленности СССР при применении действующих в отрасли "Требований к определению механических свойств горных пород при геологическом изучении полей шахт Минуглепрома СССР (при разведке, строительстве, реконструкции и эксплуатации)" 1977 г.

В Рекомендациях детализируются нормативы предусмотренных методов определений, даны указания по их практическому выполнению, краткая информация о научном обосновании этих нормативов, а также о направлениях использования в отрасли результатов определения механических свойств пород.

Работа рассмотрена на Ученом совете ВНИМИ, принята Техническим управлением Минуглепрома СССР.

Ил. 53, табл. 14.

© Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ). 1980.

ВВЕДЕНИЕ

1. Важнейшим условием высокой эффективности и безопасности ведения горных работ и эксплуатации горных выработок является знание и рациональное использование горно-геомеханических процессов и явлений, возникающих в проходимом, разрабатываемом или поддерживаемом породном массиве при выполнении горнотехнологических операций.

Выемка в массиве горной породы или угля и образование горной выработки перераспределяет естественное напряжение массива от действия его собственного веса и веса налегающих горных пород. Невынутая часть массива вблизи выработки пригружается горным давлением зависших пород, породы деформируются, иногда разрушаются. Деформации и обрушение пород в выработанное пространство обусловливают сдвижение массива, в некоторых случаях вплоть до дневной поверхности. Эти деформации и сдвижение могут способствовать ведению горных работ (например, отжим угля), но могут и препятствовать им (завал выработки или горный удар).

2. Закономерности проявлений и развития процессов горного давления и сдвижения горных пород в различных горнотехнических ситуациях, при различных видах горных работ, в разнообразных геологических условиях в значительной мере изучены. Однако, эта изученность, приемлемая для типовых условий, применительно к конкретным случаям не всегда достаточно полна, детальна и точна; она не вполне охватывает сложные горногеологические и горнотехнические условия (большие глубины разработки, сложные температурные и гидрогеологические условия, интенсификацию и новые технологические приемы ведения горных работ). Более детальное и надежное знание проявлений и развития процессов горного давления и сдвижения пород позволит в перспективе более полно использовать их при горных работах, сокращать имеющиеся омертвленные резервы и применять более эффективные технические решения и технологические приемы.

При проектировании горных работ предусматривается прогнозирование и учет проявлений горного давления и сдвижения пород, а при ведении этих работ выполняются мероприятия по управлению горным давлением и сдвижением: применение соответствующего крепления выработок и установление такого порядка горных работ, при котором

развивающиеся процессы горного давления и сдвижения пород не препятствуют этим работам и в нужных случаях обеспечивают устойчивость выработок. Например, отставание крепления капитальных выработок от их проходки должно обеспечивать снятие части упругих напряжений вблизи обнажения (разгрузка) с передвижением максимума горного давления вглубь массива; однако при этом необходимо предотвращать развитие обрушения и потерю несущей способности обнажаемого массива при чрезмерном отставании крепления. Кроме крепления выработок, к числу мероприятий по управлению горным давлением относится применение охранных целиков, погашение неиспользуемых выработок и др. При проектировании и ведении горных работ и выемке угля предусматривают расчет необходимых механических параметров крепи и определение рациональных размеров целиков различного назначения и других элементов систем вскрытия и разработки, при которых обеспечивается оптимальное соотношение высокой производительности горных работ и благоприятного развития процессов горного давления и сдвижения пород, определяющего безопасные условия труда.

3. Проектирование систем вскрытия и разработки месторождений, способов очистной выемки ископаемого, проведения и поддержания выработок практически в значительной мере опирается на положительный опыт предыдущих инженерных решений и использование аналогии с условиями этого опыта. Этот опыт сформировался в результате статистических обобщений практики горных работ, и горно-геомеханических исследований. В первом случае, статистический отбор обобщаемых данных, естественно, исключил случаи отрицательного (по причинам неблагоприятного развития геомеханических процессов) опыта неуспешных решений горнотехнических задач. Тем самым оказались в какой-то мере учтенными горно-геомеханические факторы без их аналитического изучения. Однако, при обобщении сами эти факторы далеко не всегда фиксировались и использовались в качестве критерия аналогии; в результате, применение таких аналогий при проектировании сопряжено с известным риском и нуждается в дополнительных проектных запасах на незнание неучтенных факторов.

Более обоснованным и эффективным является использование при проектировании аналогичных инженерных решений, обобщенных с учетом оценки горно-геомеханических факторов: горного давления, сдвижения пород, горногеологических условий, и в том числе важнейшего из этих условий - механических свойств пород. Нередко такие аналогии обобщены в типовые инженерные решения, таблицы, атласы, каталоги.

Реже в проектной практике используются прямые приближенные инженерные расчеты по методу геомеханической аналогии проектируемых элементов систем разработки и горных работ с аналогичными элементами изученных прогрессивных систем и работ. Рассчитываемые при этом параметры определяются с использованием их прямой связи с показателями механических свойств породного мас-

сива в проектируемой и в известной, аналогичной горнотехнической ситуации. Этот метод инженерной аналогии также использует удобные табличные или графические выражения связи проектируемых параметров горных работ с такими показателями геомеханической ситуации, как крепость пород вмещающего массива и т. п.

Для решения ряда горнотехнических задач сделаны более или менее удачные попытки полного и строгого научного анализа явлений горного давления и сдвижения пород, включая напряженное состояние и деформации вмещающего массива, оценку его устойчивости и взаимодействия с крепью. Механизм этих явлений для изученных случаев описан точными аналитическими выражениями, применение которых при проектировании элементов систем разработки и горных выработок позволяет рассчитывать их параметры с учетом показателей механических свойств горных пород. Такие расчеты производят, если тяжелые и малоизученные горногеологические условия проектируемых объектов не находят удовлетворительных аналогов в изученной практике и типовых решениях. Применяют такие расчеты и при уточнении типовых решений с целью сокращения проектных запасов, применяемых для компенсации риска, связанного с неполным знанием условий и недостаточной обоснованностью исходных данных типовых решений.

4. Разрушение пород или угля в массиве или их деформирование под действием напряжений горного давления зависят от горногеологических условий, в том числе от прочностных и деформационных свойств этих пород и угля. Поэтому получение проектной и шахтостроительной организациями и шахтой необходимых сведений о фактических показателях механических свойств горных пород является обязательным условием успешности проектирования, строительства и эксплуатации горного предприятия.

Кроме вопросов управления горным давлением и сдвижением пород при подготовке, проектировании, ведении и развитии горных работ, учитывают вопросы технологии и техники проходки выработок и выемки угля, выбора рациональных параметров средств разрушения угля и пород, конструкции и режимов работы проходческих и добычных инструментов и механизмов, обеспечивающих необходимую производительность и другие технические и экономические показатели работы как горнодобывающего, так и шахтостроительного предприятий. Для решения этих вопросов при проектировании и ведении горных работ используются также сведения о разрушаемости и других механических свойствах угля и пород.

5. Сведения о механических свойствах пород и угля являются неотъемлемой частью результатов всех этапов геологического изучения месторождений и полей шахт: геологоразведочных работ, инженерно-геологических изысканий, повседневного геологического обеспечения эксплуатирующихся шахт.

Показатели механических свойств, выявленные в результате опробования пород, угля при выполнении предварительной разведки и

включаемые в технико-экономический доклад (ТЭД) о ее результатах, используются проектной организацией при разработке технико-экономического обоснования строительства горного предприятия. При этом прогнозируют общие промышленные перспективы разработки месторождения, его горногеологические особенности и основные условия вскрытия и отработки.

Данные о механических свойствах пород, угля, установленные детальной разведкой и доразведкой и включаемые в документы этой разведки, используются проектной организацией (или проектирующим подразделением угледобывающего объединения) для составления технического проекта строительства или реконструкции горного предприятия. Проектируют системы вскрытия (углубления) и разработки, технологию и технику горных работ, мероприятия по предотвращению горных ударов и других динамических явлений в разрабатываемом массиве горных пород, нормирование и определение стоимости горных работ.

Сведения о механических свойствах пород, угля, полученные инженерно-геологическими изысканиями при строительстве или реконструкции угледобывающих предприятий используются:

- проектной организацией для контрольного подтверждения правильности принятых проектных решений, повышения надежности, выявления и оценки резервов рабочего проекта строящегося горного предприятия и, в необходимых случаях, срочного внесения в проект коррективов;
- шахтостроительной организацией для оперативного и правильного выбора проходческого оборудования, эффективной технологии проходческих работ, нормирования их трудоемкости и расхода проходческих материалов и инструментов;
- строящимся предприятием в качестве основного (наряду с данными разведки) исходного фонда геологических сведений по полю шахты, разреза, пополняемого в ходе эксплуатации геологической службой и используемого производственными службами для развития предприятия.

Результаты последующих определений механических свойств горных пород в ходе эксплуатации горных предприятий, в том числе данные эксплуатационной разведки и геологической службы предприятия, используются его производственными службами для планирования, проектирования, нормирования и ведения горных работ по нарезке добычных участков, проходке выработок, выбору способов и средств ведения горных работ, обеспечению их безопасности и эффективности.

I. ОБЪЕМЫ И СОСТАВ РАБОТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПОЛЕЙ ШАХТ

6. Объемы работ по определению механических свойств горных пород, угля геологическими и изыскательскими организациями Минуглепрома СССР, а также геологической службой угольных шахт представлены в содержании действующих в отрасли "Требований к определению механических свойств горных пород при геологическом изучении полей шахт Минуглепрома СССР (при разведке, строительстве, реконструкции и эксплуатации)". В "Требованиях. . ." имеются разделы с указаниями нормативов для перечисленных этапов изучения и освоения шахтных полей. В то же время, во избежание ненужного повторения работ, выполненных на предшествующих этапах, предусматривается их преемственное использование на последующих.

7. Объемы работ по определению механических свойств горных пород на каждом этапе геологического изучения шахтных полей установлены в соответствии с целями, перечисленными в п. 5 и необходимыми для этого представительностью и надежностью изучения. Здесь представительность предусматривает типичность изучаемых мест с целью использования результатов определения свойств пород, а под надежностью понимается мера удовлетворения точности расчетов и проектов при использовании определяемых показателей. Поэтому места породного массива на месторождении, изучаемые в отношении геологического сложения и механических свойств, установлены "Требованиями. . ." исходя из вероятного расположения горных выработок при системе разработки, применяемой на угольном месторождении данного морфологического типа, с учетом расположения и размеров зон активного проявления горного давления и сдвижения пород около этих выработок.

Например, при разработке мощного крутопадающего угольного пласта щитовыми или слоевыми системами разработки с обрушением кровли, в непосредственном (беспорядочном) обрушении, определяющем способ управления горным давлением, участвуют породные слои кровли угольного пласта мощностью до 1–1,5 м и такая же мощность подстилающих пласт пород. Эти же слои, вместе с самим угольным пластом, образуют зону, механические свойства и деформации которой непосредственно определяют устойчивость выработок, пройденных по пласту, и давление на их крепь. Поэтому сведения о механических свойствах угля и пород в этой зоне имеют наибольшее значение и определяются особо детально.

Зоны пород, покрывающих и подстилающих беспорядочно обрушаемые, характеризуются развитием интенсивных напряжений опорного давления, а в подрабатываемой части, кроме того, разломом и упорядоченным оседанием на обрушенные породы. Эти процессы влияют на проявления горного давления в пластовых выработках, а также определяют устойчивость полевых выработок. Поэтому механические свойства пород этих зон также необходимо определять, хотя и менее детально, чем в зоне непосредственного залегания пласта. Исследования горного давления показали, что размеры зон детального изучения в покрывающих пласт породах основной кровли определяются (кроме участков с труднообрушаемой кровлей) мощностью 4М–5М, но не более 25 м, и в подстилающих породах – 1М, но не более 10 м. Здесь М – вынимаемая мощность угольного пласта.

Механические свойства слоев пород, еще более удаленных от разрабатываемого пласта, влияют на решение некоторых вопросов разработки, например – прогнозирования горных ударов, сдвижения дневной поверхности, обеспечения устойчивости квершлагов и др. Определение механических свойств этих слоев предусматривается еще менее детальным: только по представителям литогенетических разновидностей.

8. Интервалы между местами изучения механических свойств как по площади залегания изучаемого массива горных пород, так и по его мощности обусловливаются его природной неоднородностью (изменчивостью в плоскости напластования и слоистостью) и требуемой мерой надежности изучения.

На стадии предварительной разведки изучение механических свойств пород, предусмотренное "Требованиями. . .", проводится с использованием части скважин этой разведки, рассредоточенной по разведываемой площади. Интервалы между местами расположения в плане скважин, в которых механические свойства должны быть изучены, устанавливаются кратными соответствующим интервалам размещения по площади (в направлении простирания и вкрест простиранию) всех скважин разведочной сети.

Кратность этих интервалов должна определяться в зависимости от сложности геологического строения разведываемого участка таким образом, что в наиболее сложных местах, там, где располагаются геологические нарушения и т. п., изучение механических свойств производится по максимальному числу скважин разведки.

На стадиях детальной разведки (и доразведки) "Требованиями. . ." предусмотрено сгущение сетки скважин, используемых для изучения механических свойств, одновременно с общим сгущением сетки разведочных скважин.

В районах развития горно-эксплуатационных работ для изучения механических свойств угля, пород рекомендуется широко использовать горные выработки близрасположенных шахт и разрезов с условиями залегания, аналогичными изучаемым.

9. Для того, чтобы исключить повторение работ по изучению механических свойств пород, объем этих работ по каждой скважине как предварительной, так и детальной разведки (и доразведки) выполняется одинаковым – для преемственного использования.

В зонах особо детального изучения по мощности массива пород (угольные пласты, слои непосредственной кровли и почвы) изучаются каждый слой мощностью не менее 0,3 м и представители литотипов слоев меньшей мощности. В зонах детального изучения (основная кровля, основная почва) предусматривается изучение всех слоев мощностью не менее 1 м и представителей литотипов слоев меньшей мощности. В зонах менее детального изучения (покрывающие и подстилающие породы) предусматривается изучение представителей различных слоев из числа имеющихся литотипов.

10. На стадиях детальной разведки и доразведки для изучения механических свойств пород "Требованиями. . ." предусмотрено также использование части скважин, размещенных вблизи намеченных ТЭО участков расположения околоствольных дворов и уточняющих разрез по местам предполагаемого заложения шахтных стволов и главных квершлагов. При этом изучение обязательно проводят по скважине, ближайшей к месту предполагаемого заложения каждого ствола, а также по тем скважинам, число и глубина которых обеспечивают перекрытие разреза пород по профилю вдоль оси предполагаемого заложения каждого квершлага в пределах его длины. По этим скважинам предусмотрено изучение всех пластов и породных слоев.

11. На стадии инженерно-геологических изысканий, выполняемых при строительстве и реконструкции шахт, объемы работ по изучению механических свойств пород предусматривают использование следующих скважин:

– контрольно-стволовых;

– вертикальных (или наклонных), пробуренных с поверхности (или из горных выработок) по осевым линиям горизонтальных и наклонных выработок главных направлений, подлежащих проходке;

– горизонтальных опережающих по направлениям подлежащих проходке главных квершлагов и других капитальных выработок . Кроме того, изучение проводят в обнажениях массива стенками проходимых горных выработок.

Установленные "Требованиями. . ." зоны массива, подлежащие изучению механических свойств по указанным скважинам и выработкам, обеспечивают представительность получаемых данных, а перечень породных слоев в этих зонах и интервалы отбора проб для исследования обеспечивают как его представительность, так и необходимую надежность.

12. При геологических работах на эксплуатирующихся угледобывающих предприятиях "Требованиями. . ." предусмотрено изучение свойств пород:

– во всех имеющихся и проходимых шахтных стволах, шурфах, квершлагах и других капитальных, а также подготовительных выработ-

ках, с интервалами отбора породных проб, обеспечивающими необходимую представительность и надежность изучения;

– применительно к каждой очистной выработке, для ее кровли, почвы, а также для угольного пласта, в том числе с использованием опережающих выработок и скважин технического бурения для опережающего рыхления кровли;

– по скважинам эксплуатационной разведки, буримым с поверхности или из подземных выработок, а также по горизонтальным скважинам, опережающим проходку квершлагов в направлении их проходки;

– применительно к местам возникновения горных ударов, внезапных выбросов и других динамических явлений.

13. Состав определяемых показателей механических свойств по указанным в пп. 8–12 местам их изучения приведен в соответствующих нормативах "Требований. . ." для каждого места и этапа выполняемого геологического изучения.

Из большого количества разнообразных механических свойств, характеризующих горные породы, определяют только те показатели, от которых существенно зависит характер и интенсивность горнотехнологического процесса, его проектирование и выполнение. Так например, для слоев зависающей кровли подземной выработки наиболее важными свойствами являются упругость и сопротивляемость растяжению при прогибе и обрушении слоев, а также сопротивляемость сжатию в призабойных зонах опорного давления и за поддерживающей крепью.

В другом случае, например, при использовании междукамерных или иных целиков устойчивость последних определяется главным образом прочностью на сжатие слагающей целик породы, угля с учетом меры их структурной ослабленности, а также снижения прочности в зависимости от продолжительности нахождения целика под нагрузкой опорного давления.

Для подстилающих уголь пород, в которых располагаются полевые штреки, имеют существенное значение и должны определяться показатели пластичности, являющейся одной из важных причин пучения почвы в этих выработках.

Зоны породного массива вблизи горных выработок, являющиеся местом значительного накопления упругой потенциальной энергии, представляют собой возможные очаги горных ударов: поэтому для них предусматривается определение показателей упругости.

Ввиду изложенного, перечень показателей, определяемых при геологическом изучении полей шахт установлен с учетом вида напряженного состояния, характера деформирования и разрушения пород и угля в зонах активного развития горного давления и сдвижения пород при разработке системой, соответствующей данным условиям, а также при разрушении и добывании угля, пород предусмотренными способами и средствами. Этот перечень установлен также принимая во внимание цели геологического изучения пород на каждом этапе.

согласно п. 5 и, кроме того, с учетом степени изученности самих механических свойств пород и доступности их определения.

14. В настоящее время прочность горных пород при сжатии изучена в большей мере, чем другие свойства. Предел прочности при одноосном сжатии (крепость) пород является, кроме того, наиболее важным и употребительным показателем, определяющим выбор системы разработки, технологии горных работ и применяемого для них горного оборудования. Крепость пород принимается также за основу нормирования оплаты горных работ. Поэтому определение крепости при сжатии предусматривается (с разной степенью точности и детальности) для всех этапов изучения и зон опробования пород на механические свойства.

Кроме того, при геологическом изучении полей шахт Минуглепрома определяют следующие показатели:

- предел прочности при одноосном растяжении,
- модуль упругости (приближенно),
- структурную ослабленность (грубая оценка),
- пластичность (грубая оценка),
- текучесть (грубая оценка).

В случаях выраженной анизотропии изучаемой породы ее необходимая оценка производится лишь в отношении показателей прочности.

При существенном влиянии степени влагосодержания изучению механических свойств подвергают породы в состоянии естественного влагосодержания, обычно влагонасыщенные. Если это необходимо, показатели механических свойств определяют и для иных уровней влагосодержания опробуемых пород.

II. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ ПОКАЗАТЕЛЯХ

15. Изучение механических свойств горных пород происходило одновременно с развитием путей применения сведений об этих свойствах при проектировании и ведении горных работ.

Первые попытки учета механических свойств горных пород предпринимались в связи с близкими к горнотехническим задачами строительной механики, причем на механические свойства пород распространялись оценки, применявшиеся к строительным камням. Начало изучения механических свойств горных пород связывают с именами К. Баха и М. Ростовцева. В работе "Материалы для урочного положения горных работ", ч. 1 (М., Изд-во ЦК Горнорабочих, 1926) проф. М. М. Протодьяконов (старший) предложил способ оценки крепости пород и ее использование при проектировании горных выработок с учетом устойчивости пород.

Горные породы проявляют себя, как специфически неоднородные и хрупкие материалы со значительной изменчивостью состава сло-

жения и свойств в пределах разрабатываемого массива и границ ведения горных работ. Это и явилось основной причиной обособления механики горных пород от строительной и механики грунтов.

Основополагающей в области изучения механических свойств горных пород явилась монография Г. Н. Кузнецова "Механические свойства горных пород" (М., Углетехиздат, 1947). Существенным вкладом в учение о механических свойствах пород и в разработку методов их определения послужили работы О. Мора "Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik "Zweite neubearbeitete und erweiterte Auflage"(Берлин, 1914), К. В. Руппенейта "Механические свойства пород", (М.: Углетехиздат, 1956), Л. И. Барона и др. "Определение свойств горных пород", (М., Госгортехиздат, 1962). Ряд важных направлений о свойствах горных пород развит в трудах М. М. Протодьяконова (младшего), Ж. С. Ержанова, С. Е. Чиркова, В. Т. Глушко, И. А. Турчанинова, а также исследователей институтов ВНИМИ, ИГД им. А. А. Скочинского и других институтов. Важная разработка физической теории сопротивления горных пород выполнена А. Н. Ставрогиным в работе "Прочность и деформация горных пород" (М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1968).

16. Специфические механические свойства горных пород определяются следующими особенностями их строения:

- неоднородностью состава и сложения, определяемой пространственным распределением различных локальных минеральных компонентов (элементов структуры породы), разнообразно механически связанных друг с другом;
- наличием систем механических ослаблений (от контактов между минеральными элементами до пор, микро- и макротрещин с различной мерой связности и различными пространственными очертанием и ориентировкой);
- различной мерой анизотропии сложения (от трансверсальной изотропии до расслаиваемости, слоистости и пластового сложения породного массива).

17. Вещественный состав и связность горных пород обусловливают их хрупкость, выражающуюся:

- в значительно большей сопротивляемости разрушению при одноосном сжатии, чем при растяжении;
- в сравнительно малых величинах остаточных деформаций при разрушении одноосными нагрузками сжатия или растяжения;
- в существенной роли энергии упругой деформации в общем энергетическом балансе разрушения породы.

С хрупкостью горных пород тесно связана опасность в отношении возникновения горных ударов в подземных выработках, а также внезапных выбросов угля и газа. Она имеет значение и для технологии разрушения массива при добыче ископаемого и проходке выработок. Природа и показатели хрупкости горных пород еще недостаточно изучены.

18. Неоднородностью строения горных пород обусловлен так называемый масштабный эффект проявления их механических свойств, выражающийся в количественной зависимости показателей этих свойств от абсолютных размеров породных образцов или нагружаемых участков породного массива. Известны следующие проявления масштабного эффекта (рис. 1):

а. Разброс величины прочности пород, тем больший, чем меньше размеры породного образца (участка массива). Приближение величины этого разброса к некоторому характерному для каждой породы минимальному значению при достаточно больших размерах образца (участка).

б. Обратная зависимость средней (с учетом разброса) величины прочности породы от абсолютных размеров образца (участка). Приближение величины средней прочности к некоторому характерному минимальному значению при достаточно больших линейных размерах образца, участка породы ("прочность массива").

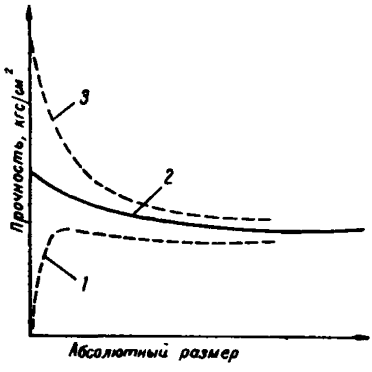


Рис. 1. Масштабный эффект зависимости прочности горной породы от абсолютных размеров образца:

1 – минимальной, 2 – средней, 3 – максимальной

Количественные показатели масштабного эффекта изучались пока на малом числе объектов и преимущественно в отношении предела прочности породы при одноосном сжатии. Наиболее важные результаты изучения масштабного эффекта прочности горных пород изложены в работах С. Е. Чиркова "Влияние масштабного фактора на прочность углей" (Алма-Ата, Наука, 1964) и "Упрощенные уравнения проявления масштабного эффекта в горных породах" – в сборнике "Доклады всесоюзной конференции по физике горных пород и процессов" (М.; Изд-во МГИ, 1974).

Известно, что при трехосном сжатии проявления масштабного эффекта ослабевают, а при растяжении усиливаются (см., например, Е. И. Ильницкая и др. "Свойства горных пород и методы их определения". (М.; Недра, 1968). Масштабный эффект в отношении деформационных свойств пород совсем не изучен.

19. Анизотропия сложения горных пород отражается на их механических свойствах. Вопросы анизотропии упругих свойств пород рассмотрены С. Г. Лехницким в работе "Теоретическое исследование напряжений в упругом анизотропном массиве вблизи подземной выработки эллиптического сечения" (Тр. ВНИМИ", сб. 45. Л., 1962). При этом показано, что для анизотропных (в отношении сложения) пород анизотропия упругих свойств невелика.

Анизотропия горных пород в отношении их прочностных свойств при действии сжимающих и касательных нагрузок освещена в статье Г. Н. Кузнецова и М. Н. Будько "Исследование предельных состояний хрупкого материала в различных условиях трехосного сжатия ("Тр. ВНИМИ", сб. 70. Л., 1968).

20. Горные породы обладают разнообразными и многочисленными механическими свойствами:

– деформационными, характеризующими вид деформаций породы (упругие, пластичные, квазипластичные, текучие) и зависимость величины этих деформаций от вида, величины, скорости приложения и длительности действия вызывающих их нагрузок;

– прочностными, характеризующими условия нагружения и предельные нагрузки (напряжения), вызывающие разрушение породы и полную или частичную потерю ею способности сопротивляться нагрузкам различного вида (сжатие, растяжение, сдвиг);

– специфическими показателями разрушаемости применительно к особенностям технологии и техники проходческих и добычных горных работ.

Механические свойства пород, помимо определяющего влияния их вещественного состава, тесно связаны с некоторыми физическими свойствами (объемный вес, влажность), а также с характеристиками строения (пористость, трещиноватость, анизотропия, неоднородность).

21. Результатом изучения механических свойств пород являются теории деформируемости и прочности, устанавливающие, более или менее приближенно, количественные критерии и закономерности связи деформаций и условий разрушения с видом, интенсивностью нагрузок и режимом нагружения породы. Имеющиеся теории деформируемости и прочности пород различны по глубине и разработанности: от эмпирической связи внешних факторов нагружения, деформирования и разрушения, до физической теории, связывающей эти внешние факторы с особенностями состава и строения пород. В связи с использованием при проектировании и ведении горных работ эти теории различаются мерой приближенности принятых аналитических выражений для оценок действительной зависимости деформирования и разрушения пород от нагрузок. Эта мера приближенности определяет степень точности показателей механических свойств пород, являющихся параметрами указанных аналитических выражений. Имеет также значение, насколько приближенность теории соответствует требуемой точности инженерных расчетов, использующих эту теорию.

22. На начальных этапах нагружения большинство горных пород упруго или в преобладающей мере упруго. Упругость пород изучалась в условиях одноосного сжатия и, в меньшей степени, изгиба.

Она мало изучена при действии сдвиговых, растягивающих и трехосносжимающих нагрузок. Связь упругих деформаций горных пород с нагрузками близка к линейной и приближенно описывается линейным законом Р. Гука с параметрами (для изотропных пород): модулем Юнга и коэффициентом Пуассона породы. Опытные данные сви-

детельствуют о сохранении значений этих показателей и самого закона Гука для трехосного сжатия. Для изотропных пород закономерность упругого деформирования, показывающая связь компонентов деформаций и напряжений [x], видна из выражений:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)\right]; \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)\tau_{xy}}{E};$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)\right]; \quad \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)\tau_{yz}}{E};$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)\right]; \quad \gamma_{xz} = \frac{2(1+\mu)\tau_{xz}}{E};$$

где σ_x, σ_y, σ_z – нормальные напряжения в направлениях координатных осей x, y, z (т. е. действующие, соответственно, в плоскостях yz, xz и xy); $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – нормальные относительные деформации в этих направлениях; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – касательные напряжения в плоскостях xy, yz, xz; $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ – относительные угловые деформации в этих плоскостях; E, μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Анизотропные породы, по С. Г. Лехницкому (см. п. 19), характеризуются, соответственно, двумя модулями Юнга и тремя коэффициентами Пуассона (ориентированными по главным направлениям анизотропии сложения породы).

Линейность закона упругого деформирования крепких разновидностей пород вплоть до нагрузок близких к пределу прочности позволяет широко использовать теорию упругости для решения многих задач механики горных пород.

23. В некоторых случаях наблюдаются отклонения упругих деформаций горных пород от линейного закона (рис. 2):

а. При весьма малых сжимающих нагрузках на пористые горные породы упругие деформации, сопровождающие закрытие пор, характеризуются более низким модулем упругости, чем при действии больших нагрузок после закрытия пор. Это явление можно объяснить тем, что при малых нагрузках в упругих деформациях породы участвуют местные значительные деформации неполного числа струк-

---

[x] Под нормальным напряжением понимается внутренняя сила, действующая на перпендикулярную к ее направлению площадку сечения тела и отнесенная по величине к единице площади этой площадки. Под касательным (сдвиговым) напряжением, соответственно, – внутренняя сила, действующая в плоскости указанной площадки. Под относительной нормальной или касательной деформацией понимают деформацию удлинения (укорочения) или сдвигового поворота тела, отнесенную к длине этого тела в рассматриваемом направлении.

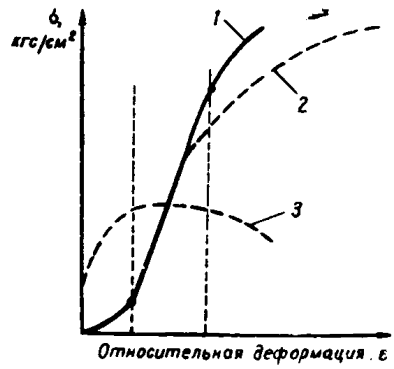


Рис. 2. Отклонения от закона линейности упругих деформаций:

1 – упругая деформация; 2 – полная деформация; 3 – модуль упругости

турных элементов в зоне пор, причем эти местные деформации относят ко всему объему породы.

б. При значительных нагрузках, обусловливающих в некоторых породах развитие неупругих деформаций одновременно с упругими, модуль упругости вновь несколько снижается, по-видимому, за счет потери несущей способности части структурных элементов породы и отнесения упругих деформаций уцелевших элементов ко всему объему породы. Нелинейность закона упругости учитывают, если это требуется, определяя и используя усредненные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона для характерных диапазонов нагрузки.

Причины и показатели нелинейной упругости горных пород нуждаются в дальнейшем изучении. Прежде всего, необходимо устанавливать меру точности приближенной оценки упругих свойств линейными параметрами закона Гука и определять степень надежности использования теории упругости для решения геомеханических задач.

24. При изучении влияния скорости нагружения на деформации и прочность пород, влияние этой скорости на развитие только упругих деформаций отдельно не исследовалось. Тем не менее, известно, что величина так называемого динамического модуля Юнга, определяющего распространение в породах упругих колебаний, иногда (особенно для пористых пород) существенно отличается от статического модуля.

25. Кроме упругих (восстанавливающихся при снятии нагрузки) деформаций, обычно при более высоких уровнях нагрузки, проявляются остаточные деформации. Остаточные деформации, не сопровождающиеся снижением несущей способности породы, называются пластическими; сопровождающиеся же развитием трещин и снижением сопротивления породы нагрузкам – квазипластическими. Многие горные породы, в частности угли, ископаемые соли, породы с сильно трещиноватым строением и увлажненные осадочные породы с глинистым цементом характеризуются значительным проявлением остаточных деформаций, иногда начиная уже с самых малых нагрузок. Такие породы по преимущественному проявлению этих деформаций считают пластичными. Учет пластичности пород необходим для оценок, расчетов и проектных решений вопросов, связанных, например, с пучением боков и почвы подготовительных и капитальных выработок и

их креплением, особенно в условиях больших глубин горных разработок.

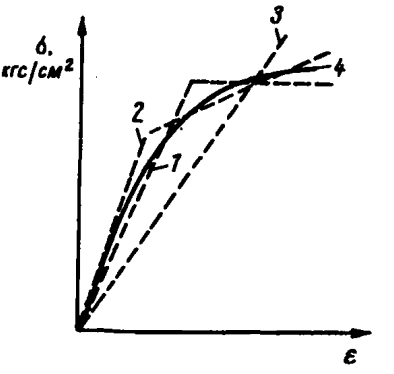


Рис. 3. Приближенные выражения закона пластического деформирования:

1 – "идеальная пластичность"; 2 – "пластичность с упрочнением"; 3 – "линейная пластичность"; 4 – фактическое деформирование

26. Пластические свойства пород приближенно выражают различными способами (рис. 3). Один вид приближения предполагает, что пластические деформации начинают развиваться только после того, как упругие достигнут предела упругости породы. Развитие пластических деформаций идет либо с постоянным сопротивлением ("идеальная пластичность"), либо с повышающимся ("упрочнение").

Согласно другому способу приближенного выражения, развитие пластических деформаций идет одновременно с упругими и характеризуется, аналогично упругим свойствам, модулем пластичности. В некоторых случаях (для определенных пород, видов и диапазонов нагрузки и уровней использования закона деформирования) модуль пластичности может считаться примерно постоянным, не зависящим от нагрузки; при этом становится возможным решать некоторые пластические задачи геомеханики, формально используя линейный аппарат теории упругости.

Рядом авторов (Л. А. Шрейнер, Л. И. Барон, Я. А. Бич, М. М. Протодьяконов и др.) для оценки пластических свойств или (обратная оценка) хрупкости горных пород предлагались также иные показатели. Экспериментальное изучение пластических свойств пород и практика их использования при проектировании горных работ еще недостаточны для оценки приемлемости этих предложений или разграничения области их применения (для разных типов пород или различных направлений использования).

27. Учет пластических деформаций пород при их пучении в обнажениях выработок в периоды, непосредственно следующие за их проходкой и подработкой, важен для проектирования режимов проходки и поддержания выработок. В связи с отсутствием инженерных методов геомеханического расчета пучения, пластичность породы в этих случаях оценивают весьма грубо. В качестве грубой инженерной оценки пластичности пород, выполняемой с точностью до ступени пятибалльной шкалы, применяется категория пластичности, предло-

женная Б. В. Матвеевым и др. в работе "Методические указания по упрощенным испытаниям и приближенной оценке пластических свойств горных пород" (Л., ВНИМИ, 1972). Эта категория условно определяется величиной остаточной деформации, возникающей в породе при нормированном способе нагружения нагрузкой нормированной величины.

28. Перечисленные пластические свойства горных пород изучались для условий одноосно-сжимающих нагрузок. Известно, что при действии трехосно-сжимающих нагрузок пластические свойства большинства пород возрастают: максимальные величины пластических деформаций достигают больших значений, а характер разрушения становится менее хрупким. Однако указанные свойства при трехосном сжатии еще очень мало изучены, количественные закономерности деформирования и оценочные показатели пластичности не установлены, несмотря на их важную роль в проектировании крепи горных выработок. Пластические свойства пород при растяжении совсем не изучены.

29. Для уточненных расчетов крепи горных выработок не меньшее значение чем пластичность имеет свойство пород сопротивляться нагрузкам и деформироваться после достижения предела прочности. Характер сопротивляемости пород после перехода предела прочности связан также и с динамическим эффектом их разрушения и последующего деформирования. Это важно для прогнозов опасности возникновения горных ударов и внезапных выбросов угля.

Деформации горных пород за пределом их прочности изучались при действии сжимающих (в основном одноосных) нагрузок. Сущность деформирования породы при этом состоит в появлении и прогрессирующем развитии системы трещин. Порода приобретает характер специфически связанной системы механически взаимодействующих друг с другом структурных элементов. Расположение этих элементов определяет характер их взаимодействия, неоднородную нагрузку и сложное (упругое и пластическое) деформирование каждого из них. В свою очередь, расположение этих элементов обусловлено, в основном, развитием их деформаций с образованием новых трещин или ростом имеющихся. Еще бо́льшую роль в деформировании такой системы играют упругие и пластические деформации взаимных связей структурных элементов, частичная или полная потеря этими связями связующей способности (от сплошности до раскрытия трещины) и смещение элементов друг относительно друга по несвязным трещинам.

Внешне такая квазипластическая деформация породы воспринимается как ее макродеформация, связанная с макронагружением.

30. Деформирование пород сжимающими нагрузками за пределом прочности более или менее быстро приводит к прогрессирующему спаду сопротивляемости (рис. 4). Замечено, что максимальная крутизна этого спада, как правило, находится в обратной связи с интенсивностью развития пластических деформаций до предела прочности: у пластических пород запредельный спад несущей способ-

ности более пологий, чем у хрупких. При деформировании на этапе запредельного спада сопротивляемости возникновение и развитие трещин в породе происходит особенно интенсивно. Порода разрыхляется, и за счет этого заметно увеличивается ее объем. Увеличение объема породы при деформировании за пределом прочности очень важно при расчетах давления пород на крепь подземных выработок.

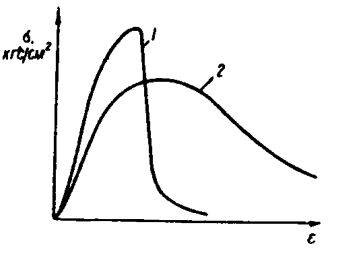


Рис. 4. Квазипластическое деформирование и остаточная несущая способность горных пород:

1 – хрупких, 2 – пластичных

Спад сопротивляемости породы при дальнейшем ее деформировании замедляется и деформирование вступает в фазу относительной стабилизации остаточной несущей способности. Величина последней для пластичных пород составляет существенную часть их предела прочности, для хрупких же пород она мала. При трехосном сжатии породы величина остаточной несущей способности находится в прямой зависимости от бокового давления. Остаточную несущую способность порода сохраняет (с малыми изменениями) на значительном диапазоне последующих деформаций. Трещинообразование при этом развивается слабо, а деформирование породы обусловливается, в основном, взаимными смещениями структурных элементов с трением и местным истиранием на контактах, но без существенного разрушения самих элементов. Объем породы при этом почти не изменяется Учет показателей остаточной прочности и соответствующего диапазона квазипластических деформаций при расчете крепи выработок открывает дополнительные резервы ее работоспособности.

31. Закономерности запредельного деформирования пород очень мало изучены, оценочные показатели квазипластичности еще не установлены, а методы их определения пока трудно осуществимы. Не разработаны и методы инженерного расчета устойчивости горных выработок и элементов систем разработки, а также оценки удароопасности пород с учетом квазипластичности. Поэтому определение квазипластических свойств пород пока не включено в состав разведочных и изыскательских работ и выполняется лишь в поисковых целях надлежаще оснащенными исследовательскими организациями.

32. Способность горных пород к деформированию и разрушению во времени характеризуется их реологическими свойствами. При ведении горных работ эта способность реализуется, например, в виде пучения почвы и боков выработок в зонах стационарного опорного давления.

Реологические свойства горных пород изучались главным образом в процессах ползучести при одноосном сжатии, при изгибе, а

также, в меньшей мере, – и при действии трехосно-сжимающих нагрузок. Кроме ползучести (процесса развития деформаций породы при действии постоянной во времени нагрузки) проводились единичные исследования релаксации (процесса изменения напряженного состояния породы в условиях постоянной во времени заданной деформации), а также смешанных процессов взаимосвязанного развития во времени напряжений и деформаций, в том числе нагружения с задаваемыми постоянными скоростями деформирования.

Процессы ползучести и релаксации, возникающие в массиве горных пород в зонах горного давления, оказывают существенное влияние на характер распределения напряжений в этих зонах, а следовательно, и на результаты решения задач управления горным давлением и сдвижением пород.

33. Рост деформаций ползучести при действии неизменной нагрузки происходит (рис. 5) замедленно, с приближением либо к постоянному значению деформаций, либо к постоянной величине скорости деформирования, находящихся в прямой зависимости от величины нагрузки. Однако при достаточно большой нагрузке, на определенном этапе ползучести замедление роста деформаций сменяется его ускорением, завершающимся разрушением породы.

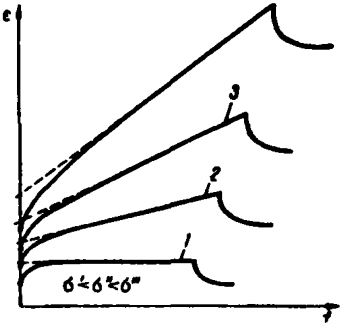


Рис. 5. Развитие во времени деформации ползучести горной породы при неизменных уровнях нагружающего напряжения:
1 – σ', 2 – σ'', 3 – σ''' ($\sigma' < \sigma'' < \sigma'''$)

Для количественного описания закономерности роста деформаций ползучести применяют два способа аппроксимации. Первый из них – приближенное представление закономерности структурными феноменологическими моделями, сложенными из сопряженных друг с другом упругих, вязких и предельно-напряженных элементов (рис. 6). Оценочными показателями ползучести в этом случае являются коэффициенты вязкости, модули Юнга и пределы пластичности. Пока они почти не применяются в инженерных расчетах, связанных с проектированием и ведением горных работ. Второй способ, предложенный В. Вольтерра и развитый Ж. С. Ержановым в работе "Теория ползучести горных пород и ее приложения" (г. Фрунзе, Изд-во АН Каз. ССР, 1964), основан на зависимости, представленной выражением линейной наследственности деформаций ползучести со степенным интегральным ядром:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E}\left[\sigma(t) + \int_0^t \delta(t-\tau)^{-\alpha}\sigma(\tau)\right] d\tau.$$

Оценочными показателями ползучести породы при этом являются начальный модуль пропорциональности (линейности) E и два коэффициента α и δ. характеризующие изменение модуля во времени. Аппроксимация ползучести законом линейной наследственности получила более широкое применение, так как при этом для расчетов геомеханических задач можно использовать математический аппарат линейной теории упругости. Однако такие расчеты еще не развиты до уровня инженерных. Следует заметить также, что опытные данные Ю. М. Карташова в работе "Методическое указание по лабораторному испытанию пластических свойств горных пород" (Л., ВНИМИ, 1972) свидетельствуют об изменениях объема пород в процессе ползучести, что не согласуется с положениями линейной наследственности, хотя для многих практических задач мера этого несогласия может считаться и несущественной.

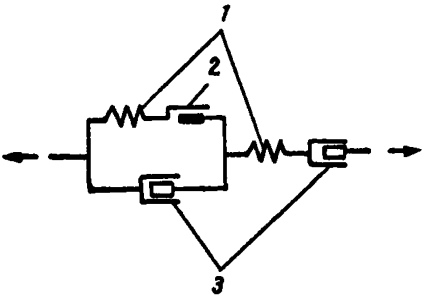


Рис. 6. Схематическое представление показателей ползучести структурной моделью связи элементов:

1 – упругости, 2 – предельной несущей способности, 3 – вязкости

34. Необходимость в оценке способности пород к ползучести часто возникает в случаях поддержания выработок в зонах стационарного опорного давления, где эта способность проявляется в более или менее интенсивном пучении почвы и боков выработки. Учитывая отсутствие простых инженерных методов расчета и прогнозирования интенсивности пучения, оценка способности пород к ползучести при этом необходима лишь в весьма грубой мере. В качестве такой грубой оценки (с точностью до ступени пятибалльной шкалы) применяют предложенную Б. В. Матвеевым и др. в работе "Методические указания по упрощенным испытаниям и приближенной оценке пластических свойств горных пород" (Л., ВНИМИ, 1972) категорию текучести. Эту категорию определяют по величине деформации, развивающейся в образце породы в течение нормированного интервала времени действия нагрузки нормированной величины и при нормированном способе нагружения.

35. К прочностным свойствам горных пород достаточно широко применимы положения теории предельного равновесия, в частности теории прочности О. Мора. Наиболее содержательной в этом отношении является работа Г. Л. Фисенко "Предельные состояния горных пород вокруг выработок", (М., Недра, 1976). Согласно этой теории прочности разрушение пород, т. е. достижение ими предела несущей способности, носит сдвиговый характер, причем сдвиг раз-

вивается по площадкам, на которых сочетания касательных и сжимающих компонентов напряжения достигают критических значений, определяемых условием:

$$\tau \geq \varphi(\sigma).$$

Для некоторых слабосвязных горных пород это условие имеет вид линейной зависимости:

$$\tau = C + f\sigma,$$

где прочностными показателями породы являются: C – коэффициент сцепления и f – коэффициент внутреннего трения.

У большинства скальных пород указанная зависимость нелинейна, а потому показатели C и f не являются постоянными, но сами зависят от величины напряженного состояния.

Прочностная характеристика породы в отношении действия сложных напряженных состояний определяется предельными сочетаниями компонентов напряжений. При графическом представлении этих состояний кругами Мора в координатах нормальных и касательных напряжений, предельно-прочные напряженные состояния породы изображаются (рис. 7) совокупностью соответствующих предельных кругов. Огибающая этих кругов, называемая обычно паспортом прочности породы, ограничивает в координатном поле область прочных напряженных состояний. Уравнение этой огибающей совпадает с приведенным выше выражением условия сдвигового разрушения породы.

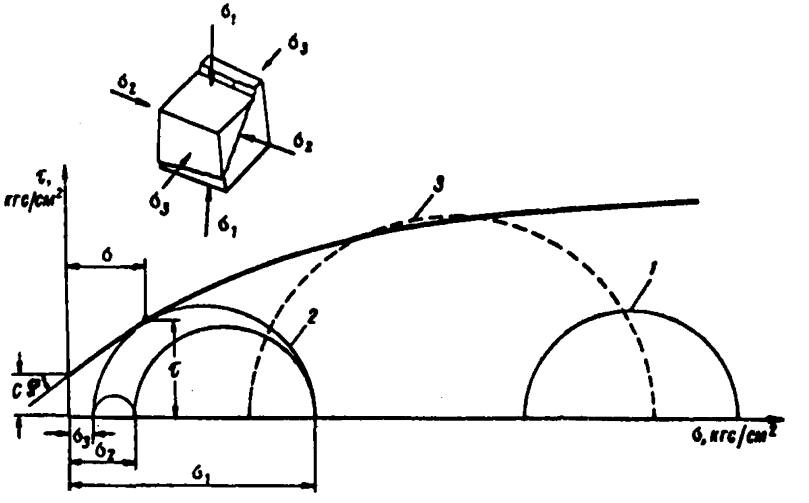


Рис. 7. Паспорт прочности горной породы с кругами Мора для напряженных состояний:

1 – прочных, 2 – предельных, 3 – непрочных

В некоторых случаях более удобно графически представлять условие предельных напряженных состояний породы не в осях сдвигающих и нормальных компонентов напряжений на площадке сдвига, а в осях главных нормальных напряжений: максимального и минимального (рис. 8).

36. При численном представлении прочностных свойств горных пород пользуются, кроме предела прочности при одноосном сжатии, коэффициентами сцепления и внутреннего трения (арктангенс коэффициента внутреннего трения именуется углом внутреннего трения ρ). Как указано, коэффициенты сцепления и внутреннего трения являются постоянными величинами лишь для некоторых слабых пород, паспорт прочности которых, соответственно, прямолинеен. При этом угол наклона огибающей к оси нормальных напряжений является углом внутреннего трения, а отрезок, отсекаемый ею на оси касательных напряжений – коэффициентом сцепления. В случаях непрямолинейного очертания огибающей пользуются средними значениями упомянутых показателей для ее представительных участков.

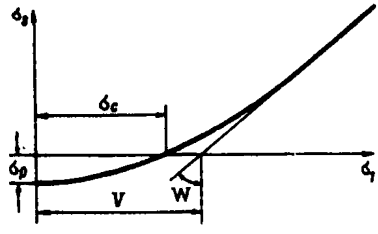


Рис. 8. Паспорт прочности в осях главных напряжений

При прямолинейном очертании паспорта прочности (или его участков) в осях главных напряжений показатели сцепления и внутреннего трения вычисляются по формулам:

$$\sin\rho = \frac{W-1}{W+1}; \quad C = \frac{V}{2\sqrt{W}},$$

где V – отрезок, отсекаемый паспортом прочности (или продолжением его прямолинейного участка) на оси максимального главного напряжения, а W – тангенс угла наклона паспорта (участка) к оси минимального главного напряжения.

М. М. Протодьяконовым в работе "Обобщенное уравнение к предельным кругам напряжений Мора" (в сборнике "Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением". М.; Изд-во АН СССР, 1962) на основе обобщения опытных данных предложено приближенное аналитическое выражение для паспортов прочности горных пород:

$$\tau = \tau_{max}\left[\frac{(\sigma+\sigma_p)^2}{a^2+(\sigma+\sigma_p)^2}\right]^{3/8},$$

где σ, τ – значения текущих координат (нормальные и касательные напряжения); τ_{max}, a – величины, зависящие от хрупко-пластической характеристики породы, выражаемой отношением значений ее прочности при растяжении и при сжатии.

37. Теория прочности Мора не учитывает случаев разрушения пород от отрыва, т. е. в результате действия растягивающих напряжений. Поэтому, для полноты феноменологического представления паспорта прочности, его формально дополняют кругом прочности породы при одноосном растяжении. Прочность пород при действии сложных нагрузок с растягивающими компонентами пока не изучена экспериментально даже на феноменологическом уровне, несмотря на высокую актуальность этого вопроса для горного дела.

Г. Н. Кузнецовым в упомянутой работе обобщены использование паспортов прочности и применимость теории прочности Мора к анизотропно ослабленным породам, причем учтено их ослабление системами пространственно ориентированных параллельных структурных дефектов типа расслоений, межпластовых контактов, систем плоских трещин, отдельности и т. п. Для этого на график паспорта прочности наносят дополнительные линии предельных состояний каждой из имеющихся плоских систем ослабления. При этом открывается возможность проводить важные расчеты устойчивости обнажений массива горных пород с учетом условий обычного сдвигового разрушения породы, а также достижения так называемого специального предельного равновесия породы, при возможном скольжении ее слоев вдоль плоскостей ослабления.

38. В соответствии с теорией прочности Мора, разрушение одноосно сжимаемой породы происходит путем сдвига по плоскости (или системе плоскостей) наклоненной к направлению сжатия так, что сдвигающий и сжимающий компоненты напряжения на этой плоскости отвечают условию предельного равновесия. Такой вид разрушения обычно наблюдают при сжатии призматических или цилиндрических образцов между плоскими давильными плитами пресса.

Установлено, однако, что при строгом обеспечении условий однородного и одноосного сжатия породы разрушаются не в соответствии с теорией Мора, а в результате разрыва по плоскостям, ориентированным вдоль направления действия сжимающего напряжения. Для объяснения этого явления Дж. Грамберг (1970 г.) предложил учитывать наличие в породе дефектов сложения типа местных ослаблений (микротрещин, пор), около которых в общем поле одноосного сжатия возникают концентрации напряжений с растягивающими компонентами, направленными перпендикулярно нагрузке.

Обычно наблюдаемый сдвиговой характер разрушения при сжатии проявляется при компенсации этих растягивающих напряжений небольшой добавочной сжимающей нагрузкой, приложенной в направлении действия этих напряжений и поперечной по отношению к основной сжимающей нагрузке. Такая компенсация получается, например, при одноосном сжатии породных образцов между плоскими шероховатыми давильными плитами, причем роль добавочной поперечно-сжимающей нагрузки играет сила трения торцов образца о плиты.

Условия возникновения сдвигового характера разрушения при наличии хотя бы небольших компонентов нагрузки бокового сжатия,

добавочно к основному одноосно сжимающему компоненту, заслуживают более подробного изучения. С другой стороны, необходимо изучать и роль концентраций напряжений у местных структурных ослаблений в случаях развитого сдвигового характера разрушения при действии трехосно сжимающих нагрузок.

39. Вопросы прочности пород включают и так называемую длительную прочность, характеризующую условия разрушения породы в ходе развития процесса ползучести. Длительная прочность оценивается зависимостью разрушающей породу нагрузки (напряжения) от продолжительности ее действия, достаточной для достижения разрушения. В более узком смысле, под длительной прочностью понимают прочность породы в условиях весьма длительного действия нагрузки. Знание этого параметра важно для оценки устойчивости длительно эксплуатируемых обнажений породного массива: камер, целиков, откосов карьеров и т. п.

Сущность и закономерности проявления длительной прочности пород еще мало изучены. Явления длительной прочности тесно связаны с механизмом деформирования пород длительно действующими нагрузками и с происходящей при этом реологической перестройкой структуры породы и разрушением отдельных структурных элементов. В случаях замедления этой перестройки структура породы становится устойчивой и ползучесть затухает, при прогрессировании же перестройки число разрушающихся элементов ускоренно возрастает, что постепенно приводит к разрушению структуры и потере сопротивляемости породы. Ю. М. Карташовым и А. А. Репко установлено, что деформации породы, нагруженной выше предела длительной прочности, носят характер разуплотнения породы с увеличением ее объема.

Исследованиями доказано, что для горных пород существует нижняя граница разрушающих напряжений - предел длительной прочности. Напряжения, не превысившие эту границу, практически никогда не разрушат породу. Проявления длительной прочности установлены при длительном действии как для одноосных, так и для трехосных нагрузок.

Ввиду недостаточной изученности часто для оценки длительной прочности породы прибегают к приближенному обобщению скудных опытных данных. При этом величину обычной прочности занижают коэффициентом, учитывающим длительность разрушения, полученным в результате этого обобщения.

40. Разрушение пород в результате действия растягивающих напряжений существенно отличается от описанного в пп. 35–39 сдвигового разрушения. Возникающие при растяжении, сначала местные (в местах случайных ослаблений неоднородного материала породы), трещины отрыва обычно являются источником дополнительных концентраций напряжений у краев трещин, с их последующим быстрым сквозным прорастанием и полной потерей породой несущей способности в отношении растягивающей нагрузки. Лишь в условиях резко неоднородных напряженных состояний растяжения (например, в неко-

торых случаях изгиба) прорастание трещин отрыва может локализоваться и завершиться образованием механически устойчивых систем обломков – породных блоков с сохранением общей для этой системы устойчивости и остаточной несущей способности.

Малая, по сравнению со сжатием и сдвигом, прочность пород при растяжении явилась причиной отставания исследований этого свойства: погрешности эксперимента, возникающие при растяжении образцов горных пород, часто соизмеримы по величине с изучаемым показателем растяжения.

Принято считать, хотя это и не проверено для сложных напряженных состояний, что в отношении растяжения действует так называемая первая теория прочности (Галилея–Ренкина), согласно которой условием разрушения от растяжения является предельное значение растягивающего компонента напряжения.

Следует отметить, что, согласно исследованиям Г. В. Михеева, на сопротивление горных пород растяжению сильно влияет неоднородность их сложения. По–видимому, нужно различать сопротивляемость породы разрыву по принудительно задаваемому сечению от сопротивляемости по слабейшему из геометрически эквивалентных сечений. В первом случае, например, при растяжении породного стержня с "шейкой", сопротивление последней может быть большим (при сложении сечения преимущественно прочными элементами) или малым (при сложении преимущественно слабыми), что при повторных испытаниях дает некоторую среднюю, а при единичном – вероятную оценку. Во втором случае, например, при растяжении цилиндрического стержня, разрыв достигается по слабейшему из многих равных одинаково напряженных поперечных сечений стержня, сложенному, в отличие от остальных, преимущественно слабыми элементами. Все результаты испытания серии подобных цилиндрических образцов будут определяться минимальными значениями прочности структурно–ослабленных сечений.

41. Малая сопротивляемость отрыву является частой причиной разрушения массива горных пород в разнообразных горнотехнических условиях. Это особенно характерно для мест концентрации напряжений: у остроугольных участков и неровностей поверхности, у внутренних микродефектов структуры породы, у поверхности породы при действии на ее неровности сосредоточенных давлений. Сопротивляемость пород растяжению учитывается при оценках устойчивости кровли подземных выработок, прогибающейся при больших пролетах и отрывающейся при зависании.

С развитием геомеханических расчетов в горном деле сопротивляемость пород растяжению приобретает возрастающее значение.

42. Важной попыткой учесть в единой физико–механической теории разрушаемость пород как от сдвига, так и от разрыва является недавно разработанная (и ныне развиваемая) теория прочности А. Н. Ставрогина, изложенная в работе "Прочность и деформация горных пород" (М., Изд–во ИФЗ АН СССР, 1968). Согласно этой теории разрывные и сдвиговые микроразрушения нагруженной породы

реализуются совместно, в сочетаниях, определяемых видом напряженного состояния породы, причем сопряжение микроразрушений и прорастание микротрещин определяется неоднородностью строения породы и регламентируется статистическим отбором единичных микроразрушений и кинетическими закономерностями.

Теория прочности А. Н. Ставрогина позволяет подойти к оценке явлений, связанных с развитием разрушений горных пород во времени, в частности – к определению влияния на прочность скорости нагружения и длительности действия нагрузок. При этом учитываются неоднородность и ослабленность горных пород. Однако эта теория еще не в полной мере освоена практикой геомеханики, проектирования и ведения горных работ, поэтому применяемые ею показатели прочности пород пока практически не используются.

43. В вопросах прочности пород важнейшее значение для горного дела имеет оценка влияния на прочность породы различного порядка нарушений ее однородности (трещин). Изучением этой оценки занимались Ю. И. Туринцев, С. Т. Кузнецов и др. Важные результаты обобщены в работе Г. Л. Фисенко "Методы количественной оценки структурных ослаблений в связи с анализом их устойчивости" (Материалы 1У Всесоюзной конференции "Современные проблемы механики горных пород" (Л., Наука, 1972). Ослабление пород дефектами строения оценивается коэффициентами структурного ослабления, находящимися в зависимости от геометрических соотношений размеров структурных дефектов и размеров массива, прочность которого оценивается. Таким образом, вопрос оценки структурной ослабленности близок к вопросу учета проявлений масштабного эффекта, однако изучен он пока недостаточно.

В связи с тем, что для различных горнотехнических задач оценивается прочность массива различных размеров, и при действии различных видов напряженного состояния, для этих условий установлены различные коэффициенты структурного ослабления. Данные о величинах этих коэффициентов приведены, например, в работе К. А. Ардашева и др. "Общие методические положения комплексного исследования проблем горной геомеханики" (Тр. ВНИМИ", сб. 81. Л., 1970).

44. Для рационального выбора конструкции добычных и проходческих механизмов и технологических режимов разрушения угля и пород, а также для технического нормирования трудоемкости, расхода материалов и запасных частей при ведении этих работ, наряду с перечисленными теориями и показателями механических свойств пород, применяют функциональные теории и технологические показатели свойств пород: буримости, взрываемости, дробимости, абразивности и др. Важные работы по изучению этих свойств и установлению показателей выполнены ИГД им. А. А. Скочинского, ШахтНИУИ им. А. М. Терпигорева, КузНИУИ.

III. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

45. Обилие разнообразных горных пород на осваиваемых и разрабатываемых месторождениях, изменчивость этих пород по зонам залегания обусловливают потребность народного хозяйства в большом объеме информации об их механических свойствах.

В определенной мере эта потребность удовлетворяется за счет справочных источников: публикаций и фондовых материалов поэтапного геологического изучения полей шахт. В связи с использованием этих источников очень актуален вопрос о представительности их данных и допустимости распространения на проектируемый или разрабатываемый горный объект. Именно этим и обусловлено поэтапное углубление и детализация геологического изучения полей шахт предварительной, детальной разведкой, инженерными изысканиями, работами геологической службы горного предприятия. Для малоизученных, но аналогичных достаточно изученным, участков использование имеющихся данных допустимо лишь на ранних этапах изучения, притом с учетом представительности и надежности установленной аналогии этих участков. В остальных случаях породы опробуют на механические свойства: отбирают представительные пробы и подвергают механическим испытаниям изготовленные из них породные образцы. Эти работы составляют значительную долю производственной деятельности отраслевых геологических и изыскательских организаций.

46. Опробование горных пород на механические свойства производится в лабораториях геологических и изыскательских организаций. Следует отметить, что значительная часть организаций нуждается в дополнительном оснащении лабораторным оборудованием и доукомплектовании штатов. Ряд организаций, в том числе почти вся геологическая служба эксплуатирующихся угольных предприятий, не располагает лабораторной базой и пользуется для опробования горных пород на механические свойства услугами сторонних организаций.

Учитывая указанные трудности, необходимо сделать механические испытания доступными.

47. Для проведения механических испытаний пород существуют различные полевые, лабораторные и натурные методы и средства испытаний. Большая или меньшая пригодность этих методов к использованию также определяется в конкретных случаях критериями оптимальной представительности, достаточной надежности, а также максимальной доступности и экономичности испытаний.

48. Представительность методов механических испытаний предусматривает наиболее близкое качественное соответствие механических свойств, определяемых при испытании, свойствам изучаемой породы в натурных условиях ведения горных работ, для которых предполагается использовать результаты испытаний.

Представительность испытаний обеспечивается как представительностью собственно методики испытаний, так и представительностью испытываемой породы, отобранных проб и подготовленных к испытаниям образцов.

49. Для обеспечения представительности породы, ее пробы и испытываемых образцов в "Требованиях по определению механических свойств горных пород при геологическом изучении полей шахт Минуглепрома СССР" дан ряд указаний по выбору мест отбора, размерам и количеству отбираемых кусков породы, приемам отбора, хранения, транспортировки и обработки проб.

Порода пробы, предназначенной для испытаний, должна быть по своему составу, строению и состоянию типичной для горногеологических условий залегания разрабатываемого массива и горнотехнических условий ведения горных работ. Место отбора породной пробы предусматривается типичным в отношении использования результатов испытаний, а состав, строение и влажность отбираемой пробы - в отношении места ее отбора. Технология отбора, хранения и транспортировки проб, а также изготовления образцов должна обеспечить сохранность природного состава, строения и влажности породы; при этом необходимо исключить возможность механического нарушения целостности породы от ударов и сосредоточенных нагрузок, а естественная влажность породы должна консервироваться. Образцы для испытаний, изготовляемые из пробы, должны быть типичными по своему строению, состоянию и влажности в отношении породы, слагающей пробу, в частности абсолютные размеры образцов должны быть представительными в отношении степени природной неоднородности породы.

50. В целях обеспечения представительности методики испытаний вид деформаций и напряженного состояния, режим нагружения и характер разрушения испытываемой породы приближают к натурным условиям нагружения, деформирования и разрушения при ведении соответствующих горных работ. Следует отметить, что наибольшая представительность в этом отношении достигается максимальной имитацией производственных и геологических условий путем их моделирования или даже проведения непосредственно на месте, в выработке, опытных горных работ. Выбранные блоки породного массива, представительно деформирующиеся при опытных горных работах, оснащаются измерительными устройствами, позволяющими контролировать нагружение, деформации и разрушение блока. Краткий обзор таких методов дан в работе Б. В. Матвеева и др. "Методическое пособие по натурным методам механических испытаний горных пород" (Л., ВНИМИ, 1969). Показатели механических свойств пород по результатам опытных горных работ определяют обратным расчетом механизма наблюдаемых сдвижений, деформаций и давлений пород. Подобные методы при всей их представительности, весьма трудоемки, а их организация зачастую малодоступна.

При этом высокая представительность определяемых показателей достигается за счет потери их универсальности и крайнего сужения области практической применимости этих показателей, которые в результате оказываются узко-функциональными.

51. Представительность (в отношении вида нагрузок, деформаций и режимов нагружения или деформирования) методов и результатов лабораторных или полевых испытаний механических свойств пород на образцах обычно определяется типичностью проявления при испытании свойства породы, оцениваемого определяемым показателем с максимальным исключением сопутствующих искажений изучаемых напряжений и деформаций, вызванных особенностями методики и техники испытаний. Выполнение этих требований достигается следующими мерами:

- форма образцов и контактные условия приложения к ним испытательных нагрузок должны обеспечивать в образце, или в его расчетной части, напряженное состояние требуемого вида; важнейшими условиями являются необходимое центрирование нагрузок, с помощью соответствующих устройств, а также обеспечение нужного распределения нагрузки по поверхности прилегания нагрузочного устройства к образцу;

- диапазоны интенсивности деформаций и нагрузок, сообщаемых образцам, должны быть близки к тем же величинам в условиях ведения горных работ;

- режим испытаний образцов, включающий последовательность и скорости нагружения, деформирования и разрушения образцов должен способствовать выявлению определяемых свойств породы и быть близким к характеру нагружения, деформирования и разрушения породы в условиях ведения горных работ.

Если какие-либо из перечисленных требований не выполнены или выполнены недостаточно, то результаты испытаний должны сопровождаться критической оценкой меры их представительности и приемлемости.

52. Надежность методов механических испытаний пород является мерой количественного соответствия определяемого показателя его назначению (в расчетах и прикидках при проектировании и ведении горных работ).

Математическое понятие надежности (обеспеченности) связано с величиной доверительной вероятности определения показателя (и коэффициента вариации этого показателя) по ограниченной выборке усредняемых статистических повторений единичных объектов или единичных событий. Применение математической статистики к испытанию горных пород оправдывается вероятностным характером параметров неоднородности сложения и свойств пород.

Применимости математической статистики к вопросам строения и свойств горных пород посвящена важная работа К. В. Руппенейта

и др. "Вероятностные методы оценки прочности и деформируемости горных пород" (М., Стройиздат, 1964).

Прочность горной породы в разных точках ее залегания неодинакова вследствие случайного различия сложения и состава породы вблизи этих точек. Поэтому оценка прочности (или других свойств) породы дается не только средней величиной показателя ее прочности, но и величиной вариации прочности различных участков массива породы около этой средней величины. Разумеется, при этом предполагается, что неоднородность рассматриваемого массива породы рассеяна по всему его объему без системы, беспорядочно, а потому носит случайный характер. Закономерная же изменчивость состава и свойств породы, например, фациальная – по простиранию слоев, носит систематический характер и не включается в анализ случайной изменчивости.

53. Надежность определения показателей механических свойств неоднородных по составу и сложению пород предусматривает нормативы методов испытаний, связанные с вероятностным характером этой неоднородности.

а. Для усреднения напряженного состояния и деформаций испытываемых образцов их абсолютные размеры принимаются достаточно большими по сравнению со средними размерами структурных элементов породы. В работе К. В. Руппенейта и др. "Введение в механику горных пород" (М., Госгортехиздат, 1960) соотношение этих размеров, с учетом законов статистики, рекомендуется не менее, чем 7-15.

б. В целях определения как средней величины определяемого показателя, так и коэффициента его вариации в месте опробования, повторным испытаниям подвергают достаточное число образцов, изготовленных из отобранной пробы породы; это количество, согласно работе Б. В. Матвеева "О необходимом числе образцов для испытаний свойств горных пород" ("Тр. ВНИМИ", сб. 60. Л., 1966), принимается, в зависимости от уровня надежности метода испытаний, согласно табл. 1.

Таблица 1

Число образцов	2	3	4	5	6	
Надежность	0,610	0,770	0,860	0,910	0,940	
Число образцов	7	8	10	12	14	16
Надежность	0,960	0,975	0,990	0,994	0,997	0,998

в. Для каждого определяемого показателя механических свойств устанавливают его среднее значение и коэффициент вариации по формулам:

$$x_{ср} \cong \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i; \quad v \cong \frac{1}{x_{ср}}\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{ср})^2},$$

где x – определяемый показатель, i – номер образца, n – общее число образцов испытываемой породы.

Для случаев определения показателей механических свойств с низким уровнем надежности (грубые оценки) оцениваемый показатель определяют по результатам испытания 2–3 образцов без использования указанного статистического приема: в качестве оценочного значения принимают результаты, различающиеся между собой в пределах 25–30%.

54. Надежность испытаний определяется числом испытываемых образцов и их размерами с учетом лишь фактора неоднородности породы. При оценке общей величины надежности к полученному значению вариации должны быть добавлены случайные погрешности собственно методики и техники испытаний, систематические же погрешности должны учитываться для корректировки среднего значения показателя.

Погрешности методики (и техники) испытаний следующие:

а. Систематические, определяемые мерой неполного соответствия принятого упрощенного представления механизма нагружения и деформирования образца фактически более сложным его напряжениям и деформациям. Например, при сжатии образца между плитами пресса (рис. 9,а) напряжение устанавливают простым отнесением нагрузки к площади поперечного сечения, пренебрегая фактической сложностью напряжений и деформаций вследствие влияния трения его

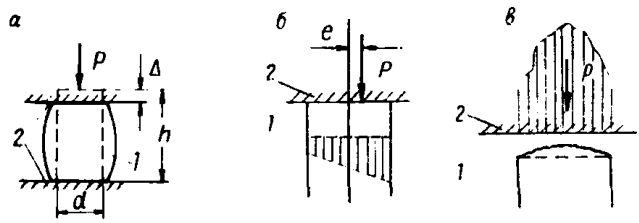


Рис. 9. Погрешности испытаний, зависящие от способа приложения нагрузки:

а – искажение расчетных напряженного и деформированного состояний, вызванное трением нагружаемой и нагружающей поверхностей; $\sigma \cong \frac{4P}{\pi d^2}$; $\varepsilon \cong \frac{\Delta}{h}$; б – внецентренность сжатия при некачественной центрировке нагрузки; в – неравномерность нагрузки при несоответствии геометрии нагружаемой и нагружающей поверхностей; 1 – образец; 2 – давильные плиты

торцов о плиты. Такие же систематические погрешности возникают и при определении продольной относительной деформации этого образца отнесением сближения плит к расстоянию между ними, пренебрегая значительными местными деформациями смятия образца на контактах с плитами. В случаях, когда источники указанных погрешностей не контролируются четкими нормативами, эти погрешности, кроме систематической имеют и случайную составляющую.

б. Систематические и случайные погрешности, вызванные неполнотой соответствия фактического вида прикладываемой к образцу внешней нагрузки принятой схеме ее приложения, например, вследствие эксцентренности нагрузки при несовершенной системе ее центрирования (рис. 9,б), а также при возникновении неоднородности нагружения контакта вследствие некачественной пригонки контактирующих поверхностей (рис. 9,в).

в. Систематические и случайные погрешности, определяющиеся взаимодействием элементов нагружаемой механической системы (источник нагрузки, образец, силоизмеритель, станина, воспринимающая реактивное усилие), в том числе погрешности от развития собственных деформаций элементов этой системы (упругость нагрузочного устройства, податливость силоизмерителя и т. п.) с учетом различного вида механической связи этой системы (рис. 10), а также погрешности от трения в кинематических сочленениях (направляющие, шарниры) системы (рис. 11).

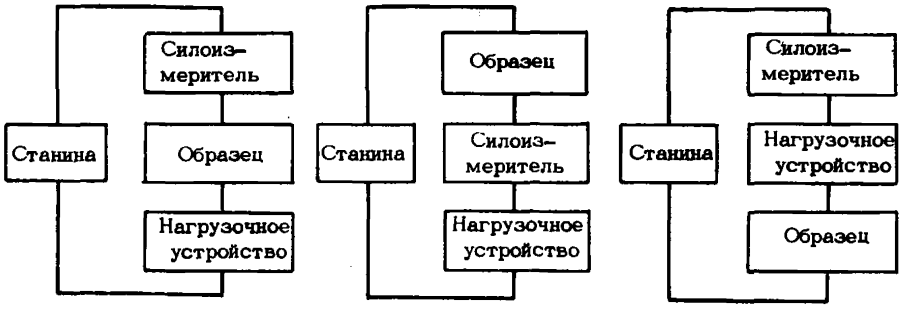


Рис. 10. Схемы взаимодействия механических элементов установки для испытания образца горной породы

г. Носящие обычно случайный характер метрологические погрешности силоизмерительных и деформометрических устройств, соответствующие метрологическому классу этих устройств.

55. Часть перечисленных погрешностей поддается определению путем специального количественного исследования их указанных источников. Однако эти исследования еще далеки от завершения, не доведены до широких обобщений, и мало используются. Не завершена также разработка статистической теории надежности методов определения механических свойств пород.

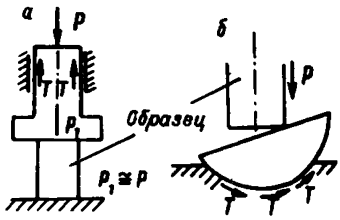


Рис. 11. Погрешности испытаний вследствие преодоления трения в сопряжениях элементов нагрузочного устройства:

а – в центрирующей направляющей; б – в шарнире центрирующей пяты; Т – силы трения

Погрешности методики и техники механических испытаний горных пород пока устанавливаются в основном эмпирически – путем проведения сопоставительных испытаний с определением одноименных показателей свойств пород различными сравниваемыми методами. Для такого сопоставления важно располагать методами, служащими эталоном сравнения. Понятно, что эталонные методы разработаны (и разрабатываются) в расчете на максимальное устранение всех перечисленных погрешностей; к ним предъявляется требование метрологического качества – прецизионности, хотя обычно это значительно усложняет их выполнение.

56. В соответствии с уровнем надежности обычно различают следующие методы механических испытаний горных пород:

– прецизионные, характеризующиеся надежностью свыше 95–97% и применяемые в качестве эталонных для сопоставительной поверки методов широкого применения, для определения их погрешностей и установления поправок;

– нормальной, порядка 80–90%, надежности, рассчитанные на массовое производственное применение;

– упрощенные с высокой степенью доступности и с надежностью около 75–85%, достаточной для приближенных инженерных решений горнотехнических задач;

– грубые, обеспечивающие надежность получаемых оценок свойств пород порядка 60–75% и применяемые для примерных прикидок и ориентировочных суждений о свойствах пород и горнотехнических условиях их залегания.

57. В работе Б. В. Матвеева "К выбору классификационной шкалы для количественной оценки свойств горных пород" ("Тр. ВНИМИ", сб. 60. Л., 1966) показано, что с точностью и надежностью оценок механических свойств пород непосредственно связаны условия классифицирования пород по механическим свойствам и рациональный выбор классификационных шкал. Ограничивающие каждый класс предельные значения классифицируемого показателя устанавливаются в соответствии с мерой допустимой точности способов его использования (например, в инженерных расчетах). С другой стороны, точность определения этого показателя при стандартном опробовании породы на механические свойства должна быть не менее, чем соответствующая крупности градаций его классификационной шкалы.

58. Доступность методов определения механических свойств горных пород определяется следующими факторами:

– прямыми расходами денежных средств на проведение испытаний и их подготовку (извлечение или отбор проб пород, изготовление из них породных образцов установленного качества), в том числе, на оплату исполнителей с учетом их квалификации; с этим прямо связана трудоемкость испытаний и их производительность:

– расходами на организационные мероприятия, не учитываемые методикой и технологией испытаний, но необходимые для их осуществления в реальной обстановке геологической разведки, инженерных изысканий, работы горного предприятия;

– расходами на капитальное оборудование лаборатории или участка натурных испытаний и мест по отбору породных проб и изготовлению из них образцов для испытаний или на производство соответствующих операций по подготовке натурных испытаний, а также затраты на обучение исполнителей;

– дефицитностью оборудования для испытаний и нехваткой исполнителей надлежащей квалификации.

Во многих случаях доступность методов механических испытаний ограничивается невозможностью применения иных, более предпочтительных методов. Например, для слабых структурно нарушенных (трещиноватых и расслаивающихся) горных пород, в том числе для некоторых аргиллитов и углей, зачастую невозможно извлечь представительную пробу и изготовить образцы нужных размеров и формы, предусматриваемых многими распространенными методами испытаний, которые в этих случаях оказываются недоступными.

59. По доступности методы механических испытаний горных пород можно подразделить на следующие (нерезко обособленные) группы:

а. Натурные, а также методы, воссоздающие (моделирующие) в лаборатории природные и промышленные условия проявления определяемых механических свойств. Выполнение их требует сложной организации, применения сложных и громоздких устройств для натурных испытаний и стендов для моделирования в лаборатории. Трудоемкость таких испытаний велика.

б. Лабораторные методы испытаний породных образцов с использованием стационарных средств для изготовления породных образцов, типовых испытательных машин со специальными нагрузочными приспособлениями и типовых измерительных приборов.

в. Упрощенные экспресс-методы лабораторных и полевых испытаний породных кусков произвольной формы, предусматривающие применение портативной испытательной аппаратуры на малые нагрузки с несложным, обычно ручным управлением.

Определение механических свойств горных пород в некоторых случаях возможно и без механических испытаний – при использова-

нии корреляции (если она имеется и изучена) определяемого показателя с другим, прямое определение которого легко доступно. При существенной утрате представительности определения, надежность этого косвенного способа всегда ниже надежности используемого для корреляции прямого метода на величину коэффициента корреляции.

60. Требования представительности, надежности и доступности испытаний находятся во взаимном противоречии. Весьма близкое воссоздание натурных условий, обеспечивающее высокую представительность, нуждается в применении тяжелого оборудования и трудоемких работ, в ходе которых страдает надежность испытаний. Высоконадежные прецизионные испытания наждаются в точной аппаратуре и высокой квалификации исполнителей, причем надежность бывает обычно связана с идеализацией условий испытаний по сравнению с механическими процессами в натурных условиях.

Ввиду изложенного, перечисленные три основные требования к определениям свойств пород обычно удовлетворяются в разумной мере, отвечающей характеру и уровню поставленной задачи механики горных пород и уровню ее решения с использованием определяемых показателей свойств пород при подготовке, проектировании и ведении горных работ или же, в сложных случаях, при проведении научно-исследовательской разработки в области механики горных пород.

61. Лабораторные методы механических испытаний породных образцов, по сравнению с натурными, в силу своей разработанности, как правило, очень доступны и, при качественном выполнении испытаний, высоконадежны. Представительность лабораторных методов в отношении характера нагружения породы обычно также высока. Однако в случаях сложения изучаемого участка породного массива структурно-ослабленной породой с элементами строения, соизмеримыми с размерами лабораторного образца, представительность лабораторных испытаний часто существенно снижается из-за проявления масштабного эффекта и неучтенного ослабляющего влияния структурных контактов породы. Например, для некоторых горнотехнических задач, связанных с деформированием породного массива, соответствующие показатели деформируемости массива определяются, главным образом, контактным обжатием по его структурным трещинам и, в меньшей мере, деформированием образцов, изготовленных из ненарушенных трещинами частей массива.

Лабораторные методы механических испытаний породных образцов можно считать вполне представительными (с соблюдением необходимых требований методики испытаний) при следующих условиях:

- характерная для массива крупность структурных элементов породы невелика даже по отношению к размерам образцов и проявляется лишь в поддающемся учету небольшом масштабном эффекте;
- крупность структурных элементов породного массива велика даже относительно размеров элементов механической системы исследуемой задачи (например, характерных размеров поддерживаемой выработки, целика, пласта и т. п.); в этом случае массив рассмат-

ривается не как квазисплошная среда, а как система взаимодействующих блоков из ненарушенной породы;

– показатели, полученные в результате испытаний, используются для решения горнотехнических задач, связанных с механическими свойствами породы в малых областях (например – для вопросов технологии дробления породных кусков);

– механизм деформирования и разрушения породы в изучаемых горнотехнических условиях мало зависит от структурной нарушенности породы (например, при пластической деформации под большим всесторонним давлением);

– соответствующие натурные методы испытания породы, в силу недоработанности или недостатков, оказываются еще менее представительными, чем лабораторные (например, при использовании пробников вдавливания в массив инденторов малых размеров для прямой оценки устойчивости горной выработки).

IV. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ (ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ)

62. Наиболее характерным и употребительным из показателей механических свойств горных пород является прочность при одноосном сжатии, часто именуемая крепостью пород. В соответствии с решением Всесоюзного совещания по методам определения сопротивляемости углей и горных пород разрушению механическими способами (Москва, 28–30 ноября 1960 г.), крепость породы используется в качестве общей приближенной оценки ее сопротивляемости разрушению всевозможными технологическими способами (резание, бурение, дробление, взрывание и пр.). Это оправдывается имеющейся корреляцией предела прочности пород при сжатии с их другими прочностными показателями.

Под пределом прочности при сжатии σ_c горной породы понимают величину главного напряжения однородно и одноосно сжимаемой породы, при которой достигается ее разрушение. При этом однородность напряженного состояния должна обеспечиваться с точностью, соответствующей неоднородности сложения породы.

Предел прочности при сжатии, как и напряжения, выражают в килограммах силы на квадратный сантиметр или мегапаскалях (МПа $\cong$ 10 кгс/см^2). Применение термина "крепость породы" обычно связывают с ее выражением в единицах шкалы М. М. Протодьяконова (старшего), единица которой составляет 100 кгс/см^2.

Для большинства скальных пород разрушение при одноосном сжатии состоит в интенсивном изменении строения – трещинообразовании, причем в результате возникновения первых же трещин напряженное состояние породы резко изменяется, что обычно сразу при-

водит к последующему интенсивному растрескиванию породы и снижению ее несущей способности.

Вопросы изученности физики разрушения и теории прочности горных пород при сжатии кратко изложены в главе III.

Независимо от механизма и структуры разрушения пород при сжатии, разрушающее значение напряжения одноосного сжатия является показателем, опытное определение которого может выполняться независимо от реальности той или иной теории прочности. Поэтому задачей методики испытаний является обеспечение, вплоть до разрушения, одноосности и однородности напряженного состояния сжатия в образце или в его разрушающейся части и измерение разрушающего напряжения сжатия.

63. Самый распространенный и наиболее давно применяющийся метод определения предела прочности при одноосном сжатии породы – одноосное сжатие цилиндрических или призматических образцов породы с плоскими торцами, нагружаемыми равномерно распределенным давлением (рис. 12), возрастающим во времени вплоть до разрушения образца. Такое приложение нагрузки обеспечивает однородность напряженного состояния сжатия всего объема образца, причем направления оси образца и главного сжимающего напряжения совпадают, а величина последнего равна давлению на торцевые поверхности.

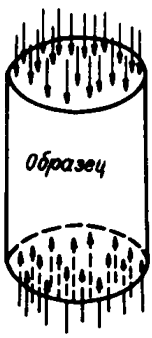


Рис. 12. Однородное одноосное сжатие цилиндрического образца равномерным давлением на его торцы

64. Распространен и стандартизован (ГОСТ 21153.2-75) способ испытания цилиндрических или призматических образцов встречным нажатием на их плоские торцы плоских стальных давильных плит, укрепленных на рабочих органах испытательного пресса (рис. 13). На практике, однако, при использовании этого способа возникает ряд побочных явлений, которые искажают ожидаемую картину напряжений в образце и служат причинами погрешностей результатов испытания. Мера проявления этих искажений и, следовательно, надежность испытаний существенно зависят от практически применяемых нормативов методики испытаний, уточняющих ненормированные положения стандарта.

65. Первая важнейшая причина указанных искажений и погрешностей при испытании цилиндрических и призматических образцов на одноосное сжатие – трение между соприкасающимися поверхностями торцов образца и давильных плит, возникающее вследствие несовместимости деформаций расплющивания приторцовой части образца и нагружающей его давильной плиты. При обычном использовании для давильных плит каленой стали, модуль упругости которой велик по сравнению с модулем горных пород, трение на контакте направлено к продольной оси сжатия образца. В результате притор-

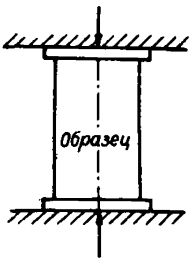


Рис. 13. Сжатие образца плоскими давильными плитами

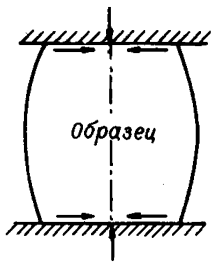


Рис. 14. Деформации образца, сжимаемого давильными плитами с трением по контактным поверхностям

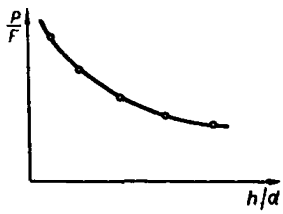


Рис. 15. Зависимость разрушающего значения давления от соотношения размеров образца (при наличии трения торцов)

цовые части образца нагружаются трехосно сжимающей нагрузкой. Образец деформируется, приобретая бочкообразный вид (рис. 14). Поперечные компоненты напряженного состояния трехосного сжатия в образце быстро убывают по высоте образца с удалением от его торцов. Ввиду возникновения у торцов трехосного сжатия, для разрушения образца требуется приложить повышенную осевую нагрузку, тем большую, чем в большей мере накладываются друг на друга области трехосного сжатия нижнего и верхнего торцов, т. е. чем ниже образец (при данном поперечном размере). Неучет влияния указанного механизма нагружения приводит к существенной систематической погрешности в сторону завышения определяемого показателя прочности по результатам испытания недостаточно высоких (в том числе кубических и с диаметром равным высоте цилиндра) образцов.

Влияние высоты (точнее, отношения высоты к поперечному размеру) на прочность одноосно сжимаемых цилиндрических и призматических образцов с сухим трением торцов о давильные плиты изучалось рядом исследователей. В качестве примера на рис. 15 приведены результаты таких испытаний, полученные Г. Н. Кузнецовым. С увеличением отношения высоты образца к его диаметру h/d разрушающее образец давление P/F снижается по гиперболовидной кривой. Это хорошо согласуется с изложенным качественным описанием механизма образования и влияния приторцовых зон трехосного сжатия: достигнув достаточно больших значений, высота образца перестает влиять на величину его прочности и наоборот, чем ниже образцы, тем они прочнее и тем сильнее прочность образца зависит от его высоты.

66. Устранение погрешности результатов испытаний на сжатие, вызванной трением торцов образца, осуществляется четырьмя путями:

– применением образцов достаточно большой высоты, когда силы трения мало влияют на напряженное состояние средней по высоте

части образца, находящейся поэтому в условиях напряжений, близких к одноосным;

– искусственным созданием особых контактных условий приложения к образцу испытательных нагрузок, обеспечивающих свободное расплющивание приторцовых частей образца без трения о нагрузочные плиты;

– внесением расчетной поправки в результаты испытания образцов с трением о плиты. Поправка учитывает влияние этого трения, она установлена на основании обобщения опытных данных, аналогичных приведенным на рис. 15;

– приданием приторцовым частям образцов специальной формы, рассчитанной на обеспечение одноосности и однородности сжатия в разрушаемой рабочей части.

67. Согласно работе Е. И. Ильницкой и др. "Свойства горных пород и методы их определения" (М., Недра, 1969) прекращение влияния трения на напряжение средней по высоте части образца достигается при высоте последнего в 2–2,5 раза превышающей диаметр. При этих значениях влияние высоты на прочность образцов невелико. Б. П. Овчаренко и др. в статье "Унификация методов изучения физико-механических свойств горных пород Донбасса" ("Тр. ДонУГИ", сб. 11. 1968), а также ряд других авторов рекомендуют производить определения прочности при одноосном сжатии на цилиндрических образцах с высотой вдвое превышающей диаметр. Такой же норматив принят в качестве стандартного в США и некоторых других странах.

Существенным недостатком этого пути устранения погрешности испытания является неэкономное расходование кернового материала, из которого изготавливаются породные образцы: для испытаний требуется значительное количество керна, причем маломерные куски вообще не могут быть использованы.

68. Для уменьшения или полного устранения трения торцов образца о давильные плиты применяются разнообразные искусственные приемы. Один из них – нанесение на торцы образца антифрикционных смазок. Ю. М. Карташов и др. в "Методических указаниях по определению прочности горных пород на сжатие" (Л., ВНИМИ, 1973) перечисляют в качестве таких смазок минеральное масло, парафин, вазелин, силиконовый жир и др. Однако смазывание торцов обусловливает появление новой систематической погрешности испытаний вследствие нагружения торца радиально (от его центра) направленными силами вязкого трения смазки, выдавливаемой из зазора между образцом и давильной плитой. Эти силы растягивают торец (рис. 16). Особенно резко их действие наблюдается при использовании в качестве смазки высоковязких материалов (резины, свинца и других низкомодульных подкладок). Так как горная порода сопротивляется разрыву значительно хуже, чем сжатию, то она разрушается в приторцовых частях образца не от сжимающих компонентов внешней нагрузки, а от поперечно растягивающих его торец. Раз-

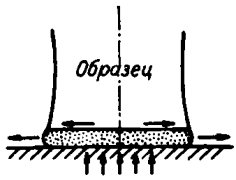


Рис. 16. Деформации образца, сжимаемого давильными плитами со смазкой контактных поверхностей

рыв образца, начинаясь в его торцевых зонах, прорастает по плоскостям продольным относительно оси его сжатия. Поскольку величина разрывающих усилий при этом прямо связана с величиной сжимающей образец нагрузки, а площадь поверхности продольного разрыва пропорциональна высоте образца, постольку величина нагружающего образец усилия сжатия, требуемая для обеспечения разрушения (продольного разрыва) тем больше, чем больше высота образца (рис. 17).

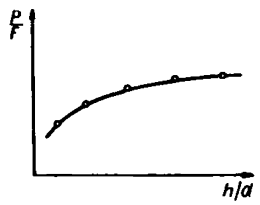


Рис. 17. Зависимость разрушающего значения давления от соотношения размеров образца (при смазке торцов)

Эта зависимость подтверждена опытными данными многих авторов. Таким образом, систематическая погрешность результатов испытания на сжатие образцов со смазанными торцами по знаку противоположна погрешности при сухом трении торцов о давильные плиты. Кроме того, сам характер разрушения образцов со смазанными торцами не представителен в отношении показателя прочности при сжатии.

69. Отрицательное действие описанного влияния вязкого трения смазки, выдавливаемой из зазора между образцом и плитой, устраняется путем, предложенным Б. В. Матвеевым и др. Давильные плиты снабжаются большим количеством сквозных отверстий малого диаметра (рис. 18). В этом случае истечение выдавливаемой смазки происходит в отверстия, а не по периметру торца. Действующие на торец касательные к образцу силы вязкого трения не ориентированы радиально от центра торца, а образуют мозаику участков с местными зонами разно направленных сил вязкого трения: сжатия над отверстиями и растяжения между отверстиями. Взаимная нейтрализация действия этих зон реализуется тем лучше, чем чаще расположены в плите отверстия. Опытное опробование этого приема дало обнадеживаю-

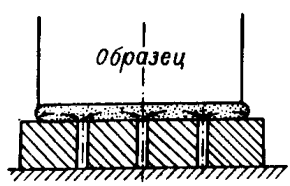


Рис. 18. Схема нагружения образца перфорированной давильной плитой со смазкой образца

щие результаты. Измерение поперечных деформаций цилиндрического образца при испытании предложенным способом показало одинаковость этих деформаций как у торцов, так и в средней по высоте части образца. Кроме того, прочность образцов оказалась не зависящей от их высоты (в пределах отношения высоты к диаметру 0,5–2,0). Однако описанный способ еще широко не применяется и мало апробирован на массовых испытаниях.

70. Другой способ уменьшения или устранения трения о плиту расплющиваемого торца сжимаемого образца – гидростатическое нагружение этого торца жидкостью или иным вязким пластическим материалом. При этом свобода подвижности жидкости, обеспечивающая гидростатическую передачу давления, не должна сопровождаться ее перетеканием и вязким трением о торец. С этой целью жидкостью (или пластическим материалом) необходимо заполнять замкнутый объем под торцом образца.

В предложенном Ю. М. Карташовым и др. устройстве (авторское свидетельство № 256699) в качестве среды, сообщающей образцу гидростатическое давление, использованы низкомодульные пластические материалы (резина, фторопласт, отвержденная эпоксидная смола, эбонит), заполняющие полость нагрузочного приспособления, которая играет роль цилиндра, в то время как в качестве поршня выступает торцовая часть образца (рис. 19). Зазор между цилиндром и поршнем выполнен таким, чтобы не препятствовать расширению сжимаемого образца и предотвращать вытекание высоковязкого пластического материала. Зазоры между пластическим материалом и стенками полости приспособления устранены предварительным (до проведения испытания) нагружением пластического материала стальным поршнем. Этим предотвращается перетекание пластического материала и заполнение им зазоров в процессе последующих нагружений при испытаниях породных образцов. Использование напряженных низкомодульных подкладок позволило достигнуть полной однородности деформаций во всех частях цилиндрического образца независимо от его высоты. Не зависящей от высоты оказалась и прочность образца (в диапазоне h/d равном 0,3–3), что свидетельствует об отсутствии в образце приторцовых зон трехосного сжатия и об одноосном характере его напряженного состояния при испытании. Следует отметить, что испытанные указанным методом образцы разрушаются с образованием трещин продольных относительно нагрузки.

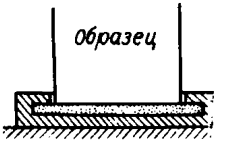


Рис. 19. Схема устройства для гидростатического нагружения образца

71. Для устранения трения о давильные плиты торцов образцов при их сжатии служит также успешно применяемый способ, предложенный С. Т. Кузнецовым и др. (авторское свидетельство № 230492), развитый Ю. М. Карташовым и др. (авторское сви-

детельство № 331278) и заключающийся в передаче торцу образца нагрузки частой сеткой точечных инденторов (применяется набор соприкасающихся с торцом мелких стальных шариков). Местные микроразрушения по контактам вдавливания этих инденторов приводят к образованию на нагружаемой поверхности сетки малых очагов мелкораздробленной породной мучки, обладающей высокой подвижностью. В результате мучка в каждом очаге (рис. 20) передает давление индентора нераздавленной породе гидростатически, допуская свободное смещение расплющиваемого торца в поперечном направлении практически с весьма малым сопротивлением. Поэтому деформации в образце оказываются почти однородными, а сопротивление раздавливанию – не зависящим от высоты образца. Некоторое ослабление породы местными очагами разрушения занижает на 10–15% определяемый показатель прочности и ограничивает область применения метода образцами высотой в пределах 0,8–2 диаметра цилиндра (или стороны основания призмы).

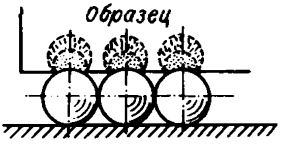


Рис. 20. Схема квазиравномерного нагружения поверхности образца сеткой точечных инденторов

72. Погрешности, вызванные влиянием сухого трения торцов сжимаемых образцов о плоские давильные плиты могут быть устранены расчетным путем. При этом методика предусматривает испытание цилиндрических образцов с произвольной величиной отношения высоты образца к диаметру и корректировку полученного значения прочности (определяемого делением разрушающей нагрузки на площадь сечения). Корректировка производится с помощью коэффициента, зависящего от величины указанного отношения:

$$\sigma_c = \frac{4P}{\pi d^2 f(d/h)} .$$

М. Цёрном предложено выражение, по которому величина этого коэффициента

$$f(d/h) = \sqrt{2(d/h)},$$

что в диапазоне значений $0,4 < (d/h) < 1,3$ составляет:

$$f(d/h) = 0,6 + 0,8(d/h).$$

Г. Баушингер определяет этот коэффициент формулой:

$$f(d/h) = 0,875 + 0,25(d/h),$$

что существенно отличается от рекомендации М. Цёрна.

Сопоставление (по публикациям советских и зарубежных авторов) опытных данных определения зависимости прочности сжимаемых образцов от их высоты для 144 разновидностей горных пород

и искусственных камней также показало расхождение в параметрах поправочного коэффициента. Можно предположить, что частично причина этого расхождения кроется в различной мере несовершенства техники проводившихся опытов. Поэтому полученные данные были подвергнуты статистическому анализу с целью установления обобщенной величины указанного коэффициента и меры его достоверности. В результате, к использованию рекомендуется выражение:

$$f(d/h) = 0{,}754+0{,}496\ (d/h).$$

Погрешность от применения данной поправки составляет ±13%. Эта погрешность определена по разбросу величины поправки для указанных 144 разновидностей пород, и ее следует считать вероятной погрешностью рекомендуемого расчетного выражения, учитывающей индивидуальные различия в практическом применении методики и техники испытаний на сжатие образцов высотой в пределах 0,6–2,2 диаметра с сухим трением торцов.

Анализ показал, что рекомендуемое выражение поправки не зависит ни от типа, ни от крепости испытываемых пород.

Все указанные расчетные поправки предусматривают сжатие породных образцов между стальными давильными плитами. Между тем, в общем случае, степень совместности деформаций торца и плиты или их проскальзывания, а также величина развивающегося трения зависят также от различия деформируемости соприкасающихся материалов. При использовании подкладных плит с весьма низким модулем упругости возникают описанные в п. 68 явления выжимания подкладки с обратно направленным трением о торец. К. Т. Тажибаевым предложено выражение поправки при расчете прочности образца, учитывающей, кроме влияния его высоты, также показатели деформируемости подкладных плит и образца:

$$f\left(\frac{d}{h}\right) = 1 + \frac{d}{h} \cdot k \frac{\mu_1}{E_1 + E_2} \cdot \left(\frac{E_2}{m\mu_2} - \frac{E_1}{\mu_1}\right),$$

где E_1 и E_2 – модули упругости образца и давильной подкладки, μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона образца и давильной подкладки, m – коэффициент бокового распора давильной подкладки.

Значение k дается для различных соотношений деформируемости образца и подкладки.

73. В заключение рассмотрения вопроса о путях устранения погрешности, вызванной трением торцов при испытании образцов на одноосное сжатие, следует упомянуть о предложениях по применению образцов с приторцовыми частями специальной формы.

Г. Н. Кузнецовым на Совещании по вопросам горного давления (1948 г.) предложено утолщать цилиндрические образцы у торцов (рис. 21), чтобы напряжения в местах приконтактных инверсий были по абсолютному значению достаточно малы. Необходимые для

разрушения расчетные напряжения развиваются в рабочей утонённой цилиндрической части образца – в достаточном удалении от приторцовых инверсий напряженного состояния. Сопряжение рабочей части образца с приторцовыми выполняется с закруглениями достаточно плавными для того, чтобы концентрации напряжений у мест перехода сечений были малы. Длина рабочей части берется достаточной для сквозного прорастания сдвиговой трещины разрушения.

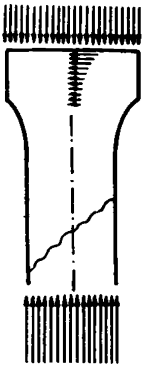


Рис. 21. Сжатие образца с утолщенными торцами

Зибель и Помп предложили придавать торцевым поверхностям образца и давильным плитам не плоскую, а коническую (рис. 22) форму. Равнодействующая трения и давления на торец при угле конусности равном углу трения породы о сталь оказывается соосной образцу и сжатие последнего происходит одноосно.

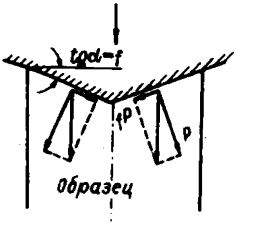


Рис. 22. Сжатие образца с конусной формой торца

Предложения использовать для испытаний на сжатие образцы специальной формы не получили широкого применения главным образом из-за сложности их изготовления, в ходе которого представительность породы нарушается.

74. Второе побочное явление искажения расчетной однородности напряженного состояния сжимаемого образца – внецентренность сжатия вследствие часто встречающейся недостаточной центрировки нагрузочного усилия относительно поперечных сечений образца. Погрешность центрировки нагрузочного усилия возникает при непараллельности нагружающих давильных плит или при неперпендикулярности к оси образца одного или обоих его торцов (рис. 23). При этом напряжения в поперечных

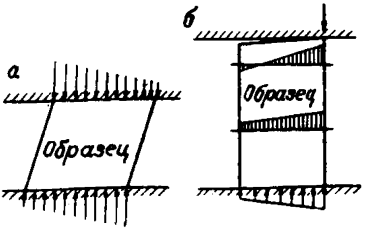


Рис. 23. Погрешности испытания, вызванные плохим центрированием нагрузки вследствие неправильности торцов образца:

а – неперпендикулярность торцов к оси образца, б – непараллельность торцов

сечениях образца распределяются неравномерно (в разных сечениях и неодинаково): происходит внецентренное сжатие, в крайних случаях приводящее даже к потере статической устойчивости установки образца между плитами испытательной машины.

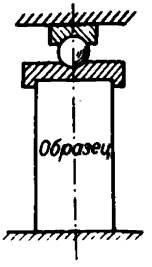


Рис. 24. Центрирование нагрузки накладным шаровым шарниром

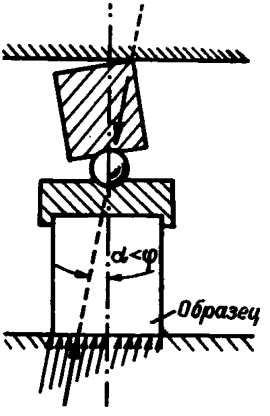


Рис. 25. Заклинивание накладного центрирующего шарнира с высокой накладкой

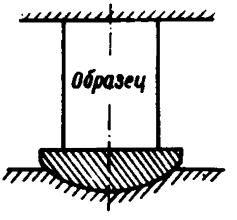


Рис. 26. Центрирование нагрузки подкладной линзообразной пятой

75. Для центрирования нагрузки, сообщаемой сжимаемым образцам, обычно применяется одна из следующих схем центрирующего устройства:

а. Установка образца на плоской плите, приблизительно по оси нагружающих элементов испытательной машины и нагружение его верхнего торца через накладное нагрузочное приспособление с шаровым шарниром, соосным образцу благодаря наличию центрирующих рисок или направляющего бурта (рис. 24). При данной схеме существенные погрешности от внецентренного сжатия могут возникнуть лишь тогда, когда высота накладок над центрирующим шариком приспособления очень велика (рис. 25).

б. Нагружение плоской давильной плитой образца, установленного на плоской поверхности подкладной линзообразной пяты с выпуклостью, направленной вниз (рис. 26). Образец устанавливается на плоской стороне пяты соосно-вертикальной оси линзы (по центрирующим рискам). При этой схеме существенные погрешности от внецентренного сжатия возникают в случаях, когда центр поворота линзы находится выше верхнего торца образца (рис. 27) или ниже его на величину, превышающую 1,6 диаметра образца. Кроме того, погрешности часто возникают при значительном сопротивлении повороту линзы вследствие неточности или загрязнения ее поверхности и при недостаточно соосной установке образца на плоской поверхности пяты.

в. Нагружение образца через два шаровых шарнира, располагаемых у обоих торцов образца. Соосность образца и обоих шарниров

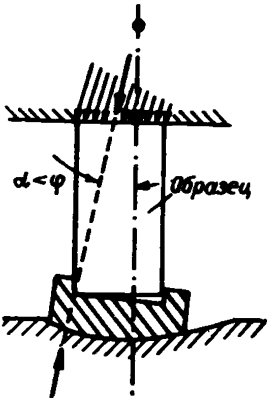


Рис. 27. Заклинивание подкладной линзообразной пяты с большим радиусом кривизны

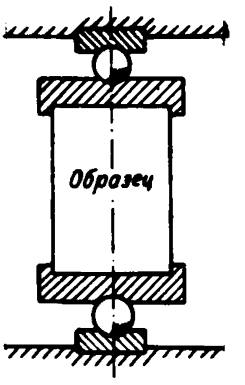


Рис. 28. Двустороннее центрирование нагрузки шаровыми шарнирами

обеспечивается с помощью центрирующих буртов (рис. 28). Эта схема, по сравнению с предыдущими, несколько увеличивает трудоемкость установки образца, но лучше всего обеспечивает центрировку нагрузки. Однако применение данной схемы ограничивается условием строго поступательного движения нагружающих элементов машины с одной степенью свободы, без возможности их горизонтального покачивания, приводящего к потере устойчивости установки образца. Для этой цели движение нагружающих элементов ограничивают направляющим устройством.

76. В ходе испытания на одноосное сжатие пород со значительной структурной неоднородностью иногда оказывается, что однородно нагруженное поперечное сечение образца неоднородно сопротивляется нагрузке. При этом деформации по сечению неодинаковы, с преимущественной асимметрией: ось нагружения не совпадает с осью сопротивления образца. Последний деформируется внецентренно со значительным уходом от параллельности расположения торцов, завершающимся неправильным разрушением образца. В таких случаях целесообразно выполнить центрирование нагружения, задавая неравномерность распределения нагрузки по торцам, но обеспечивая равномерность задания по его сечению деформаций и сохранение параллельности торцов. Для этого применяется разработанное Ю. Карташовым устройство (рис. 29), которое состоит из легкоподвижной шаровой опоры, ориентирующейся по торцу образца при нагружении малыми начальными нагрузками, после чего положение устройства фиксируется вывинчиванием трех упорных болтов, этим предотвращается поворот шарового шарнира при последующем нагружении.

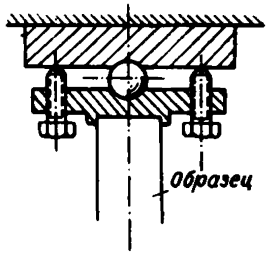


Рис. 29. Устройство для равномерного распределения деформаций неоднородного образца

77. Третье побочное явление, возникающее при одноосном сжатии цилиндрических и призматических образцов и являющееся источником погрешности результатов испытаний, – искажения равномерности распределения испытательного давления по поверхности торцов образца вследствие несоответствия геометрии давильных поверхностей и торцов. Чаще всего встречаются (рис. 30):

– общая выпуклость торцов в результате "завала" их краев при плоской ручной шлифовке;

– общая вогнутость стальных давильных плит вследствие их износа;

– нерегулярно располагающиеся по поверхности торцов образца выступы (заусенцы и пр.), а также забоины на поверхности давильных плит.

Регулярная или случайно распределенная по поверхности торцов и плит шероховатость от следов механической обработки поверхно-

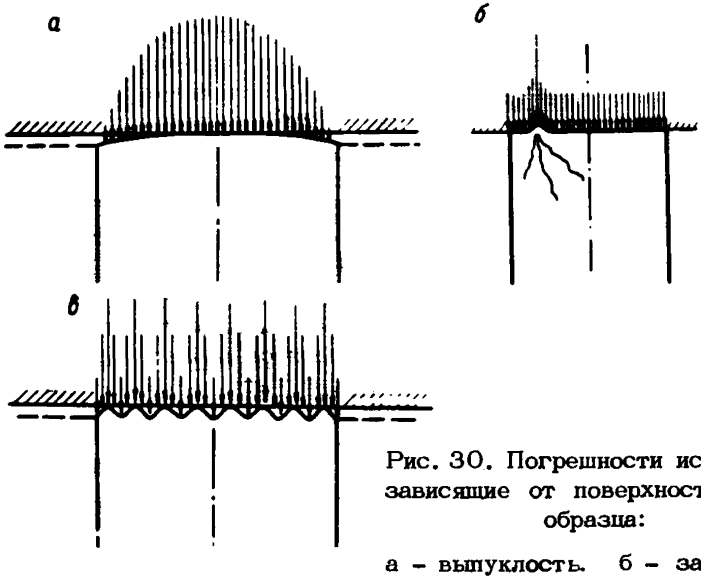


Рис. 30. Погрешности испытаний, зависящие от поверхности торца образца:

а – выпуклость. б – заусенец, в – регулярные следы обработки

сти не оказывает существенного влияния на механизм нагружения поверхности и на результаты испытания образца при условии, что средний размер шероховатости не превышает 0,02–0,03 диаметра торца.

78. Перечисленные в п. 77 искажения устраняют следующими приемами:

– точной плоской обработкой резцом или абразивом торцевых поверхностей образцов и постоянным поддержанием качества плоских поверхностей давильных плит(они должны быть каленными и периодически перешлифовываться). При нетщательной обработке торцов и использовании для испытаний изношенных давильных плит нагрузка воспринимается не всей торцевой поверхностью образца, а более или менее случайно сосредоточенными ее участками. Это вызывает значительную случайную вариацию результатов испытания при существенной систематической их погрешности в сторону занижения. Обе погрешности находятся в прямой зависимости от меры неплоскостности поверхностей нагружения;

– помещением между торцами образца и давильными устройствами малопрочных уплотняющих прокладок. Уплотнение прокладок под неровностями существенно снижает пики давления, не препятствуя свободному поперечному деформированию (расширению) торца сжимаемого образца. В качестве малопрочных уплотняющихся прокладок применяют толстый картон, толстый слой песка и др. Опыт показал, однако, что под центральными частями торцов сжимаемых образцов уплотнение этих материалов происходит сильнее, чем у периметра торцов, распределение давления неоднородно и результаты испытаний оказываются недостаточно стабильными;

– использованием для выравнивания давления на неровный торец низкомодульных подкладок, работающих в гидростатическом режиме. При этом должна быть исключена возможность возникновения вязкого трения выдавливаемой подкладки, как это описано в п. 70. Данный прием позволил значительно снизить требования к качеству обработки породных образцов. При этом оказалось, что допустимая степень шероховатости после обработки в обратной мере зависит от величины модуля применяемых подкладок:

– применением описанного в п. 71 способа передачи нагрузки частой сеткой точечных инденторов. Образование породной мучки создает условия работы легкоподвижной низкомодульной прокладочной среды. Предложения же закреплять инденторы (стальные шарики диаметром 2–3 мм) на податливой основе из эпоксидной смолы дополнительно расширяет возможность инденторов приспособиться к работе на неровной поверхности торца образца и снижает требования к качеству поверхности торца.

79. Четвертое явление, искажающее расчетное напряженное состояние одноосно сжимаемых образцов, – неоднородность сложения и состава породы, благодаря которой при определении прочности на сжатие наблюдается масштабный эффект. При испытаниях образцов, размеры которых сравнимы со средними размерами структурных элементов породы или не более чем в 10–15 раз превышают их, определяемый показатель прочности оказывается, как правило, в

среднем завышенным с высоким коэффициентом вариации прочности для образцов-дублёров. Объясняется это тем, что из числа образцов с малыми размерами, сложенных малым числом структурных элементов, равновероятны образцы с преобладанием как наиболее крепких (или наиболее устойчиво расположенных), так и наиболее слабых (или неустойчиво расположенных) элементов. Различие прочности таких образцов соответствует высокому значению коэффициента вариации прочности по сравнению с тем же коэффициентом для бóльших образцов той же породы, с бóльшей мерой усреднения прочных и слабых структурных элементов.

Вероятной причиной завышения среднего значения прочности малых образцов является обогащение испытываемых партий этих образцов более прочными экземплярами за счет технологического разрушения слабых структурных связей при вырезке в процессе изготовления и, поэтому, исключения менее прочных экземпляров из состава испытаний. Наблюдаемый иногда обратный эффект влияния абсолютных размеров образцов на их прочность бывает обусловлен следующими причинами:

– бóльшим у малых образцов, по сравнению с крупными, снижением прочности в результате влияния выпуклости нетщательно отшлифованных торцов или от неточного центрирования нагрузки;

– бóльшей значимостью для маломерных образцов технологического разупрочнения приповерхностной части, по сравнению с крупными ("поверхностный масштабный эффект").

80. Количественные выражения влияния размеров образца на прочность для натурных и лабораторных условий предлагались С. Т. Кузнецовым, Г. Л. Фисенко, Ю. И. Туринцевым в форме коэффициентов структурного ослабления. Обобщение этих предложений выполнено С. Е. Чирковым в работе "Упрощенные уравнения проявления масштабного эффекта в горных породах" (в сборнике "Доклады всесоюзной конференции по физике горных пород и процессов" М., Изд-во МГИ, 1974), согласно которой предел прочности при одноосном сжатии с ростом линейного размера (диаметра) образца убывает в обратной степенной зависимости от диаметра (или от числа структурных элементов в линейном размере сечения:

$$\frac{\sigma_{c1}}{\sigma_{c2}} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^m,$$

где показатель степенной зависимости постоянен для одной и той же породы, а для разных пород принимает значения в пределах: $m = 0{,}36\text{–}0{,}78$ (среднее $m = 0{,}5$), кроме ископаемых солей, для которых $m \cong 0$.

81. Основной путь устранения погрешностей, вызванных масштабным эффектом, – испытание образцов достаточных абсолютных размеров, превышающих средний линейный размер структурного элемента не менее чем в 10–15 раз. При этих размерах может считаться достаточной мера усреднения неоднородности строения,

свойств породы и ее напряженного состояния по объему образца, а испытание необходимого количества образцов дает правильное среднее значение прочности породы и коэффициента ее вариации. Для большинства горных пород оказываются вполне достаточными применяемые обычно образцы диаметром 30–50 мм.

При испытаниях пород с крупными элементами строения этот путь приводит к неэкономичным, а иногда и к невыполнимым требованиям изготовления весьма крупных образцов. В этих случаях испытывают образцы меньших размеров, а поправку, учитывающую влияние масштабного эффекта, вводят расчетным порядком, например, с использованием зависимости, предложенной С. Е. Чирковым. Испытывают породные образцы двух разных диаметров, превышающих средний размер структурного элемента породы, соответственно, в n_1 и n_2 раз.

Прочность породы рассчитывается по соответствующим величинам прочности образцов σ_{c1} и σ_{c2} по формуле:

$$\sigma_c = \sigma_{c1} \left(\frac{n_1}{10 \ldots 15} \right)^{\frac{\lg \sigma_{c1} - \lg \sigma_{c2}}{\lg n_2 - \lg n_1}}.$$

Если невозможно использовать для испытаний образцы разных размеров, поправка на учет масштабного эффекта может быть вычислена на основании испытаний образцов одного размера, но по более приближенным формулам:
для гранитов:

$$\sigma_c = \sigma_{c1} \sqrt[4]{\frac{n_1}{10 \ldots 15}},$$

для солей: $\sigma_c = \sigma_{c1}$,

для прочих пород: $\sigma_c = \sigma_{c1} \sqrt{\frac{n_1}{10 \ldots 15}}$

82. Кроме перечисленных четырех факторов, искажающих однородность напряженного состояния сжимаемых цилиндрических образцов, на результаты испытаний может также оказать влияние анизотропия сложения и механических свойств породы. Прочность анизотропных пород при одноосном сжатии неодинакова в различных направлениях их естественного залегания. Поэтому подготовка и испытание породных образцов должны выполняться с учетом пространственной ориентировки залегания породы, по необходимому направлению определения прочности. Для полного определения прочности анизотропной породы требуется раздельное определение ее прочности в главных направлениях анизотропии, например, для

трансверсальноизотропных осадочных пород – в направлении их наслоения и по нормали к нему.

83. При некоторых видах геологических работ и применительно к определенным направлениям использования результатов испытаний, наряду с прямыми методами определения предела прочности при сжатии путем одноосного сжатия цилиндрических или призматических образцов, используют и ряд косвенных. Косвенные методы применяются при необходимости:

– экономного расходования отобранной для испытаний малой по объему породной пробы, например, при использовании коротких кусков бурового керна в качестве буровой пробы тонких породных слоев;

– проведения испытаний пород в полевых условиях с максимальным упрощением операций по подготовке образцов, например, с полным исключением камнерезных работ;

– определения прочности пород со слабыми структурными связями, затрудняющими и иногда полностью исключающими возможность извлечения и транспортировки проб достаточных размеров и вырезки из них крупных образцов правильной формы в требуемом количестве.

Доступность косвенных методов достигается обычно за счет некоторого снижения их представительности или надежности, получающегося вследствие ослабления нормативов методики при упрощении испытаний (например, пренебрежение масштабным эффектом) и, особенно, в результате косвенного пути определения прочности.

Косвенные методы используют сведения о корреляции предела прочности при сжатии пород с характеристиками других механических свойств, непосредственно определяемыми в результате испытания (например, с пределом прочности на растяжение, показателями объемной прочности, модулем упругости, удельной энергией разрушения). В связи с использованием этой корреляции надежность косвенных методов снижается по сравнению с прямыми соответственно на величину, определяемую коэффициентом корреляции данной зависимости.

84. Из приведенного анализа видно, что погрешности определения предела прочности при одноосном сжатии, вызванные применением необоснованных нормативов, могут быть весьма большими. Еще более существенны расхождения результатов определений недостаточно апробированными методами. Такие погрешности встречаются в практике ряда организаций, накапливаясь в различных сочетаниях и в различной мере. Так, по сведениям Донбасс НИЛ испытания прочности одной и той же пробы песчаника в лабораториях дали следующие результаты (средние значения):

	Прочность, кгс/см^2
Трест Артемгеология	467
Трест Ворошиловградгеология	320

Трест Южукргеология	177
Волго-Донское геологическое управление	230
ВНИМИ	444

Поэтому весьма важно всеобщее применение достаточно разработанных и обоснованных, желательно единых, методов испытаний и нормативов этих методов. Различие методов или их отдельных нормативов может быть оправдано лишь специфическими требованиями ограниченного дифференцирования методов по уровню надежности (прецизионные, нормальные, грубые) или по доступности (лабораторные, упрощенные, экспресс-методы). Такое дифференцирование должно соответствовать различным уровням использования результатов испытаний.

85. Вышедший в 1976 г. ГОСТ 21153.1-75-21153.4-75 "Породы горные. Методы физических испытаний" пока в малой мере удовлетворяет изложенным методическим требованиям, содержание его метрологически необосновано и допускает произвол в ряде существенных нормативов. Эти недостатки сопряжены со значительным экономическим ущербом.

В связи с тем, что предусмотренные стандартом методы определения прочности при одноосном сжатии (крепости) не удовлетворяют требованиям представительности, надежности и доступности испытаний и необходимому уровню использования их результатов, перечень этих методов практически приходится пополнять более приемлемыми, либо дополнять стандартные методы необходимыми добавочными нормативами.

У. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ (НОРМАТИВЫ)

Метод повышенной надежности

86. Метод применяется в качестве эталонного при проверке других методов, определении их погрешностей и установлении меры надежности, а также при внесении соответствующих коррективов в их нормативы. Связанная с прецизионностью сложность метода ограничивает область его применения метрологическими (сопоставительно-поверочными) работами, выполняемыми преимущественно научно-исследовательскими и некоторыми хорошо оснащенными и укомплектованными геологическими организациями. При смягчении нормативов настоящий метод становится более доступным и используется также при разведке угольных месторождений как имеющий нормальный уровень надежности.

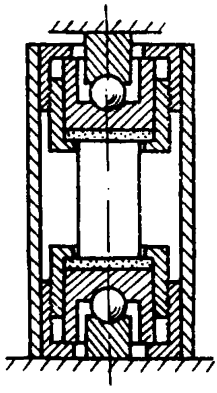


Рис. 31. Нагрузочное приспособление МА-7

Одноосному сжатию в специальном нагрузочном приспособлении типа МА-7 (рис. 31), изготовляемом во ВНИМИ, подвергают цилиндрические образцы испытываемой породы. Для надежного определения как средней величины предела прочности породы, так и коэффициента его вариации испытаниям подвергают 10-12 образцов (для нормального уровня надежности - 5-6 образцов).

87. Погрешности от неточного центрирования испытательного усилия предотвращаются использованием в нагрузочном приспособлении шаровых шарнирных сочленений и центрирующих установку образца буртов у обоих его торцов (зазор между буртом и образцом пределах 1-1,5 мм), а также применением образцов цилиндрической формы с допусками размеров:

эллипсность - 0,3 мм (1,5 мм),
конусность - 0,5 мм (1 мм),
перпендикулярность
торцов к оси - 0,5 мм (1 мм).

Примечание: В скобках здесь и далее указаны нормативы для испытаний с нормальным уровнем надежности.

88. Погрешности от неравномерности распределения нагрузочного давления предотвращаются включением в конструкцию нагрузочного приспособления низкомодульных подкладок под торцы образца, находящихся в замкнутом объеме и работающих в гидростатическом режиме, причем материал этих подкладок выбирается в зависимости от прочности испытываемой породы:

	Прочность породы, кгс/см^2
Резина 8Т (ГОСТ 7338-65)	10-100
Фторопласт 4 марки А (ГОСТ 10007-62)	80-250
Смола эпоксидно-диановая ЭД-6 (ГОСТ 10586-63), отвержденная малеиновым ангидридом МА (ГОСТ 5854-51)	150-1200
Эбонит Б (ГОСТ 2748-53)	более 1200

Торцы образцов выполняют плоскими с допуском размеров:

Выпуклость . . . стрелка кривизны не более 0,2 мм (0,5 мм)
Шероховатость . . . не ниже класса 4 (класса 3) по ГОСТ 2789-51

89. Погрешности от масштабного эффекта, вызванного неоднородным сложением и составом горной породы, предотвращаются нормативами абсолютных размеров цилиндрических образцов, диаметр и высота которых должны не менее чем в 12 раз (для нормального

уровня надежности – в 7 раз) превышать средний размер элемента структуры породы, причем для образцов, указанное отношение размеров которых менее 12-кратного, масштабный эффект учитывают с поправкой согласно п. 81.

Метод предусматривает использование цилиндрических образцов диаметром от 30 до 90 мм, что для большинства пород удовлетворяет приведенным требованиям. Высота образцов не влияет на результаты испытаний данным методом и не учитывается, однако из соображений удобства монтажа нагрузочного устройства и предотвращения продольного изгиба образца она допускается в пределах 0,5–3 диаметра.

В связи с использованием для испытаний указанных размеров образцов, нагрузочное приспособление МА-7 выбирается из комплекта четырех типоразмеров: 30–36, 37–42, 43–59 и 60–90 мм с переходными кольцами соответствующего диаметра для испытания образцов промежуточных размеров.

90. Погрешности от возникновения трения между расплющиваемым торцом образца и давильной поверхностью низкомодульных подкладок предотвращают с помощью предварительного напряжения этих подкладок в нагрузочном приспособлении усилием согласно табл. 2. Это усилие обеспечивает необходимую плотность заполнения подкладкой полости нагрузочного приспособления.

Таблица 2

Диаметр породных образцов, мм	Нагружающее усилие, кгс, для предварительного напряжения материала подкладок			
	резины	фторопласта	эпоксидно-диановой смолы	эбонита
30–36	50–70	1000–1400	1900–2800	3800–5400
37–42	75–95	1500–1900	2900–3700	5700–7400
43–60	100–200	2000–4000	3900–7600	7700–15000
61–90	205–450	4100–9000	7900–17000	15500–34000

Предварительное напряжение подкладок осуществляется на прессе при замене образца аналогичной по размерам стальной болванкой. Нагрузка выдерживается 5–10 мин, далее напряженное состояние подкладок фиксируется затягиванием на нагрузочном приспособлении гаек, зажимающих их края, после чего нагрузка пресса снимается. Операция предварительного напряжения подкладок должна возобновляться через каждые 100–200 испытаний породных образцов.

91. Испытание каждого образца производится с выполнением обычных требований подготовки как самого образца, так и оборудования. Образец плавно нагружают в нагрузочном приспособлении

так, чтобы разрушение достигалось по истечении 30–90 с от начала нагружения. В этих и даже в значительно более широких пределах, как установлено опытами, скорость нагружения влияет на результаты испытаний весьма незначительно.

Предел прочности при одноосном сжатии рассчитывают для каждого образца по формуле: $\sigma_{c(i)} = \frac{4P}{\pi d^2}$,

где P – зарегистрированная максимальная нагрузка, отвечающая разрушению образца, кгс; d – диаметр образца, см; i – номер образца в пробе породы.

При испытаниях с нормальным уровнем надежности пород, имеющих крупные структурные элементы, для расчета предела прочности следует применять формулу:

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

где значение поправочного коэффициента K_M, учитывающего масштабный эффект, принимается в зависимости от величины отношения диаметра образца к среднему размеру структурных элементов породы согласно табл. 3.

Таблица 3

Отношение диаметра образца к размеру структурного элемента породы	7	8	9	10	11	≥ 12
K_M	0,76	0,81	0,87	0,91	0,96	1,0

Предел прочности породы вычисляется усреднением величин прочности n-го количества испытанных образцов породной пробы:

$$\sigma_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{c(i)}}{n}.$$

Коэффициент вариации предела прочности вычисляется по формуле:

$$K_{вар} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\sigma_{c(i)} - \sigma_c)^2}}{(n-1)\sigma_c}.$$

Метод одноосного сжатия стальными плитами породных образцов с шлифованными торцами

92. Метод основывается на применении ГОСТ 21153.2-75 "Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии". С необходимыми добавочными и уточняющими нор-

мативами имеет нормальную надежность для массового производственного использования в лабораторных условиях при разведке угольных месторождений, при геолого-изыскательских работах на строительстве и реконструкции угледобывающих предприятий. Метод допущен к применению на геологических работах при эксплуатации шахт и разрезов.

Одноосному сжатию центрирующим нагрузочным приспособлением (рис. 32) подвергают цилиндрические образцы породы. Для обеспечения необходимой надежности определения средней величины предела прочности при одноосном сжатии и коэффициента его вариации испытывают 6–8 образцов, которые могут отличаться друг от друга по размерам в пределах нормативов метода.

93. В связи с требованиями учета масштабного эффекта данный метод предусматривает использование образцов, в основном, имеющих диаметр в пределах 30–60 мм, причем величина диаметра должна не менее чем в 7 раз превышать средний размер структурного элемента породы, а определяемый показатель должен рассчитываться с учетом коэффициента $K_м$, отражающего влияние масштабного эффекта (см. табл. 3).

94. Для предотвращения погрешности от неточного центрирования нагрузки, в состав нагрузочного приспособления входит накладная пята с шаровым шарнирным сочленением и соосный с шарниром стальной бурт, образующий вместе с давильной плитой гнездо, фиксирующее соосное с пятой расположение верхнего торца образца (радиальный зазор в пределах 1–1,5 мм). При этом центровка обеспечивается, если размеры образцов выполнены со следующими допусками:

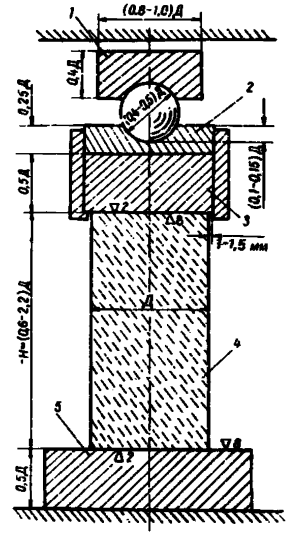


Рис. 32. Нагрузочное приспособление для сжатия цилиндрических образцов с шлифованными торцами:

1 – накладка, 2 – подкладка, 3, 5 – давильные плиты, 4 – образец

– разность диаметров поперечного сечения – не более 1,5 мм,

– разность длин, образующих вследствие непараллельности торцов – не более 1 мм,

– перпендикулярность торцов к оси образца с точностью до $\pm 1^{\circ}$

95. Погрешности от неравномерности распределения по торцам нагрузочного давления можно предотвратить, если поверхности давильных плит будут обладать соответствующими качествами: они

должны быть каленными до твердости R_C = 54 . . . 56 и шлифованными по 8 классу чистоты (ГОСТ 2789-51) с допуском по плоскости 0,01 мм. Толщина плит - не менее 0,5 диаметра образца, в целях предотвращения прогиба. Образцы также должны иметь плоские торцы, шлифованные или точеные с допускаемой чистотой поверхности по 4 классу (ГОСТ 2789-51) и с величиной стрелки кривизны не более 0,04 мм.

96. Погрешности от возникновения трения между давильными поверхностями и расплющиваемыми торцами образца устраняют, применяя при определении прочности каждого образца по формуле

$$\sigma_{c(i)} = \frac{4K_в K_м P}{\pi d^2}$$

расчетный поправочный коэффициент $K_в$, принимаемый в зависимости от величины отношения высоты образца к его диаметру ($h : d$) согласно табл. 4.

Таблица 4

$h : d$	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2
$K_в$	0,63	0,68	0,72	0,80	0,86
$h : d$	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
$K_в$	0,90	0,94	0,97	1,00	1,02

В связи с установленной областью надежного применения указанной расчетной поправки (с надежностью, достаточной для нормального уровня массовых испытаний), отношение высоты образцов к диаметру ограничивается значениями от 0,6 до 2,2.

В приведенной формуле расчета прочности образца участвует также коэффициент $K_м$, устраняющий погрешность от масштабного эффекта структурной неоднородности породы и принимаемый в зависимости от величины отношения диаметра образца к среднему размеру элемента структуры породы согласно табл. 3.

97. Типоразмер нагрузочного приспособления должен выбираться по диаметру центрирующего бурта для каждого образца в зависимости от фактического диаметра последнего. Практически в комплекте должны иметься нагрузочные приспособления через каждые 2 мм диаметра.

При испытании к образцу прикладывается нагрузка, возрастающая с такой скоростью, чтобы разрушение достигалось в интервале времени от 30 до 90 с от начала нагружения.

Величину предела прочности с учетом указанных поправок рассчитывают согласно п. 95 для каждого образца. Предел прочности породы и коэффициент его вариации вычисляют осреднением результатов испытаний всех ее образцов с использованием обычных формул математической статистики (см. п. 91).

Метод одноосного сжатия породных образцов плитами с точечными инденторами

98. Метод по уровню надежности относится к нормальным и рекомендуется к применению при разведке угольных месторождений и геолого-изыскательских работах в период строительства или реконструкции угледобывающих предприятий. Допущен к применению на геологических работах при эксплуатации этих предприятий.

Одноосному сжатию со специальным нагрузочным приспособлением (рис. 33) подвергают последовательно 6-8 цилиндрических образцов испытываемой породы, которые по размерам могут отличаться друг от друга в пределах, допускаемых нормативами метода.

99. Погрешности неточного центрирования испытательного усилия предотвращаются так, как это изложено в п. 94.

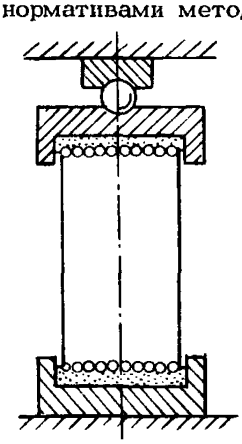


Рис. 33. Нагрузочное устройство для сжатия цилиндрических образцов с наборно-шариковыми давильными плитами

Во избежание погрешностей от неравномерности распределения нагрузочного усилия по торцам, а также от трения торцов о рабочую поверхность нагрузочного устройства, эта поверхность выполняется в виде частой сетки точечных инденторов - мелких стальных шариков диаметром 3 мм, уложенных и закрепленных вплотную друг к другу, в один слой на упругом основании из отвержденной эпоксидной смолы. Резко-сосредоточенная нагрузка по контакту каждого индентора с образцом вызывает местное очаговое разрушение с образованием под инденторами мелкораздробленной породной мучки, которая служит мягкой подкладкой, гидростатически выравнивающей нагрузку. Эта подкладка податлива в направлении свободного расплющивания образца и позволяет снизить требование к качеству поверхности торцов образца, для которой устанавливается допуск отклонения от плоскости (общая кривизна и местные выступы) - 0,2 мм. Практически, для испытаний пригодны образцы, торцы которых отрезаны алмазной пилой без шлифовки.

Применение наборно-шариковых давильных поверхностей позволяет использовать для испытаний образцы высотой 0,8-2,0 диаметра без поправок на учет влияния высоты образца. Однако местная нарушенность материала образца снижает величину разрушающего его

усилия примерно на 10%, поэтому при расчете прочности образца применяют соответствующий поправочный коэффициент.

100. С учетом масштабного эффекта, а также разработанности настоящего метода применяемые величины диаметра образца ограничены диапазоном от 30 до 100 мм и требованием не менее чем семикратного соотношения диаметра образца и среднего размера элемента структуры породы. При расчете прочности образца влияние масштабного эффекта учитывают с помощью коэффициента $K_м$, выбираемого согласно табл. 3, в зависимости от крупности слагающих его структурных элементов породы.

101. Типоразмер нагрузочного приспособления выбирают по диаметру центрирующего бурта в зависимости от фактического диаметра каждого образца.

Режим нагружения образца выполняют, как указано в п. 97.

Предел прочности каждого образца вычисляют по формуле:

$$\sigma_{c(1)} = \frac{4,4 K_м P}{\pi d^2} .$$

Предел прочности породы и коэффициент его вариации вычисляют, обрабатывая данные испытаний всех ее образцов согласно п. 91.

Метод раскалывания породных кусков сферическими инденторами

102. Метод по уровню надежности относится к упрощенным, он нетрудоемок и в случае применения предусмотренного портативного прибора доступен для использования в полевых, шахтных и подобных условиях слабой оснащенности лабораторными средствами. Рекомендуется в качестве основного метода массовых испытаний на геологических работах при эксплуатации горных предприятий, их строительстве и реконструкции. Допущен к применению при разведке угольных месторождений.

Метод является косвенным, так как использует корреляцию величин пределов прочности горных пород при одноосном сжатии и при растяжении, изучавшуюся рядом исследователей (М. М. Протодьяконов - младший и др.) и установленную применительно к данному методу Г. В. Михеевым. Предел же прочности при растяжении этим методом определяется нагружением породного образца встречно направленными усилиями сферических инденторов (стальных шариков диаметром 15 мм) и расколом его по сечению (сечениям), проходящему по оси нагружения. При нагружении под лунками вдавливания инденторов образуются сфероидальные зоны местного измельчения породы, распираемые давлением инденторов (рис. 34) и являющиеся источником поперечного, относительно нагружающего усилия, растяжения тела образца по сечениям, проходящим через ось нагружения, причем разрыв происходит по слабейшему сечению. Опреде-

ляемый показатель устанавливают отнесением усилия раскола к его площади, учитывая влияние масштабного эффекта.

103. В качестве образцов испытываемой породы используют ее куски произвольной, в том числе неправильной формы и повторно используемые обломки, образующиеся после проведения испытаний данным методом. Условия, ограничивающие произвольность, следующие:

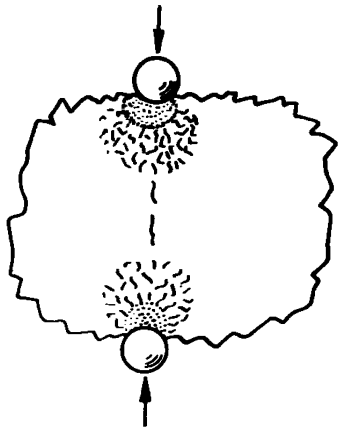


Рис. 34. Схема раскалывания сферическими индикторами образца неправильной формы

а. Форма образца должна удовлетворять требованию представительности ожидаемого сечения раскола. Это сечение определяется как слабейшее (с минимальной площадью или максимальным ослаблением) из сечений, проходящих через намечаемую ось нагружения. В случае анизотропии породы при этом учитывают требуемую ориентировку раскола относительно направлений анизотропии (по нормали или вдоль напластования). При повторном использовании обломков образцов ожидаемое сечение раскола не должно проходить через ось нагружения первичного раскола (последняя явно заметна на поверхности обломка).

б. Форма образца должна удовлетворять условию его устойчивости при нагружении инденторами: образец не должен выскальзывать из-под инденторов, для чего касательные плоскости к местам нагружения должны быть близки к параллельным. При этом может возникнуть необходимость в подготовке с помощью зубила, напильника и т. п. в местах предполагаемого нагружения примерно параллельных площадок размером не менее 10x10 мм. Степень их параллельности определяется условием устойчивости образца. Специальных требований к шероховатости мест нагружения нет (допускается естественная шероховатость), так как образование и развитие лунок вдавливания обеспечивает стабильные и центричные условия нагружения.

в. Минимальные размеры образцов (в том числе, повторно используемых обломков) должны удовлетворять условиям возможности учета масштабного эффекта их прочности: площадь ожидаемой поверхности раскола должна вмещать не менее 12-15 структурных элементов породы и при этом составлять не менее 3 $см^2$, а в случае испытания слоистых, анизотропных пород или контактов слоев в плоскости контакта - не менее 5 $см^2$. Высота образцов (расстояние между точками нагружения) должна быть не менее 10 мм.

г. Максимальные размеры образцов должны соответствовать силовым возможностям испытательной аппаратуры. При этом площадь ожидаемой поверхности раскола не должна превышать 100 $см^2$.

д. Экстремальные линейные размеры ожидаемой поверхности раскола не должны отличаться более чем в пять раз.

Количество образцов, необходимых для определения прочности породы составляет не менее 8, а при использовании образцов правильной формы (кубы, цилиндры и т. п.) не менее 5 штук.

104. В связи с малой сопротивляемостью горных пород при раскалывании данным методом, для испытаний требуются малые нагрузки (до 1-2 тс) и легкие испытательные машины, в том числе иногда портативные и с ручным приводом. Для испытаний в полевых и лабораторных условиях применяют портативный пробник типа БУ-39 со встроенным динамометром ДОСМЗ-1 и ручным приводом (рис. 35). При использовании стационарной испытательной машины для сжатия необходимо нагрузочное приспособление - соосник БУ-11 (рис. 36), оборудованный встречно-действующими шариковыми инденторами диаметром 15 мм.

105. Испытываемый образец устанавливают между инденторами так, чтобы ось нагружения и поверхность ожидаемого раскола были необходимым образом ориентированы относительно направлений залегания породы, как это определено изложенными в п. 103 требованиями к форме и размерам образцов.

Нагружают образец до сквозного раскола, проходящего через ось нагружения. В случаях разрушения образца сколом по трещине от одной из точек нагружения к боковой поверхности образца испытание считают недействительным. Для предотвращения таких случаев следует стремиться располагать ось нагружения по наименьшему линейному размеру ожидаемого сечения сквозного раскола и в удалении от ближайшей боковой грани не меньшем половины расстояния между точками нагружения.

Скорость нагружения выбирают с учетом требований табл. 5.

Таблица 5

Разрушающая нагрузка		Время нагружения, с
кН	тс	
До 2	До 0,2	5-10
2-10	0,2-1	10-20
10-30	1-3	20-30
30-50	3-5	30-50
Свыше 50	Свыше 5	50-90

106. При испытании фиксируют максимальное раскалывающее усилие P (кгс) и площадь F ($см^2$) фактической поверхности раскола. Последнюю определяют, предварительно обведя контур поверхности карандашом на миллиметровой бумаге или, в случае испытания образцов правильной формы, обмерив образец. При разрыве

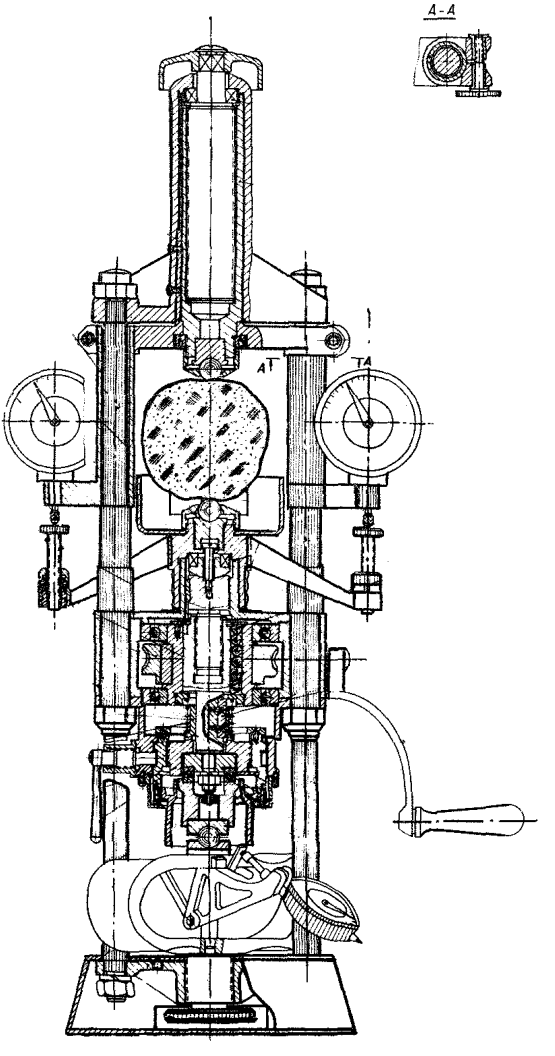


Рис. 35. Пробник БУ-39

образца на число частей больше двух (в общем случае на n частей) вычисляют расчетную величину площади поверхности сквозного разрыва (раскола) образца по формуле:

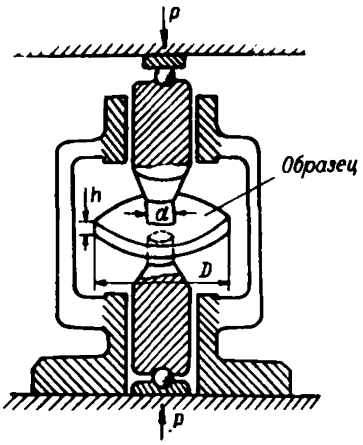


Рис. 36. Нагрузочное приспособление БУ-11 для испытаний соосными пуансонами



Рис. 37. Определение расчетной площади раскола образца

$$F = 2\,\frac{F_{o1} + F_{o2} + \ldots + F_{on}}{n},$$

где F_{o1}, $F_{o2}\ldots$, F_{on} – площади поверхностей по каждой образовавшейся трещине раскола (рис. 37).

Предел прочности при сжатии образца находят из выражения:

$$\sigma_{c(t)} = \frac{BPK_м}{F},$$

где $K_м$ – коэффициент, учитывающий масштабный эффект раскола и приводящий значение прочности к стандартной величине сечения 15 $см^2$, а B – коэффициент, учитывающий корреляцию пределов прочности при растяжении и при одноосном сжатии.

Коэффициент $K_м$ определяется в зависимости от величины площади F по формуле: $K_м = \sqrt[4]{\frac{F\ (см^2)}{15}}$ – или с использованием табл. 6.

Таблица 6

F, $см^2$	3	4	5	8	10	20
$K_м$	0,67	0,72	0,76	0,85	0,90	1,08
F, $см^2$	30	40	50	80	100	
$K_м$	1, 19	1, 28	1, 36	1, 52	1, 61	

Для коэффициента B принимаются следующие величины:
- при испытании аргиллитов и мергелей B = 12;
- то же алевролитов и известняков B = 15;
- то же песчаников глинистых B = 13,5;

- при испытании песчаников карбонатных B = 15,8;
- то же песчаников кварцевых B = 18,7;
- при испытании прочих угленосных пород и

при $\frac{PK_м}{F} \leqslant 13,3$ B = 9;

- то же при $\frac{PK_м}{F} > 13,3$ $B = 15 - \frac{80F}{PK_м}$;

- при испытании изверженных и метаморфических пород B = 18,7.

Предел прочности породы и коэффициент его вариации рассчитывают по результатам испытаний образцов согласно п. 91.

Метод соосных пуансонов

107. Метод применяется как нормальный по надежности (а в случае предусмотренного снижения надежности - как упрощенный) для испытаний пород, имеющих прочность в пределах 50-1200 кг/см^2. Эффективен при использовании в качестве проб пород буровых кернов, особенно при малом количестве кернового материала в пробе, что бывает при опробовании маломощных породных слоев. Метод рекомендуется применять при разведке угольных месторождений и геологоизыскательских работах при строительстве и реконструкции угольных шахт. Допущен к использованию на геологических работах в период эксплуатации шахт.

Метод является косвенным, в нем используется изученная в работах М. М. Протодьяконова, Г. Н. Кузнецова и Гун-Бень-и корреляция величин предела прочности пород при одноосном сжатии и показателей их прочности при объемном (трехосном) сжатии. Детально метод описан в работе Б. В. Матвеева "Руководство по механическим испытаниям горных пород методом соосных пуансонов"" (Л., ВНИМИ, 1960). Восемь-десять плоских породных дисков, вырезанных из керна, последовательно подвергают сжатию между плоскими торцами соосно расположенных, встречно направленных цилиндрических пуансонов по диаметру меньших, чем диски (рис. 38). Сжимаемая между пуансонами часть образца деформируется в условиях сопротивления свободному ее расширению со стороны остальной (охватывающей) части диска, т. е. в условиях трехосного сжатия. Образец плавно нагружают до разрушения, возникающего первоначально в его средней части (между пуансонами) от действия трехосносжимающих компонентов: давления пуансонов и реактивного отпора со стороны охватывающей части образца. Состояние объемного сжатия существенно снижает влияние структурно-масштабного эффекта на прочность породы. Непосредственно после разрушения средней части образца, как вторичное явление, под действием распора его обломков происходит разрыв охватывающей части.

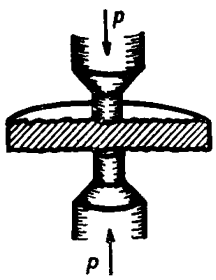


Рис. 38. Схема сжатия породного диска плоскими соосными пуансонами

108. В целях использования для испытаний всевозможных имеющихся породных буровых кернов без их перебуривания, диаметр испытываемых дисков допускается в широких пределах: 30–100 мм. Керны разрезают на диски толщиной 11–12 мм (в таких пределах толщина диска не влияет на результаты испытания). Это соответствует принимаемому для всех случаев одинаковому диаметру пуансонов – 11,27 мм (площадь давления – 1 $см^2$). Требования к плоскости и параллельности сторон диска – в пределах 0,03 мм; чистота их поверхности не ниже класса 9 по ГОСТ 2789–51. При этом рабочие торцы стальных каленых пуансонов должны быть также строго плоскими и параллельными, что достигается их совместной притиркой непосредственно в соосных направляющих нагрузочного приспособления типа БУ–11 (см. рис. 36). Если допустим более низкий уровень надежности, то для испытаний в качестве образцов могут быть использованы также некруглые породные пластинки, например, косые срезы керна, а также повторно используемые плоские обломки, образовавшиеся после испытания дисков, в количестве 4–6 штук.

Для проведения испытаний требуется источник нагрузки небольшой мощности (3–4 тс). Это дополнительно повышает доступность организации испытаний по сравнению с прямыми методами одноосного сжатия.

109. Диск при испытании устанавливают между пуансонами соосно с ними на глаз с точностью порядка 1 мм. Таков же допуск точности для величины эллипсности образцов и конусности их боковой поверхности. При использовании в качестве образцов пластинок некруглой формы за диаметр и центр приложения нагрузки принимают диаметр и центр окружности, вписанной в контур образца.

Скорость нагружения должна обеспечивать разрушение образца в течение 30–90 с от начала нагружения.

Разрушающее образец усилие (первая фаза разрушения) в прямой мере определяется диаметром (площадью давления) пуансонов и в обратной – диаметром породного диска, с которым связана мера отпора охватывающей части образца.

Величину предела прочности образца при одноосном сжатии рассчитывают в зависимости от разрушающего усилия P (кгс) и диаметра образца по формуле:

$$\sigma_{c(i)} = \frac{P}{A} ,$$

где величину A принимают согласно табл. 7.

Таблица 7

Диаметр образца, мм	30	40	50	60
Площадь А, $см^2$	1,52	1,79	2,03	2,26
Диаметр образца, мм	70	80	90	100
Площадь А, $см^2$	2,50	2,72	2,94	3,16

Предел прочности породы и коэффициент его вариации рассчитывают по результатам испытаний образцов согласно п. 91.

Метод одноосного сжатия образцов полуправильной формы

110. Метод основывается на применении ГОСТ 21153.4-75 "Породы горные. Метод комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании и сжатии". С необходимыми дополнениями и уточняющими нормативами он применяется в качестве упрощенного при разведке угольных месторождений, строительстве, реконструкции и эксплуатации угольных шахт. Метод эффективен применительно к испытаниям слабых, трещиноватых и расслаивающихся пород и углей, трудно поддающихся операциям по вырезке образцов правильной формы.

Одноосному сжатию между плоскими стальными плитами с применением подкладной сегментной или накладной шариковой пяты (рис. 39) подвергают 4-5 образцов испытываемой породы:

- неправильной или приближенно кубообразной формы образцы с подшлифовкой двух параллельных граней, используемых для приложения испытательной нагрузки;
- такие же образцы, полученные в результате поперечных расколов породных плоских плит с помощью стальных клиньев;
- цилиндрические с плоскими торцами образцы диаметром, превышающим установленный для описанных в пп. 92-97 методов одноосного сжатия.

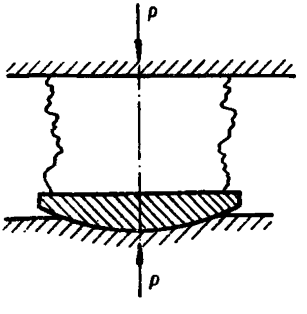


Рис. 39. Схема сжатия образца полуправильной формы

111. Погрешности от несоосности нагрузки образцу снижаются до допустимого уровня применением подкладной или накладной пяты со сферическим шарнирным сочленением. Соосность достигается установкой пяты на верхней или под нижней торцевыми поверхностями образца так, чтобы центр сферы располагался на глаз на одной вертикали с центром тяжести поверхности торца. В случае применения подкладной сегментной пяты в начале нагружения необходимо следить, чтобы к моменту касания верхним торцом давильной плиты машины они были параллельны, для чего необходимо рукой поворачивать сегмент. Форма породных образцов должна удовлетворять следующим условиям:

- непараллельность торцов должна быть не более 1 мм;
- центры тяжести поверхностей торцов, определяемые на глаз, должны располагаться друг над другом с допустимым отклонением не более 0,05 средней величины поперечного размера образца;
- площади торцов не должны отличаться одна от другой более чем в 1,5 раза.

112. Погрешности от неравномерности распределения по торцам нагрузочного усилия снижаются, если давильные поверхности выполняются калёными до твердости R_C = 54-56 и шлифованными по 8 классу чистоты (ГОСТ 2759-51) с допуском по плоскости 0,01 мм. Образцы также должны иметь плоские торцы, подшлифованные с допускаемой величиной отклонения от плоскости не более 0,05 мм.

113. Погрешности от возникновения трения между давильными поверхностями и расплющиваемыми торцами образца устраняются применением в расчете прочности каждого образца поправочного коэффициента, учитывающего зависимость прочности образца от соотношения его высоты и наименьшего из поперечных размеров, аналогично п. 96.

В связи с установленной областью надежного применения указанной поправки, методика ограничивает допустимое соотношение высоты образца к среднему значению наименьшего поперечного размера диапазоном 0,5-3,0 (для цилиндрических образцов - от 0,8 до 2,2). При этом все три взаимно перпендикулярных размера образца могут отличаться друг от друга не более чем в 3 раза.

114. Погрешности от проявлений масштабного эффекта учитываются настоящей методикой лишь путем установления предельных значений абсолютных размеров образцов: для неправильной формы и кубообразных образцов минимальный размер образца (безотносительно к направлению) 20 мм и максимальный 200 мм, а для диаметра цилиндрических образцов - от 60 до 120 мм. В связи со значительной нарушенностью боковой поверхности образцов полуправильной формы и заниженными требованиями центрирования нагрузки, при испытаниях настоящим методом, кроме разупрочняющего более крупные образцы эффекта влияния структурной неоднородности породы, проявляется "обратный" масштабный эффект снижения прочности у образцов малых размеров. Поэтому, принимая во внимание пониженный уровень

надежности метода, использование расчетной поправки на масштабный эффект не предусматривается.

115. Испытание породного образца плавно возрастающей до разрушения нагрузкой выполняют в режиме аналогичном ранее описанным методам, т. е. разрушение должно достигаться в течение 30-90 с от начала нагружения. Предел прочности образца вычисляется по формуле:

$$\sigma_{c(i)} = \frac{K_в P}{a_{ср} \; b_{ср}},$$

а для цилиндрических образцов

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

где $a_{ср}$ и $b_{ср}$ – средние значения поперечного размера образца, $K_в$ – коэффициент, принимаемый по табл. 4 в зависимости от величины соотношения его высоты и наименьшего из значений $a_{ср}$ и $b_{ср}$ или диаметра.

Предел прочности породы и коэффициент его вариации вычисляют по результатам испытаний всех образцов, согласно п. 91.

Метод толчения

116. Метод по уровню надежности является грубым и допущен к применению при разведке, строительстве, реконструкции и эксплуатации угольных предприятий только в случае технической невозможности использования иных методов (например, получения породных проб кусками недостаточной крупности вследствие измельчения при отборе). Метод пригоден лишь для испытаний невязких углей, а также пород, имеющих прочность не более 800 кг/см^2. Поэтому испытания углей данным методом должны сопровождаться петрографической оценкой наличия вязких компонентов.

Метод является косвенным и использует изученную М. М. Протодьяконовым корреляцию величин предела прочности горных пород при одноосном сжатии и показателей энергии их ударного измельчения (см. статью "Определение крепости угля в шахтах" в журнале "Уголь", 1950, № 9).

117. Испытаниям подвергают кусочки породы неправильной формы размером около 10x10x10 мм, набранные в 5 отдельных навесок по 40-80 г. Каждая из них последовательно подвергается испытанию в приборе типа ПОК: навеску помещают в стальной стакан диаметром 76 и высотой 760 мм и измельчают пятикратным сбрасыванием гири весом 2,4 кг с высоты 0,6 м. Всю образовавшуюся от толчения пяти навесок пыль просеивают сквозь сито с отверстиями 0,5 мм, засыпают в мерный цилиндр диаметром 23 и высотой 150 мм и после уплотнения легким постукиванием измеряют высоту

засыпки в миллиметрах. Прочность при сжатии находят по формуле:

$$\sigma_c = \frac{1,03}{h} \cdot 10^4, \quad кгс/см^2.$$

Для определения прочности породы описанное испытание повторяют 2-3 раза, причем в качестве окончательных принимают значения повторных испытаний, различающихся между собой не более чем на 25-30%.

Метод уплотнения породной мелочи

118. По уровню надежности метод является грубым и допущен к применению при разведке угольных месторождений, строительстве, реконструкции и эксплуатации угольных шахт только в случаях невозможности использования иных методов вследствие получения породных проб в виде мелочи размером 15-20 мм. Поэтому метод применим к слабым, трещиноватым и расслаивающимся, но не хрупким породам и углям.

Метод является косвенным и использует эмпирически установленную М. С. Пудовым для карагандинских алевролитов и аргиллитов корреляцию результатов испытания с пределом прочности при одноосном сжатии. В связи с недостаточной изученностью механизма разрушения и деформирования породы при испытаниях данным методом применение его для испытания иных пород нуждается в предварительной тарировке.

119. Испытаниям подвергают неправильной формы породные кусочки весом 5-20 г каждый (крупность 15-20 мм) в количестве 500-800 г. Кусочки плотно укладывают в стальной стакан внутренним диаметром 55,3 мм на высоту засыпки 53±1 мм и уплотняют на испытательном прессе плавным нажатием стального плунжера диаметром 55 мм до величины усадки 19 мм. При испытании происходит дробление и слеживание породы. Уплотнение производят с такой скоростью, чтобы заданное значение усадки достигалось в течение 30-60 с от начала нагружения, величина усилия P, кгс, соответствующая этому уплотнению, регистрируется. Прочность при сжатии определяют по формуле:

$$\sigma_{c(i)} = \frac{P}{24 \text{ см}^2}$$

Испытание повторяют (с новыми засыпками мелочи) 2-3 раза и в качестве прочности породы принимают полученные результаты, различающиеся между собой не более чем на 25-30%.

При тарировке метода для применения его к породам неизученных типов необходимо установить характерную величину усадки, при которой уплотняющее усилие удовлетворяет приведенной формуле.

Метод определения длительной прочности горных пород при одноосном сжатии

120. Метод является нормальным по уровню надежности (с учетом невысокой точности при использовании показателя длительной прочности). Мера доступности метода позволяет применять его в хорошо оснащенных лабораториях.

В основе метода лежит (см. Ю. М. Карташов "Ускоренные методы определения реологических свойств горных пород", М., Недра, 1973) установленная зависимость изменения объема горной породы при ее длительном деформировании от величины деформирующей нагрузки: при нагрузках, меньших предела длительной прочности деформирование сопровождается уплотнением породы, а при нагрузках, превышающих этот предел, разуплотнением, разрыхлением и, в результате достаточной длительности нагружения, разрушением.

121. Одноосному сжатию с помощью центрирующего нагрузочного приспособления последовательно подвергают 3–4 цилиндрических образца породы (см. рис. 32), которые могут отличаться друг от друга по размерам в пределах нормативов метода. Для породы должен быть предварительно определен (желательно, методом по пп. 92–97) предел прочности при одноосном сжатии.

Отношение высоты испытываемых образцов к диаметру принимается равным 1,9–2,1. Требования к диаметру испытываемого образца, центрированию нагрузки, качеству поверхности давильных плит и их размерам – по пп. 93–95. На образец, подготовленный к испытаниям на длительную прочность, укрепляются измерители продольных и поперечных деформаций (индикаторы часового типа, тензодатчики сопротивления, прижимные тензометры и т. п.)

122. Режим испытания заключается в следующем. К образцу прикладывается нагрузка, соответствующая 1–2% от прочности породы при одноосном сжатии (кратковременном). При этой нагрузке берутся начальные отсчеты продольных и поперечных деформаций, принимаемые в дальнейшем за нуль деформаций. Далее образец нагружают ступенями, соответствующими ступеням напряжения по 5–10% от предела прочности при одноосном сжатии, начиная от ступени, составляющей 20% от этого предела, с выдержкой каждой ступени нагрузки в течение 45–60 мин (при ступени нагрузки, равной 10% от δ_c) или 20–30 мин (при ступени нагрузки, равной 5% от δ_c). Измерение деформаций (продольных и поперечных) на каждой ступени нагрузки производят дважды: сразу после нагружения образца и после выдержки. Нагрузку на каждой ступени поддерживают постоянной. Нагружение образца ступенями проводят до его разрушения.

123. По результатам испытаний строят график, изображающий зависимость изменения объема образцов от нагружающего напряжения.

Предел длительной прочности σ_∞ определяется из выражения:

$$\sigma_\infty = \frac{\sigma' + \sigma''}{2},$$

где σ' – величина нагружающего напряжения, соответствующая максимальному уплотнению материала образца (минимальному объему образца), кгс/см^2; σ'' – величина нагружающего напряжения, соответствующая началу увеличения объема образца, кгс/см^2.

У1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

124. Горные породы, как и все хрупкие материалы, характеризуются значительно меньшей сопротивляемостью растяжению, чем сжатию. Отсюда, как указано, причина относительно малой изученности этого свойства. С другой стороны, вследствие малой сопротивляемости отрыву разрушение породного массива нередко вызывается именно растяжением. Прочность при растяжении играет существенную роль для оценок устойчивости кровли подземных выработок, прогибающейся при больших пролетах и отрывающейся при зависании.

Информация о сопротивляемости пород растяжению используется также при оценках хрупко-пластических свойств пород. В этих случаях сравнивают пределы прочности при растяжении и при одноосном сжатии: большая величина соотношения этих показателей свидетельствует о преобладании хрупких свойств породы над пластическими.

Под пределом прочности при растяжении $\sigma_р$ понимают величину главного напряжения (в кгс/см^2 или МПа) одноосно и однородно растягиваемой породы, при котором достигается ее разрушение – разрыв.

125. Получение в испытываемых образцах горных пород однородного напряженного состояния растяжения путем прямого растягивания породных стержней захватами испытательной машины (подобно испытаниям сравнительно пластичных металлов) встречает затруднения вследствие проявления следующих погрешностей (рис. 40):

– изгиба породного стержня вследствие несоосности, а иногда и непараллельности захватов машины;

– возникновения в стержне у краев захватов местных концентраций контактных напряжений со значительными растягивающими компонентами.

По указанным причинам прямое растяжение породных стержней всегда давало систематически заниженные значения прочности при растяжении со значительной вариацией показателя прочности, зависящей от меры проявления указанных погрешностей. В худших случаях образец разрушался при закреплении в захватах еще до приложения растягивающего усилия испытательной машины или при ничтожно малом его значении.

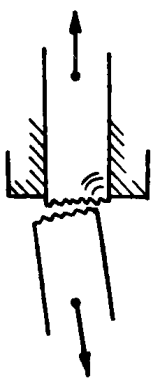


Рис. 40. Разрушение растягиваемого образца при несовершенстве контакта с захватом

Попытки использовать образцы с утолщенными концами при прямом растяжении захватами хотя и снижали значимость второй погрешности, но не устраняли первой и во всех случаях были связаны с трудностью изготовления образцов, причем представительность породы утрачивалась вследствие нарушения ее строения при вырезке.

Сложность подготовки образцов для испытаний прямым растяжением и требуемые значительные размеры этих образцов существенно ограничивают доступность этого способа. Поэтому практически широко используются и рекомендуются к применению значительно более простые косвенные методы, основанные на возникновении растягивающих напряжений в зоне приложения к образцу различных сосредоточенных нагрузок. При этом разрушение породы происходит в форме раскола образца растягивающими напряжениями по плоскости, включающей линию действия нагружающей силы. Косвенный характер методов раскалывания обусловлен механизмом нагружения образца, т. е. видом количественной связи растягивающих напряжений с нагружающим контактным усилием. Для истолкования механизма нагружения привлекают закон деформируемости породы в области растяжения, который, однако, далеко не всегда надежно установлен и применим для данного случая. Поэтому проверку надежности и установление условий применения этого закона и нормативов косвенного метода испытаний осуществляют тарировкой – опытным сравнением с результатами испытаний эталонным методом прямого растяжения.

126. Имеющиеся в настоящее время ГОСТ 21153.3-75 "Породы горные. Метод определения предела прочности при растяжении" и ГОСТ 21153.4-75" "Породы горные. Метод комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании и сжатии" не в полной мере удовлетворяют основным требованиям представительности, надежности и доступности испытаний применительно к работам геологических и изыскательских организаций Минуглепрома СССР. Неопределенность некоторых нормативов этих методов делает их метрологически неприемлемыми, а использование для испытаний образцов лишь правильной и полуправильной формы ограничивает область фактически доступного применения стандарта породами, допускающими изготовление таких образцов. Поэтому далее приведены описания и нормативы апробированных и применяющихся методов испытания предела прочности при растяжении, включая и стандартные методы, уточненные соответствующими дополнительными нормативами.

Метод прямого растяжения кернов

127. Метод применяется в качестве эталонного для проверки других методов, определения их погрешностей и установления надежности и, в связи с этим, уточнения их нормативов. Область применения метода, в связи с его малой доступностью, ограничена метрологическими работами научно-исследовательских и некоторых хорошо оснащенных геологоразведочных организаций. Метод пригоден для испытаний пород с пределом прочности при растяжении от 5 до 200 кгс/см^2.

128. Одноосному и однородному растяжению плавно возрастающим усилием до разрыва подвергают цилиндрические образцы диаметром d в пределах 30-43 мм и длиной $(1,2-2)d$ + 45 мм. Строго центрированная передача образцу испытательного усилия осуществляется посредством специальных цилиндрических захватов, помещенных в точные цилиндрические направляющие (рис. 41). Исключение указанных погрешностей достигается применением в захватах контактных условий, обеспечивающих молекулярное сцепление захватываемых концевых частей с легкоплавким сплавом Вуда (температура плавления около 60°С), заливаемым в зазор захватов, причем последние вставлены в упомянутые направляющие. Этим фиксируется строго поступательное перемещение вдоль направляющей обеих концевых частей образца, предотвращая их перекосы и изгибание образца.

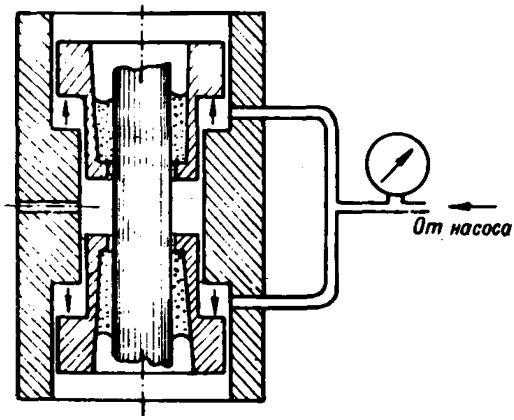


Рис. 41. Нагрузочное устройство для одноосного растяжения породного цилиндра

Источником испытательного усилия является давление жидкости (масла), нагнетаемой регулируемым насосом в пространство над заплечиками захватов. Нагружение производится с такой скоростью, чтобы разрушение (поперечный разрыв образца) осуществлялось в течение 30-60 с от начала нагружения. Величина разрушающего усилия регистрируется по максимуму показания манометра в гидросистеме. Предел прочности образца при растяжении вычисляется по формуле:

$$\sigma_{p(i)} = p\left(\frac{43}{d}\right)^2,$$

где i – номер образца из общего числа 10-12 штук. Число 43 в приведенной формуле учитывает площадь заплечиков захватов, воспринимающую давление масла.

Для определения предела прочности породы испытаниям подвергают 8–10 ее образцов, а результаты обрабатывают согласно п. 91.

Метод раскалывания цилиндрических образцов по образующей

129. Метод основывается на применении ГОСТ 21153-75 "Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном растяжении". С необходимыми добавочными уточняющими нормативами применяется как нормальный по надежности для массовых испытаний при разведке угольных месторождений, строительстве и реконструкции угольных шахт; допущен к использованию на геологических работах при эксплуатации шахт.

Метод основан на решении задачи Герца об упругом напряженном состоянии диска, сжимаемого по диаметру встречно направленными силами. По первой публикации Ф. Карнейро и А. Берцеллоса метод часто называют "бразильским". Уточняющие стандарт нормативы метода обоснованы в работе Ю. М. Карташова и др. "Методические указания по испытаниям горных пород на растяжение путем сжатия цилиндрических образцов по образующей" (Л., ВНИМИ, 1969).

130. Образцы (8–10 цилиндрических отрезков керна) последовательно подвергают сдавливанию плавно возрастающими встречно направленными усилиями, равномерно распределенными вдоль двух диаметрально противоположных образующих цилиндра (рис. 42). В теле образца возникают однородные растягивающие напряжения, достигающие наибольшего значения в продольном сечении, лежащем в плоскости действия усилий. По этому сечению и реализуется разрушение – раскол образца на две половинки. Вторые главные напряжения в точках этого сечения неодинаковы и являются сжимающими. Однако, в силу меньшей сопротивляемости пород растягивающим напряжениям, компонент сжатия практически не влияет на достижение разрушения образца.

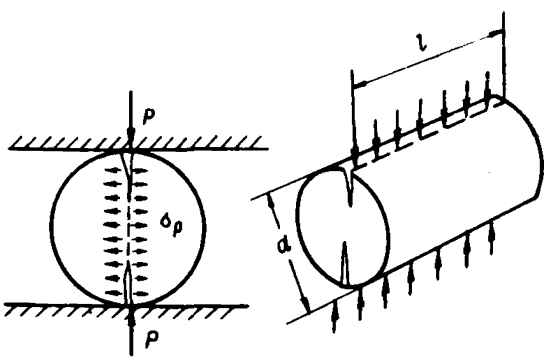


Рис. 42. Схема нагружения при испытании на растяжение "бразильским" методом

131. Нагрузка прикладывается к образцу "ножами" с радиусом закругления 1,5 мм (нагружение одной из образующих допускается касающейся плоскостью). Центрирование нагрузки обеспечивается следующими условиями:

- свободой поворота "ножа" в плоскости действия нагрузки.
- наличием плоских лысок шириной 3–5 мм по нагружаемым образующим образца.

Соблюдение этих условий позволяет существенно снизить требования к ряду элементов геометрии образца:

- эллипсность сечения и шероховатость боковой поверхности – в пределах 0, 5 мм;
- поверхности торцов допускаются неправильные, с отклонением от перпендикулярности к оси до 4 мм;
- отклонение нагружаемых образующих от диаметра образца – до 0,5–1 мм.

Расположение на образце нагружаемых лысок должно быть ориентировано относительно направлений залегания породы (по напластованию, вкрест напластования) в соответствии с задачей испытаний.

Испытание ведется с использованием нагрузочного приспособления, например, типа БУ-11 (рис. 43), обеспечивающего:

- установочное устойчивое лежачее положение образца одной из лысок на опорной (стальной) плоскости,
- исходное расположение раскалывающего "ножа" вдоль другой лыски образца,

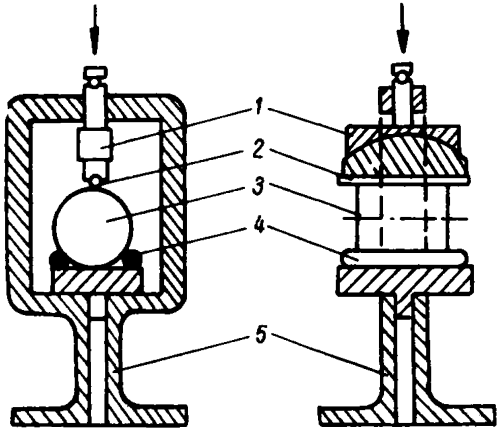


Рис. 43. Нагрузочное приспособление БУ-11 для испытаний "бразильским" методом:

1 – шарнирное устройство,
2 – стержень, 3 – образец,
4 – резиновый ограничитель,
5 – корпус

- направление нагрузочного движения раскалывающего ножа – радиальное относительно образца (вертикальное),
- степень свободы ориентировки (наклона) лезвия "ножа" в плоскости раскалывания,
- предусмотренный радиус закругления "ножа" и легкую сменяемость его лезвия, выполненного из стальной каленой проволоки, при затуплении после многократного использования,
- удобство работы при испытаниях, в том числе защиту испытателя от разлета осколков и т. п.

Нагружают образец с такой скоростью, чтобы разрушение достигалось в течение 30-60 с от начала нагружения.

132. Величину предела прочности образца рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{p(i)} = \frac{0,64P}{d\,l},$$

где P - раскалывающее значение усилия, кгс; d - диаметр образца, принимаемый в пределах 3-6 см; l - длина образца, в пределах 0,6-1,1 диаметра.

Использование этой формулы предполагает применимость теории упругости к горным породам вплоть до нагрузок, соответствующих разрушению породы от отрыва. Это допущение обусловливает косвенный характер метода испытаний и необходимость его опытного сопоставления с эталонным прямым методом. Приведенный норматив для длины образца основан на результатах такого сопоставления: за пределами этого норматива расхождения результатов испытаний эталонным и "бразильским" методами выходят за рамки требований надежности.

Среднее значение предела прочности породы и коэффициент его вариации вычисляют по результатам испытаний всех ее образцов согласно п. 91.

Метод раскалывания сферическими инденторами образцов произвольной формы

133. Метод является нормальным по уровню надежности. Испытания этим методом весьма нетрудоемки, а при использовании предусмотренной портативной аппаратуры БУ-39 (см. рис. 35) метод доступен для применения в лабораторных, полевых и шахтных условиях. Он рекомендуется для проведения массовых испытаний при разведке угольных месторождений, строительстве, реконструкции и эксплуатации угольных шахт.

Механизм нагружения и разрушения породного образца при испытании данным методом описан в п. 101, а более детально - в работе Г. Б. Михеева "Методические указания по комплексным определениям прочностных и деформационных характеристик горных пород" (Л., ВНИМИ, 1973). Однако ненадобность использования упомянутых в пп. 101 и 104 корреляционных зависимостей прочности пород при сжатии и растяжении обеспечивает более высокую надежность метода.

134. Для определения предела прочности породы при растяжении предусмотрено испытание 8-10 ее образцов. Требования к форме и размерам образцов, применяемое оборудование, порядок испытаний и режим приложения испытательных нагрузок - вполне аналогичны таковым при испытаниях на сжатие, однако предел прочности образ-

ца при растяжении определяется по формуле:

$$\sigma_{p(i)} = \frac{0,75\,PK_м}{F},$$

где $K_м$ – коэффициент, учитывающий масштабный эффект влияния величины площади поверхности раскола на определяемый показатель. Значение этого коэффициента приближенно оценивается по табл. 6 или выражением:

$$K_м = \sqrt[4]{\frac{F\ см^2}{15}}.$$

Предел прочности породы и коэффициент его вариации вычисляют согласно п. 91 по результатам испытаний всех образцов.

Метод раскалывания породных плит клиньями

135. Метод основывается на применении ГОСТ 21153.4-75 "Породы горные. Метод комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании и сжатии". С необходимыми добавочными уточняющими нормативами метод применяется в качестве упрощенного при массовых испытаниях, комплексно, в сочетании с методом определения прочности при одноосном сжатии образцов полуправильной формы (см. пп. 107-112. Метод допущен к применению при разведке угольных месторождений, а также на геологических работах при эксплуатации шахт. Его разработка изложена в книге А. И. Берона и др. "Методика определения прочности горных пород в образцах полуправильной формы" (М., ИГД им. А. А. Скочинского, 1973).

Метод заключается в многократном поперечно направленном раскалывании клиньями породных образцов в виде пластин с двумя плоскопараллельными гранями любых очертаний в плане (в том числе дисков, образованных поперечной разрезкой керна). Механизм раскола тот же, что и при использовании "бразильского" метода, однако, строгого анализа напряженного состояния образца пока не имеется.

136. Раскалываемые пластины должны иметь толщину в пределах 20-40 мм (для малопрочных пород допускается до 70 мм), причем отклонение от параллельности плоских сторон допускается не более 1 мм на 100 мм размера пластины в плане, а выпуклость или вогнутость – не более 0,001.

Пластина раскалывается последовательно по предварительно расчерченной на ее плоской поверхности сетке с расчетом на минимальную длину (ширину) раскола, которая должна быть примерно равна толщине пластины. Образовавшиеся после испытания обломки кубообразной формы могут быть использованы для определения

прочности при одноосном сжатии как образцы полуправильной формы с плоскими основаниями. Всего для испытаний породы на растяжение требуется выполнить 8-10 расколов.

Раскалывающая нагрузка прикладывается двумя встречными параллельными клиньями с радиусом притупления 3 мм (используют стальные каленые прутки диаметром 6 мм). Нагружение должно осуществляться с такой скоростью, чтобы разрушение достигалось за 10-60 с.

137. Величину предела прочности образца при растяжении рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{p(i)} = \frac{KP}{F},$$

где P - раскалывающее усилие, кгс; F - площадь раскола, $см^2$; K - коэффициент, учитывающий "обратный" масштабный эффект, обусловленный технологическим разупрочнением поверхностей раскола и принимаемый согласно табл. 8 в зависимости от величины площади раскола образца.

Таблица 8

F, $см^2$	4	9	16	25	36	49	64
K	0,74	0,83	0,90	1,00	1,10	1,15	1,22
F, $см^2$	81	100	121	144	169	196	225
K	1,30	1,37	1,44	1,52	1,58	1,64	1,71

Среднее значение предела прочности породы и коэффициент его вариации вычисляют по результатам всех расколов, согласно п. 91.

Метод поперечного раскалывания породных кернов клиньями

138. Метод применяется в качестве упрощенного, а при определении прочности в плоскости структурного контакта - в качестве грубого. Рекомендуется к применению при разведке угольных месторождений, строительстве, реконструкции и эксплуатации угольных шахт. Основы метода разработаны С. Т. Кузнецовым и др. в работе "Методическое пособие по изучению слоистости и прогнозу расслаиваемости осадочных пород" (Л., ВНИМИ, 1967).

Кусок породного керна диаметром в пределах 30-100 мм и длиной, превышающей диаметр не менее чем в 1,2-1,5 раза сдавливают до раскалывания между встречно направленными лезвиями двух параллельных клиньев. Угол между осью керна и плоскостью раскалывания выбирают в пределах 40-90° в зависимости от желаемой ориентировки определяемого показателя относительно направления

залегания породы. Раскол может осуществляться также и по плоскости структурного ослабления породы. Механизм раскола в деталях не изучен, однако он близок к описанному выше для иных методов раскола образцов. Для проведения испытания породы требуется 3-4 ее образца или же керн длиной, позволяющей обеспечивать выполнение трех-четырех повторных отколов.

139. Приложение испытательной нагрузки производится плавно, как указано для других методов раскола образцов. Предел прочности при растяжении образца рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{p(i)} = \frac{kP}{F},$$

где значения коэффициента к, полученные опытным путем, принимаются следующими:

- для поверхностей структурного контакта	1,00
- для ненарушенных поверхностей керна песчаников	0,93
- то же алевролитов	0,88
- то же аргиллитов	0,83

Среднее значение прочности породы и коэффициент его вариации определяется согласно п. 91. Однако для грубого определения прочности по структурному контакту, вследствие малого числа образцов, принимают результаты испытаний, различающиеся между собой не более чем на 25-30%.

УII. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБЪЕМНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

140. Испытания горных пород и определение показателей их объемной прочности в настоящее время не входят в состав работ геологических и изыскательских организаций Минуглепрома СССР главным образом по причине трудоемкости этих испытаний и необходимости использования довольно сложных устройств, не изготовляемых отечественной промышленностью. Тем не менее, значимость показателей объемной прочности в развитии геомеханических процессов при ведении горных работ весьма существенна. Например, устойчивость бортов карьеров и отвалов, а также широких (по отношению к высоте) целиков обусловлена близостью их напряженного состояния к предельным значениям объемной прочности породы в слагающем их массиве.

141. Объемная прочность горной породы представляет собой характеристику механической разрушаемости ее объемными (трехосными) нагрузками, т. е. при действии напряженных состояний с главными компонентами неравными нулю:

$$\sigma_1 \neq 0; \qquad \sigma_2 \neq 0; \qquad \sigma_3 \neq 0.$$

Объемная прочность пород при напряженных состояниях с растягивающими компонентами пока не изучена. Условия же сопротивляемости пород разрушению при объемном сжатии хорошо соответствуют теории О. Мора: сдвиговое разрушение породы возникает при характерных для этой породы предельных значениях сочетаний касательных и нормальных сжимающих напряжений на площадках возникающих трещин сдвига. Совокупность этих сочетаний изображается предельной кривой в осях "нормальные напряжения - касательные напряжения", называемой паспортом объемной прочности породы (рис. 44). При близости паспорта прочности или представляющих интерес его участков к прямолинейному очертанию используют численные значения параметров паспорта прочности - угол наклона ρ к оси нормальных напряжений, называемый углом внутреннего трения (тангенс этого угла называют коэффициентом внутреннего трения), и отрезок С, отсекаемый на оси касательных напряжений и называемый коэффициентом сцепления (выражается в кгс/см^2 или МПа). При выраженном криволинейном очертании паспорта прочности показатели сцепления и угла внутреннего трения применяют для характерных участков паспорта, приближенно спрямляемых.

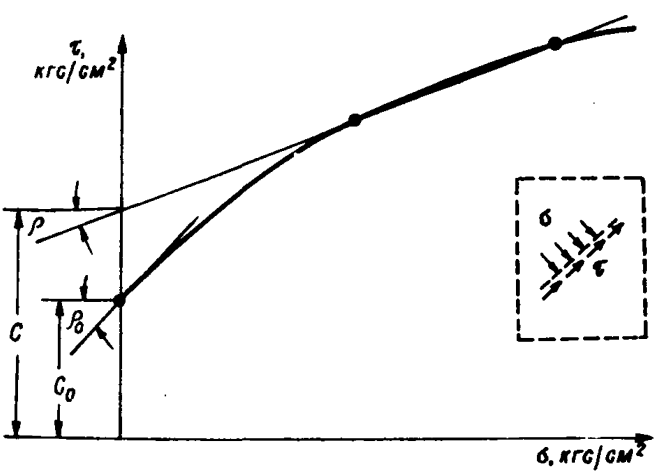


Рис. 44. Показатели паспорта объемной прочности:
С - сцепление, кгс/см^2; ρ - угол внутреннего трения

142. Разрушение объемно сжимаемой породы при значительных величинах соотношения минимального и максимального главных компонентов сжимающей нагрузки (т. е. в условиях близких к одноосному сжатию) имеет характер сдвига по одной или малому числу выраженных трещин, наклоненных к направлениям главных нормальных

напряжений. Соотношение касательных и нормальных напряжений на площадках сдвига при этом велико. Разрушение породы при уменьшающихся величинах соотношения главных сжимающих компонентов нагрузки (продольное сжатие при значительном боковом обжатии) сопровождается увеличением числа трещин сдвига, вплоть до рассредоточения микросдвигов по всему объему породы, внешне проявляющегося в форме пластической и квазипластической деформации (рис. 45).

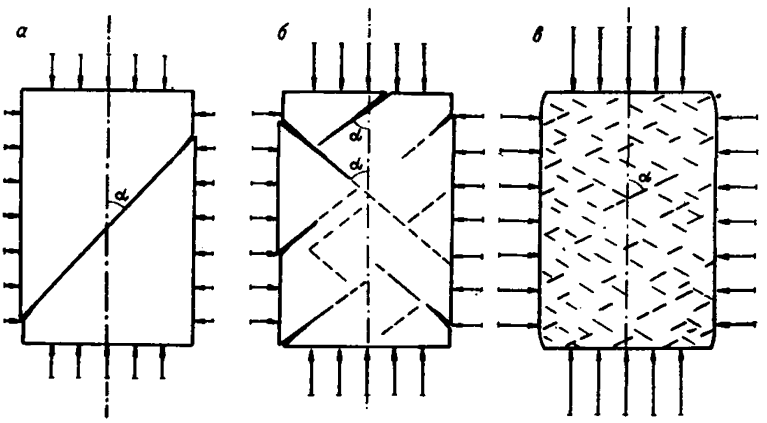


Рис. 45. Разрушение образца трехосно-сжимающими нагрузками при значениях бокового давления:

а - малых, б - промежуточных, в - высоких

Для определения показателей объемной прочности при сжатии горных пород путем прямых испытаний породные образцы подвергают либо нагружению по задаваемому сечению сдвиговыми и сжимающими компонентами нагрузки, либо путем нагружения внешней поверхности образца трехосносжимающими нагрузками с различающимися по величине компонентами сжатия.

Метод трехосного сжатия в стабилометре

143. Метод применяется в качестве эталонного, а при смягчении нормативов используется также и в качестве метода с нормальным уровнем надежности.

Метод основан (впервые - разработка Т. Кармана) на том, что график паспорта объемной прочности породы в осях "нормальные напряжения - касательные напряжения" ограничивает область предельных напряженных состояний, разрушающих породу, огибая предельные круги Мора. Каждый предельный круг строится на отрезках

оси нормальных напряжений, равных минимальному и максимальному главным напряжениям сжатия (см. рис. 7).

Для проведения испытаний данным методом требуется наличие специального нагрузочного устройства – стабилометра. Отсутствие серийного выпуска необходимых стабилометров и сложность их изготовления существенно снижают доступность метода.

144. В стабилометре (рис. 46) цилиндрический образец породы, помещаемый в герметичной камере, нагружается со стороны торцов осевым давлением σ_1, как и при испытаниях на одноосное сжатие. Для этого конструкция стабилометра включает гидравлический (или иной) пресс осевого давления. Со стороны боковой поверхности образец нагружается гидростатическим давлением $\sigma_2 = \sigma_3$ жидкости, нагнетаемой в герметичную камеру. Таким образом, схема нагружения в стабилометре характеризуется выражением:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3.$$

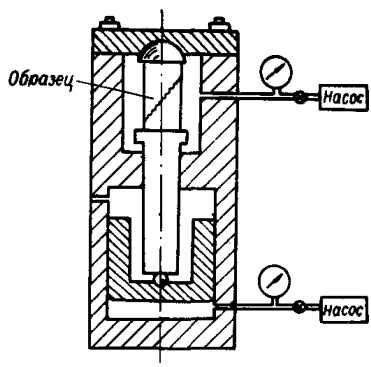


Рис. 46. Схема устройства стабилометра

Для проведения огибающей требуется построить по результатам испытаний породы достаточное число различных предельных кругов Мора, т. е. испытать соответствующее число породных образцов при различных сочетаниях компонентов нагрузки.

145. Порядок испытаний изложен в работе Б. В. Матвеева и др. "Руководство по проведению испытаний объемной прочности на сжатие горных пород" (Л., ВНИМИ, 1964). Режим испытания предусматривает плавное возрастание осевой нагрузки на образец до его разрушения при поддержании постоянного заданного бокового давления.

Различные образцы породы подвергают такому испытанию при различном боковом давлении. При этом боковые давления назначают с учетом их представительности для конкретных горнотехнических условий и возможного разброса определяемых показателей, вызванного неоднородностью породы. Всего испытаниям подвергают 8–12 цилиндрических образцов породы диаметром 30–50 мм и высотой в пределах 60–80 мм. Требования к ним такие же, как при испытаниях цилиндрических образцов на одноосное сжатие. Однако, во избежание проникновения давильной жидкости (масла) в поры образца, его поверхность предварительно покрывается клеем № 88, образующим после высыхания непроницаемую резиновую пленку.

В результате испытания каждого образца регистрируют разрушающую пару значений бокового и осевого давлений и строят круг Мора.

Коэффициенты сцепления и внутреннего трения определяют графически, строя всю совокупность кругов Мора и проводя на глаз огибающую (рис. 47). Если диапазон боковых давлений, применявшихся

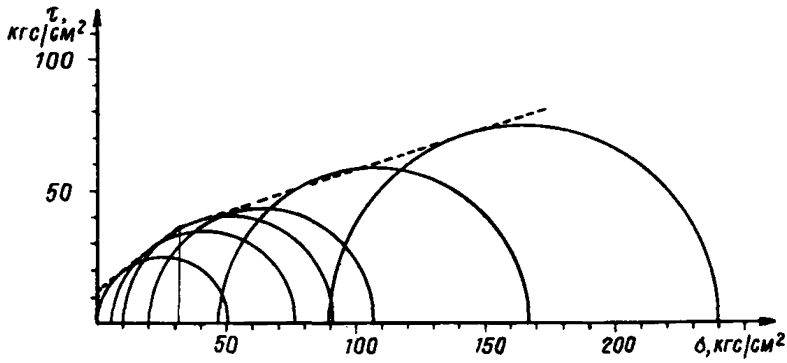


Рис. 47. Пример определения прочности песчаника глинистого (Яковлевское месторождение КМА, глубина 331,9 м)

при испытаниях различных образцов породы, невелик по сравнению со значениями соответствующих разрушающих осевых давлений, круги Мора на графике ложатся близко друг к другу и провести к ним огибающую на глаз бывает затруднительно. Существенный разброс испытаний еще больше осложняет эту глазомерную операцию. В этом случае бывает целесообразно выражать паспорт графически в осях главных напряжений (см. рис. 8), где результат испытания каждого образца представляется не кругом Мора, а точкой; совокупность таких точек легче поддается осреднению как глазомерно, так и аналитически (используя метод наименьших квадратов). При существенной нелинейности паспорта прочности его график расчленяется, как описано в п. 36, на характерные прямолинейные участки и для каждого из них вычисляются показатели сцепления и внутреннего трения.

Метод косого среза

146. Метод основан на применении ГОСТ 21153.5-75. "Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе". Предложен Г. Л. Фисенко в работе "Определение сцепления и угла внутреннего трения полускальных горных пород Коркинского месторождения" ("Тр. ВНИМИ", сб. 27, М.-Л., Углетехиздат, 1953). По уровню надежности метод является упрощенным, однако его доступность для испытаний крепких горных пород существенно ограничена тем, что необходимо применять мощное (не менее 300 тс) испытательное оборудование.

Метод в рекомендуемом виде изложен в работе Б. В. Матвеева "Методика лабораторного определения прочности горных пород на

сдвиг (срез)". (Л., ВНИМИ, 1961). Он основан на прямом осуществлении разрушения среза образца от одновременного действия задаваемых нормальных и касательных напряжений в фиксированном сечении. Это сечение определяется плоскостью разъема стальных полуматриц, вмещающих образец и сдвигаемых друг относительно друга вдоль плоскости разъема. Значения нормальных и касательных напряжений определяют разложением равнодействующей нагружающего усилия на касательную и нормальную относительно плоскости разъема составляющие, для чего задают значение угла α между направлением нагружающего усилия и плоскостью разъема (рис. 48).

Разные точки кривой паспорта объемной прочности получают, используя матрицы с различными углами разъема α. В наиболее упрощенном случае применяют два комплекта матриц с углами наклона разъема 45 и 30°, что дает возможность получить две точки паспорта прочности и аппроксимировать последний прямой линией, проходящей через эти точки. Для учета неоднородности породы каждая точка определяется по испытаниям трех-четырех образцов-дублеров.

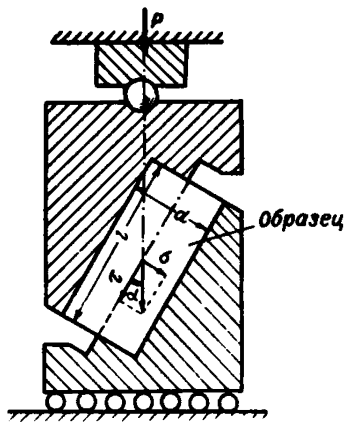


Рис. 48. Схема испытания по методу косого среза

147. Для обеспечения надежности и представительности методики испытаний важно хорошее прилегание образца к стенкам полуматриц. Это достигается цилиндрической формой образцов и применением сменных полуцилиндрических вкладышей в полуматрицы, подбираемых строго по диаметру образца. Нагружающее усилие центрируется относительно центра тяжести срезаемого сечения с помощью шарнира над верхней полуматрицей и роликовой постели под нижней. Тем не менее, анализ напряженного состояния образца показывает наличие резких концентраций напряжения, существенно снижающих точность метода.

Испытаниям подвергаются образцы диаметром 42–43 мм и высотой 65–70 мм с перпендикулярно отрезанными и шлифованными торцами. Постоянное соотношение между компонентами напряжения определяет пропорциональность нагружения. Режим нагружения предусматривает плавное увеличение нагружающего усилия, при котором срез достигается в течение 10–60 с.

148. Полное разрушающее образец напряжение, включающее нормальную и касательную составляющие, рассчитывают по формуле:

$$q_\alpha = \frac{P}{d\,h},$$

где P – разрушающее усилие, кгс; d – диаметр образца, см; h – высота образца, см.

Величину полного разрушающего напряжения для каждого угла наклона q_{45} и q_{30} усредняют по результатам испытаний образцов под этим углом. Усредненные величины q_{45} и q_{30} откладывают от начала координат "нормальные напряжения – касательные напряжения" соответственно под углами 45 и 30° от оси касательных напряжений (рис. 49). Паспортом прочности является линия, проходящая через концы этих радиусов-векторов. Параметры паспорта прочности определяют графически или по формулам:

$$C = \frac{0{,}518\, q_{45}\, q_{30}}{1{,}414\, q_{45} - q_{30}};$$

$$\operatorname{tg}\rho = \frac{1{,}414\, q_{45} - 1{,}732\, q_{30}}{1{,}414\, q_{45} - q_{30}}.$$

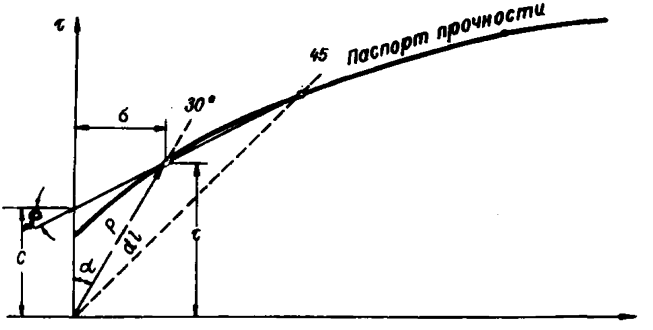


Рис. 49. Построение паспорта прочности по результатам косого среза

Метод одноосного сжатия цилиндров различной высоты

149. По уровню надежности метод относится к грубым, он доступен для применения в лабораторных условиях разведочных организаций при испытании пород с пределом прочности при одноосном сжатии от 400 до 900 кгс/см^2.

Разработка метода представлена в работе Ю. М. Карташова и А. А. Грохольского "Упрощенный способ определения показателей объемной прочности горных пород" (В журнале" "Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых", 1974, № 3).

Метод основан на том, что при одноосном сжатии цилиндрических образцов в условиях трения их торцов о давильные плиты значение разрушающей нагрузки в обратной мере зависит от величины отношения его высоты и диаметра (h/d). Эта зависимость обусловлена мерой взаимного налегания в образце его приторцовых зон трехосного сжатия (см. п. 65). Величина бокового компонента напряжения в образце, обусловленного этим трением, различна на различном удалении от торца. Боковое напряжение, определяющее условие разрушения образца, может быть названо величиной эквивалентного бокового давления. Значение величины эквивалентного бокового давления в кгс/см^2, установленное сопоставительными испытаниями, равно

$$q_э = f(h/d) = 70\sqrt{\frac{4P}{\pi d^2 \sigma_c} \cdot \ln\left(\frac{4P}{\pi d^2 \sigma_c}\right) \cdot \ln\left(\frac{2d}{h}\right)},$$

где σ_c – предел прочности при сжатии образца породы с отношением $h/d = 2$; P, h, d – соответственно, разрушающая нагрузка в кгс, высота и диаметр в см испытываемого образца при $h/d < 2$.

150. Испытаниям подвергают цилиндрические образцы с отношением высоты к диаметру (h/d), равным 2; 1,5; 1; 0,5; 0,3. Допускается использование образцов и с промежуточными значениями этого отношения. Стабильные условия трения торцов обеспечивают их обработкой (отрезкой, шлифовкой), с соблюдением обычных нормативов методики испытаний на одноосное сжатие, или же путем жесткой заделки (склеивания) торцов образца с давильными плитами (например, эпоксидной смолой). Испытания ведутся как обычно для одноосного сжатия. Результатом испытания каждого образца являются осевое давление, определяемое делением разрушающего усилия на площадь сечения, и эквивалентное боковое давление, рассчитываемое по формуле п. 149. Оба эти значения являются главными напряжениями, определяющими круг прочности Мора для данного образца или соответствующие координаты точки в осях главных напряжений. Совокупность же кругов (точек) для перечисленного ряда образцов позволяют построить паспорт прочности, как и при проведении испытаний с использованием стабилометров.

Расчетный метод М. М. Протодьяконова

151. По надежности метод является грубым, однако его применение требует не специальных испытаний, а лишь использования данных о пределах прочности породы при одноосном сжатии и при растяжении.

Метод основан на изученной М. М. Протодьяконовым (младшим) в работе "Обобщенное уравнение к предельным кругам напряжений

Мора" (В сборнике "Исследования физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением" М., Изд-во АН СССР, 1962) зависимости параметров паспорта объемной прочности и этих пределов прочности, причем для паспорта прочности эмпирически установлено аналитическое выражение:

$$\tau = \tau_{max}\left[\frac{(\sigma + \sigma_p)^2}{a^2 + (\sigma + \sigma_p)^2}\right]^{3/8},$$

где τ и σ – значения текущих координат (касательные и нормальные напряжения, τ_{max} и a – величины, зависящие от отношения σ_c / σ_p для данной породы (имеются табличные значения).

Таблица 9

Расчетные значения показателей объемной прочности (по М. М. Протодьяконову)

Величина уровня напряженного состояния ($\sigma_1 : \sigma_c$)	Показатель объемной прочности	Хрупкость породы ($\sigma_c : \sigma_p$)				
		5	10	15	20	25
0	ρ^0	45	57	63	66	68
	$C : \sigma_c$	0,28	0,20	0,17	0,15	0,14
1	ρ^0	40	52	58	61	63
	$C : \sigma_c$	0,30	0,22	0,18	0,16	0,15
2	ρ^0	31	46	52	55	58
	$C : \sigma_c$	0,38	0,27	0,23	0,21	0,19
3	ρ^0	20	41	47	51	54
	$C : \sigma_c$	0,62	0,36	0,32	0,28	0,28
4	ρ^0	12	37	44	48	50
	$C : \sigma_c$	0,93	0,47	0,41	0,38	0,36
5	ρ^0	6	33	41	45	48
	$C : \sigma_c$	1,18	0,61	0,50	0,46	0,43

Использование этой зависимости позволяет по величине отношения $\sigma_c : \sigma_p$ (характеризующего хрупкость породы) дать аналитическое выражение паспорта прочности, а также приближенно определить коэффициенты сцепления и углы внутреннего трения для любых точек кривой паспорта прочности, т. е. для соответствующих уровней напряженного состояния. В табл. 9 приведены расчетные величины этих показателей для пород с хрупкостью в пределах $\sigma_c : \sigma_p$ = 5-25 и для напряженных состояний с максимальным главным напряжением от 0 до $6\sigma_c$ (расчеты выполнены в институте Якутнипроалмаз).

Метод определения показателей длительной объемной прочности пород

152. Метод по надежности является упрощенным. Основой метода являются установленные ВНИМИ для различных типов горных пород закономерности их длительного деформирования при объемном сжатии, в частности, независимость угла внутреннего трения пород от длительности действия нагрузки (Карташов Ю. М. "Методические указания по ускоренным лабораторным испытаниям горных пород на длительную прочность". Л., ВНИМИ, 1966).

Исходным материалом для расчета показателей длительной объемной прочности пород являются результаты кратковременных испытаний образцов пород на объемную прочность согласно пп. 143-151 и результаты определения длительной прочности тех же пород на одноосное сжатие согласно пп. 120-123.

153. Показатели длительной объемной прочности для прямолинейной огибающей кругов Мора (или для прямолинейного участка огибающей) определяются из следующих выражений:

$$\rho_\infty = \rho_0 ;$$

$$C_\infty = C_0 \frac{\sigma_\infty}{\sigma_c} = \frac{\sigma_\infty}{2} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho_0}{2} \right),$$

где ρ_0 , ρ_∞ – углы внутреннего трения соответственно при кратковременном и длительном испытаниях, градусы; σ_c, σ_∞ – предел прочности на одноосное сжатие соответственно при кратковременном и длительном (предел длительной прочности) испытаниях, кгс/см^2; C_0, C_∞ – коэффициенты сцепления соответственно при кратковременном и длительном испытаниях, кгс/см^2.

При криволинейной огибающей кругов Мора на графике "$\sigma - \tau$" строят огибающую кругов Мора при кратковременных испытаниях; на том же графике откладывают результаты определения предела длительной прочности (круг Мора, соответствующий пределу длительной прочности породы на одноосное сжатие). Огибающую, характеризующую длительную объемную прочность породы, получают, смещая

огибающую кругов кратковременной прочности вниз до касания с кругом Мора длительной прочности при одноосном сжатии.

Величины коэффициента сцепления и угла внутреннего трения при длительном действии нагрузок определяют графически.

УШ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

154. По деформационным свойствам горные породы существенно отличаются от большинства деформируемых материалов (металлы, древесина, полимеры и др.). Особенностью горных пород является их сравнительно малая деформируемость при существенной сопротивляемости нагрузкам. Поэтому даже малые деформации пород сопровождаются значительными изменениями их напряженного состояния и связаны с возможностью их разрушения – перехода за пределы прочности. В условиях ведения горных работ эти свойства являются причиной всевозможных проявлений сдвижения горных пород и горного давления, а также ряда особенностей технологии добычи ископаемого и проходки горных выработок.

Другая особенность деформируемости пород состоит в том, что деформирование происходит не только путем однородного формоизменения минерального тела породы, но и в значительной мере путем взаимных смещений элементов ее структуры со значительными деформациями и разрушением их связей, закрытием или раскрытием микродефектов, пор и трещин. Эти факторы, определяя макродеформации пород различно проявляются при различных видах и величинах нагрузки, что определенным образом сказывается на количественном выражении закономерностей развития макродеформаций.

155. Деформируемость горных пород недостаточно изучена и ее показатели установлены еще в малой степени, притом преимущественно для деформаций, проявляющихся при одноосном сжатии породы.

В соответствии со степенью изученности и с использованием для ведения горных работ установлен ряд показателей деформируемости пород для условий проявления следующих деформаций (рис. 50):

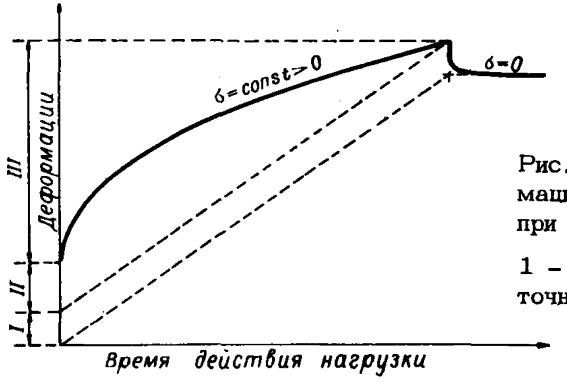


Рис. 50. Виды деформаций, развивающихся при нагружении породы:

1 – упругие, II – остаточные, III – деформации ползучести

– упругих (обратимых после прекращения действия нагрузок),

– остаточных (пластических),

– ползучести (текучести), развивающихся во времени при длительном действии нагрузок.

156. Показателями упругости пород являются:

а. Модуль упругости (модуль Юнга), представляющий собой отношение величины нормального напряжения к значению вызванной его действием упругой относительной деформации в направлении этого напряжения. Для анизотропных пород определяют и используют два модуля упругости, ориентированные по главным направлениям анизотропии – вдоль слоистости и по нормали к ней. Модуль упругости выражается в кгс/см^2 или в МПа.

б. Коэффициент Пуассона, представляющий собой отношение величины упругой относительной деформации в направлении, перпендикулярном направлению вызывающего его нормального напряжения, к значению упругой относительной деформации в направлении этого напряжения. Для анизотропных пород определяют и используют три коэффициента Пуассона для различных сочетаний главных направлений анизотропии породы. Коэффициент Пуассона – безразмерная величина.

При расчетах используют также производные показатели упругости – модуль сдвига, характеризующий упругость сдвиговых деформаций и выражающийся величиной

$$G = \frac{E}{2\,(1 + \mu)},$$

и объемный модуль, характеризующий упругое изменение объема деформируемой породы,

$$V = \frac{E}{3\,(1 - 2\mu)},$$

где E и μ, соответственно, модуль упругости и коэффициент Пуассона.

При уточнении закона упругости горных пород учитывают отклонения от пропорциональной связи деформаций и напряжений. Эту нелинейность закона упругости учитывают, когда требуется, определяя и используя усредненные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона для характерных диапазонов нагрузки, оценивая погрешность такого усреднения.

157. При нагружении большинства пород, одновременно, но в различной мере, развиваются как упругие, так и остаточные пластические деформации. Раздельное выявление величин этих деформаций обычно достигается разгружением нагруженной породы.

Пластичность пород изучена меньше их упругости, а информация о пластических свойствах пока еще слабо используется при проектировании и ведении горных работ. Поэтому оснований для выбора

оценочных показателей пластичности пока мало. Из имеющихся оценочных показателей пластичности заслуживают внимания следующие:

а. Модуль пластических деформаций, аналогичный модулю упругости. В связи с существенной нелинейностью зависимости пластических деформаций большинства пород от нагрузки этот показатель является более или менее приближенным, мера его приближенности в обратной степени зависит от величины диапазона деформаций или напряжений, к которому относится усредненная величина модуля пластичности.

Для оценки модуля пластичности определяют его усредненное значение по двум-четырем участкам всего диапазона нагрузок от 0 до предела прочности при одноосном сжатии. Для более грубых оценок определяют одно усредненное значение модуля для диапазона от 20-30 до 60-70% предела прочности.

б. Коэффициент пластичности, определяемый значением отношения полной величины деформации одноосного сжатия при нагрузке, составляющей 50-70% предела прочности (по другим предложениям - при достижении полной величины предела прочности) к величине упругой деформации при этой же нагрузке. Величину обратную коэффициенту пластичности называют коэффициентом хрупкости породы. Этот показатель используют при прогнозировании потенциальной удароопасности горных пород. По другим предложениям, вместо указанных величин деформации применяют, соответственно, величины работы упругой, а также полной деформации.

в. В качестве оценки хрупко-пластических свойств горных пород используют величину отношения пределов прочности при растяжении и при одноосном сжатии.

г. Грубо пластические свойства оцениваются категорией пластичности, определяемой по пятибалльной шкале абсолютной величиной остаточной деформации породы при нормированном способе нагружения (вдавливание сферического индентора) нагрузкой нормированной величины в нормированном режиме. Категория пластичности пород используется при прогнозировании пучения пород в подготовительных выработках.

158. Развитие деформаций горных пород во времени при длительной неизменности условий нагружения (ползучесть пород) принято описывать, как показано в главе III, теорией линейной наследственной ползучести. Согласно этой теории, разработанной Ж. С. Ержановым в работе "Теория ползучести горных пород и ее приложения" (Алма-Ата, Наука, 1964) при длительном одноосном сжатии величина относительной деформации ε_z в направлении сжатия определяется в зависимости от нагружающего напряжения σ_z и длительности t его действия, считая от момента приложения нагрузки, по выражению:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}\left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha}\right),$$

где E – модуль (линейный) мгновенной деформации, α и δ – оценочные показатели ползучести породы (α – безразмерная величина, δ выражается в единицах времени в степени $1 - \alpha$

Теория линейной наследственной ползучести позволяет аналитически решать многие задачи деформирования массива пород в процессе горных работ. Однако решения этих задач пока не доведены до уровня практического использования при проектировании и ведении горных работ, поэтому показатели α и δ ползучести пород пока широко не применяются.

При другом, также мало используемом способе представления законов ползучести механизм этого явления моделируют сочетаниями условных структурно-связанных элементов: упругих, вязко-текучих и предельно ограничивающих напряжения. Соответственно, показателями ползучести пород являются коэффициенты вязкости (основной и начальный), модули деформации, а также пределы пластичности и текучести.

В связи с необходимостью учета меры деформируемости длительно нагруженных пород при проектировании горных работ с учетом возможности пучения, для грубой оценки длительной деформируемости пород используют категорию их текучести, определяемую по пятибалльной шкале абсолютной величиной деформации породы в течение нормированного интервала времени действия нагрузки нормированного вида и нормированной величины.

Далее изложены нормативы методов определения показателей деформируемости пород.

Метод определения показателей упругости и пластичности при одноосном сжатии

159. Метод по надежности является эталонным, он позволяет определять наиболее точные значения показателей упругости (модуль упругости, коэффициент Пуассона) и пластичности (модуль пластичности, коэффициент поперечных пластических деформаций) с учетом их нелинейности. В связи со сложностью методики, трудоемкостью испытаний и избыточным уровнем надежности метод не предусмотрен к использованию разведочными и изыскательскими организациями Минуглепрома СССР, за исключением тематических и метрологических работ, выполняемых некоторыми из них и требующих хорошего оснащения.

Метод предусматривает измерение упругих и остаточных продольных и поперечных относительно нагрузки деформаций одноосно-сжимаемого цилиндрического породного образца. Величины относительных деформаций относят к соответствующему напряженному состоянию или его изменению и вычисляют требуемые показатели. Положения метода детально изложены в работе Б. В. Матвеева и др. "Методические указания по лабораторным испытаниям деформативности крепких горных пород при одноосном сжатии" (Л., ВНИМИ, 1967).

160. Нормативы формы, размеров образцов, требований к их поверхности, а также к способу центрирования нагрузки аналогичны таковым при определении предела прочности методом одноосного сжатия цилиндрических образцов (пп. 92-96). Далее изложены особенности методики.

Деформации измеряются в средней по высоте части образца, на достаточном удалении от аномально деформированных приторцовых зон. При этом образцы должны иметь высоту в пределах 2-2,5 диаметра, а измерение деформаций должно производиться в средней по высоте части так, чтобы деформации приторцовых зон высотой 0,6 диаметра (у каждого торца) не включались в измеряемую деформацию. Практически деформации измеряют с помощью тензорезисторов и мостового устройства, например, описанных в работе Ю. М. Карташова и др. "Инструкция по применению прижимного тензометра ДМ12 для определения деформационных характеристик горных пород" (Л., ВНИМИ, 1971). На боковой поверхности образца в пределах указанной его части закрепляют четыре тензорезистора: два (дублирующих друг друга) - в направлении продольных относительно оси нагружения деформаций и два (соответственно) - в направлении поперечных деформаций. Дублирующие тензорезисторы располагают на противоположных сторонах образца - с целью контроля качества центрирования нагрузки и однородности деформаций. В дальнейшем отсчеты по дублирующим тензорезисторам усредняют. В целях экономии тензорезисторов, ускорения их монтажа на образце и возможности испытания влажных пород удобно применять разработанное ВНИМИ съемное прижимное тензометрическое устройство типа ДМ12 (рис. 51). При отсутствии тензорезисторов пользуются также описанным в работе Е. И. Ильницкой и др. "Свойства горных пород и методы их определения" (М., Недра, 1969) устройством, укрепляемым на средней по высоте части образца и включающим четыре индикатора часового типа.

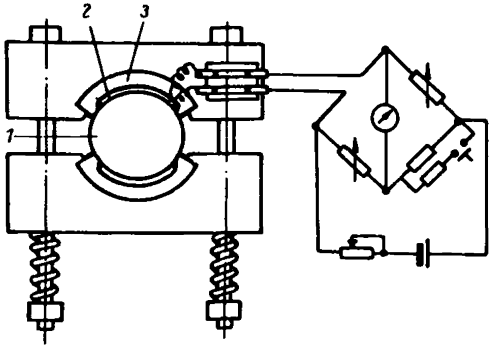


Рис. 51. Прижимное тензометрическое устройство ДМ12:

1 - образец, 2 - тензорезистор, 3 - резиновая прокладка

При испытаниях низкомодульных пород, например угля или каменных солей искажение деформаций в приторцовых зонах мало по сравнению с полными деформациями образца. В этих случаях деформации определяют с помощью индикаторов часового типа, измеряя

сближения давильных плит (продольные деформации) и радиальные смещения боковой поверхности образца (поперечные деформации).

161. Режим нагружения должен обеспечить разделение упругих и остаточных деформаций (продольных ε_z и поперечных ε_x) по представительным диапазонам нагрузки. Для этого нагружение выполняется нарастающими ступенями нагрузки с промежуточными разгрузками. Режим нагружения и разгружения образца (рис. 52) предусматривает такую последовательность:

– предварительное прижатие образца усилием $P_{пр} = (0{,}03\text{–}0{,}05) \times d^2\sigma_c$, обеспечивающим его устойчивость и стабильность контактных условий при повторных нагружениях ступенями нагрузки (здесь d – диаметр образца, σ_c – предел его прочности при одноосном сжатии);

– ступени нагружения образца:

$P_1 = 0{,}2\, d^2\sigma_c$;

$P_2 = 0{,}4\, d^2\sigma_c$;

$P_3 = 0{,}6\, d^2\sigma_c$.

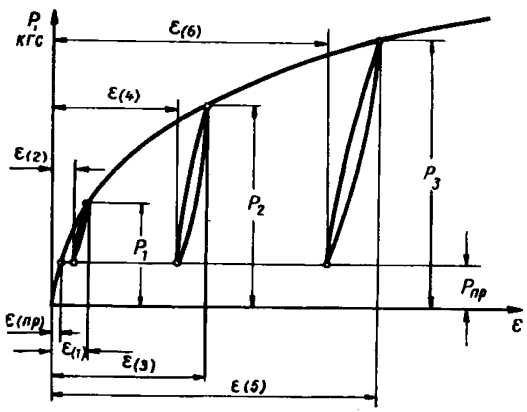


Рис. 52. Режим нагружения при определении показателей упругости и пластичности

После каждой ступени нагружения образец разгружают до усилия $P_{пр}$. При выполнении каждой ступени нагружения и разгрузки регистрируют по 2–3 промежуточных показания усилия и соответствующие деформации.

При наличии авторегистрирующей тензометрической аппаратуры, например, двухкоординатного самописца типа ЛКД4-003 надобность в регистрации отдельных отсчетов показаний отпадает.

162. Обработка результатов испытания образца состоит в построении графиков, аналогичных рис. 53, для показаний каждого тензометра, с усреднением показаний как обоих продольных, так и обоих поперечных тензометров. При использовании самописца ЛКД4-003 парные тензорезисторы включаются последовательно в цепь общего плеча моста и усреднение их показаний достигается автоматически, причем самописец вычерчивает готовый график, начальная обработка которого должна включать лишь определение масштабов усилий (напряжений) и деформаций. По полученным данным для каждого нагружения с последующим разгружением вычисляют значения модуля упругости E, модуля пластичности D , коэффициента Пуассона μ и коэффициента остаточных поперечных деформаций η по формулам:

$$E_1=\frac{4(P_1-P_{пр})}{\pi d^2[\varepsilon_{z(1)}-\varepsilon_{z(2)}]};\ E_2=\frac{4(P_2-P_{пр})}{\pi d^2[\varepsilon_{z(3)}-\varepsilon_{z(4)}]};\ E_3=\frac{4(P_3-P_{пр})}{\pi d^2[\varepsilon_{z(5)}-\varepsilon_{z(6)}]};$$

$$D_1=\frac{4(P_1-P_{пр})}{\pi d^2[\varepsilon_{z(2)}-\varepsilon_{z(пр)}]};\ D_2=\frac{4(P_2-P_{пр})}{\pi d^2[\varepsilon_{z(4)}-\varepsilon_{z(пр)}]};\ D_3=\frac{4(P_3-P_{пр})}{\pi d^2[\varepsilon_{z(6)}-\varepsilon_{z(пр)}]};$$

$$\mu_1=\frac{\varepsilon_{x(1)}-\varepsilon_{x(2)}}{\varepsilon_{z(1)}-\varepsilon_{z(2)}};\quad \mu_2=\frac{\varepsilon_{x(3)}-\varepsilon_{x(4)}}{\varepsilon_{z(3)}-\varepsilon_{z(4)}};\quad \mu_3=\frac{\varepsilon_{x(5)}-\varepsilon_{x(6)}}{\varepsilon_{z(5)}-\varepsilon_{z(6)}};$$

$$\eta_1=\frac{\varepsilon_{x(2)}-\varepsilon_{x(пр)}}{\varepsilon_{z(2)}-\varepsilon_{z(пр)}};\quad \eta_2=\frac{\varepsilon_{x(4)}-\varepsilon_{x(пр)}}{\varepsilon_{z(4)}-\varepsilon_{z(пр)}};\quad \eta_3=\frac{\varepsilon_{x(6)}-\varepsilon_{x(пр)}}{\varepsilon_{z(6)}-\varepsilon_{z(пр)}},$$

где обозначения величин деформаций указаны на рис. 52.

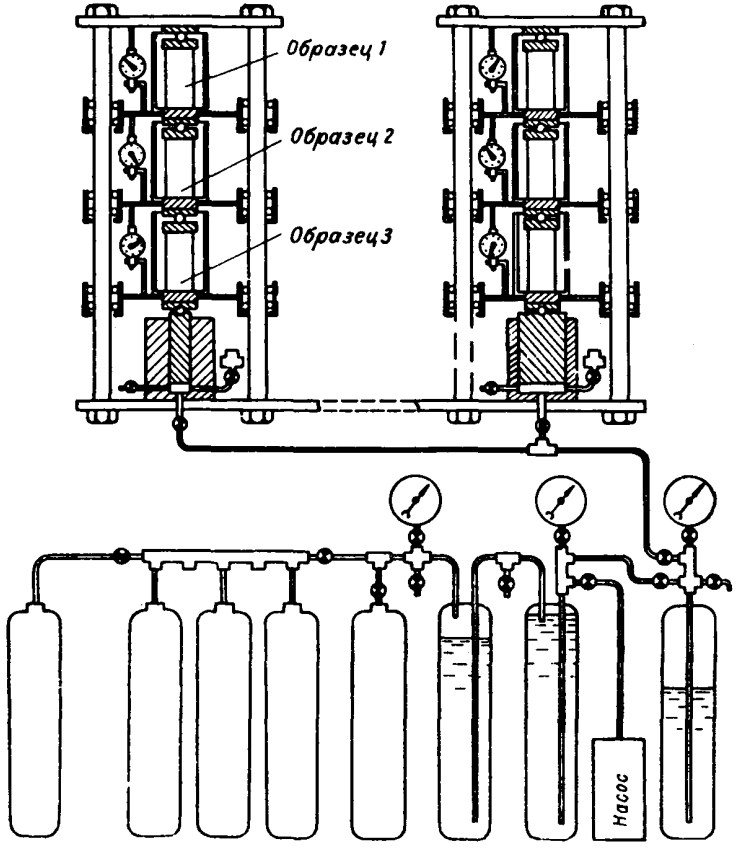


Рис. 53. Схема установки УП-2

Метод определения показателей ползучести при одноосном сжатии

163. Метод позволяет определять показатели линейной наследственной ползучести; по уровню надежности он является эталонным, а при некотором смягчении нормативов – нормальным по надежности или даже упрощенным. Ввиду необходимости использования сложного оборудования, не выпускаемого промышленностью, метод не предусмотрен к использованию разведочными и изыскательскими организациями Минуглепрома СССР, за исключением метрологических и методических работ, выполняемых некоторыми хорошо оснащенными организациями.

Метод основан на повторном измерении продольных (при необходимости и поперечных) деформаций ползучести породных образцов, одноосно сжимаемых неизменными во времени и длительно действующими нагрузками. Величины деформаций относят ко времени их проявления и к значению нагрузки. Положения метода детально изложены в работе Ю. М. Карташова "Методическое указание по лабораторному испытанию пластических свойств пород" (Л., ВНИМИ, 1972).

164. Условия одноосного сжатия и деформометрических измерений диктуют требования к форме, размерам, поверхности и способу центрирования образцов. Эти требования такие же, как для метода определения показателей упругости и пластичности (см. п. 160). Образцы принимаются цилиндрическими диаметром от 30 до 36 мм и высотой вдвое большей диаметра. Во избежание изменения естественной влажности образцов при значительной длительности испытаний применяют гидроизолирующее покрытие.

Длительность нагружения образца предусматривается вплоть до стабилизации значения скорости деформирования (в том числе до затухания ползучести). В упрощенном варианте длительность ограничивают 24 ч. Длительность нагружения постоянным усилием определяет тип источника усилия: в используемой установке УП2 (рис. 53) источником усилия служит сжатый газ (азот), давление которого сообщается жидкости (маслу) под поршнями прессов, сжимающих образцы. Стабильность во времени рабочего усилия может быть обеспечена также и применением грузовых или пружинных нагрузочных устройств.

Нагрузки на различные образцы испытываемой породы задают от 0,1 до 0,9 предела прочности при одноосном сжатии, для чего к общему источнику давления подключается соответствующее число прессов, отличающихся друг от друга диаметром поршня. В упрощенном варианте при испытаниях применяют одну величину нагрузки, представительную для имеющихся горнотехнических условий, либо составляющую около 0,8 от разрушающей.

Деформации ползучести регистрируют по показаниям индикаторов часового типа через интервалы времени от 1 мин (в начале ползучести) до 10–20 ч (стабилизация скорости ползучести). При упро-

щенном варианте испытаний показания индикаторов регистрируют через 10 мин, через час и через сутки от момента приложения нагрузки.

165. Показатели α и δ линейной наследственной ползучести, а также модуль мгновенной деформации рассчитывают с помощью ЭВМ по закладываемым значениям измеренных величин деформаций и интервалов времени. Для упрощенного определения используют величины:

$\Delta_{10\ мин}$ – полная деформация образца за первые 10 мин длительного действия нагрузки, мкм; $\Delta_{ч}$ – полная деформация образца за первый час действия нагрузки, мкм; $\Delta_{сут}$ – полная деформация образца за первые сутки действия нагрузки, мкм.

Реологический показатель α определяют по величине $\frac{\Delta_{сут} - \Delta_{ч}}{\Delta_{ч} - \Delta_{10\ мин}}$ согласно табл. 10, в которой даны также величины A и B.

Таблица 10

$\frac{\Delta_{сут} - \Delta_{ч}}{\Delta_{ч} - \Delta_{10\ мин}}$	α	A	B
11,65	0,30	2855	308,6
8,70	0,40	916,0	136,1
6,538	0,50	294,0	60,01
5,744	0,55	166,5	39,84
5,016	0,60	94,32	26,45
4,533	0,65	54,68	17,57
3,832	0,70	30,27	11,67
3,361	0,75	17,144	7,746
2,947	0,80	9,712	5,144
2,593	0,85	5,502	3,415
2,282	0,90	3,117	2,268
2,000	0,95	1,764	1,506

Реологический показатель δ находят из выражения:

$$\delta = \frac{(\Delta_{сут} - \Delta_{ч})(1 - \alpha)}{A \cdot \Delta_{ч} - B \cdot \Delta_{сут}},\ с^{1-\alpha},$$

Мгновенный модуль деформации E_0, кгс/см^2 вычисляют по формуле:

$$E_0 = \frac{4P h\ (1 + A\frac{\delta}{1-\alpha})}{\pi d^2 \Delta_{сут}} \cdot 10^5,\ кгс/см^2,$$

где P – приложенная нагрузка, кгс; h – высота образца (база тензометрирования), мм; d – диаметр образца, мм.

Метод вдавливания сферических инденторов в образцы неправильной формы

166. По надежности этот метод относится к упрощенным; при использовании предусмотренной портативной аппаратуры (пробник БУ-39) он доступен как для лабораторных, так и для полевых и шахтных условий; рекомендуется для проведения массовых испытаний при разведке угольных месторождений, строительстве, реконструкции и эксплуатации угольных шахт.

Метод основан на зависимости величин упругой и остаточной составляющих глубины лунки вдавливания стальных шариков в поверхность породного образца, соответственно, от модулей упругости и пластичности. Использование значительных деформаций контактного вдавливания делает несущественным и напряженное состояние и деформации образца вне зон контакта, что позволяет испытывать образцы произвольной, в том числе неправильной формы. Положения метода изложены в работе Г. В. Михеева "Инструкция по эксплуатации прибора - пробника БУ-39" (Л., ВНИМИ, 1974).

167. Требования к размерам и форме образцов, включая выбор и подготовку мест их нагружения инденторами, изложены в п. 103, однако, учитывая необходимость сохранения при испытании несущей способности образца с запасом около 30%, площадь ожидаемого сечения раскола должна быть не менее 3 $см^2$ для пород с $\sigma_р >$ > 60 кгс/$см^2$, 5 $см^2$ для пород с $\sigma_р$ = 15-60 кгс/$см^2$ и 7 $см^2$ для менее прочных. Испытаниям подвергают не менее 5 образцов.

Применяемое для испытаний оборудование - пробник БУ-39 или для стационарных условий, соосник БУ-11, должны быть в отличие от указанных в п. 104 оборудованы индикаторами часового типа ИЧ-10, показывающими величины сближения инденторов.

168. Вдавливание инденторов в образец выполняют ступенями нагружения с разгрузками в таком порядке:

- поджатие прижимной нагрузкой P_0 = 2-3 кгс, обеспечивающей смятие шероховатостей под инденторами и стабильные условия измерения деформаций; показания индикаторов при этом принимаются за начало отсчета последующих сближений инденторов;
- нагружение до величины первой ступени нагрузки P_1, принимаемой равной 100 кгс для пород с $\sigma_р$ > 30 кгс/$см^2$, 50 кгс для пород с $\sigma_р$ = 7,5-30 кгс/$см^2$ и 30 кгс для менее прочных пород; по показаниям индикаторов регистрируется сближение инденторов Δ_1, мкм;
- разгружение до величины прижимной нагрузки P_0; по соответствующему изменению показания индикаторов регистрируется величина остаточного сближения инденторов $\Delta_{ост1}$, мкм;
- нагружение до величины второй ступени нагрузки:

P_2, кгс	$\sigma_р$, кгс/см^2
300	> 110
250	60–110
200	30–60
100	15–30
75	7,5–15
50	< 7,5

по показаниям индикаторов регистрируется сближение инденторов Δ_2 мкм, соответствующее приложенной нагрузке;

– разгружение до величины прижимной нагрузки P_o; регистрируется величина остаточного сближения инденторов $\Delta_{пл2}$, мкм.

169. Для расчета модуля упругости образца используют данные об упругом восстановлении лунок при разгружении после второй ступени нагружения:

$$\Delta_y = \Delta_2 - \Delta_{пл2} - \Delta_c,$$

где Δ_c, мкм – доля сближения инденторов, обусловленная упругими деформациями нагрузочной системы при действии нагрузки P_2, определяемая тарировкой нагрузочного устройства.

Модуль упругости, кгс/см^2, рассчитывают по формуле:

$$E = \frac{1,13 \cdot 10^5}{1,82 \frac{\Delta_y}{P_2} \sqrt{(0,5\ \Delta_y + \Delta_{пл2}) \cdot 10^3} - 0,043}$$

Для расчета модуля пластичности при вдавливании используют линейную зависимость остаточного развития лунок вдавливания от нагрузок в диапазоне от P_1 до P_2 :

$$D = 0,133 \frac{P_2 - P_1}{\Delta_{пл_2} - \Delta_{пл_1}} \cdot 10^5, \text{ кгс/см}^2.$$

Определение модулей упругости и пластичности породы производят по осреднению результатов определений всех испытанных образцов.

170. Для грубой оценки пластических свойств породы (с точностью до ступени пятибалльной шкалы) по табл. 11 в зависимости от величины выражения:

$$П = \frac{\Delta_{пл2} - \Delta_{пл1}}{P_2 - P_1}, \text{ мкм/кгс},$$

определяется категория пластичности.

Таблица 11

П, $\frac{мкм}{кгс}$	0,2	0,2–0,5	0,5–1,2	1,2–2,5	2,5
Категория пластичности	0	1	2	3	4

Метод оценки категории текучести горных пород

171. При необходимости метод по пп. 166–170 может быть пополнен также установлением грубой оценки текучести породы. Такая оценка основывается на зависимости установившейся скорости вязкого деформирования во времени при длительном действии нагрузки от ее величины и от характеристики текучести породы. При этом, учитывая грубость определяемой оценки, вводятся следующие упрощающие метод положения:

а. В качестве вида нагружения породы принимается вдавливание сферических инденторов в образец, как это указано в пп. 166–168.

б. Развитие деформаций образования лунок от действия нагрузки P_1, а также в течение первых 10 минут действия нагрузки P_2 относится к периоду неустановившейся скорости деформирования, связанного с характеристикой пластичности.

в. За время установившегося вязкого деформирования принимается интервал времени действия нагрузки P_2, начиная от десятой и кончая шестидесятой минутой от момента ее приложения.

172. Порядок испытаний, изложенный в п. 168, изменяется после регистраций сближения инденторов Δ_2, мкм, следующим образом:

– нагрузка P_2 выдерживается постоянной в течение часа, причем регистрируется сближение индикаторов Δ_{10}, мкм, на 10-й минуте и Δ_{60}, мкм, на 60-й, считая от момента приложения нагрузки P_2.

– образец разгружается до величины прижимной нагрузки P_0 и регистрируется величина остаточного сближения инденторов $\Delta_{ост_2}$, мкм.

173. Для грубой оценки склонности породы к вязкой текучести (с точностью до ступени пятибалльной шкалы) по табл. 12, в зависимости от величины выражения:

$$T = \frac{\Delta_{60} - \Delta_{10}}{P_2}, \text{ мкм/кгс},$$

определяется категория текучести.

Таблица 12

T, мкм/кгс	<0,02	0,02–0,05	0,05–0,12	0,12–0,25	>0,25
Категория текучести	0	1	2	3	4

При расчете величин модуля пластичности и категории пластичности в приведенных в пп. 169 и 170 выражениях для D и $П$ вместо $\Delta_{пл_2}$ следует принимать величину $\Delta_{пл_2} - (\Delta_{60} - \Delta_2)$.

Ультразвуковой метод определения показателей упругости

174. По надежности метод относится к грубым, несмотря на сравнительно высокую точность применяемой ультразвуковой аппаратуры и методики измерения параметров ультразвука. Это вызвано использованием малоизученных, а иногда и слабых корреляционных зависимостей определяемых упругих свойств пород при статических, значительных по величине нагрузках и параметров прохождения по породе ультразвуковых колебаний, зависящих от упругости элементов структуры породы при малых амплитудах динамической нагрузки. По этой причине область применения метода ограничена условием изученности параметров этой корреляции для исследуемых литотипов пород; должны быть известны как пересчетные коэффициенты для расчета показателей статической упругости по параметрам динамической, так и коэффициенты корреляции для оценки меры надежности расчета показателей статической упругости.

175. Определение параметров динамической упругости выполняют одним из следующих двух способов:

а. Модуль упругости E (кгс/см^2) и коэффициент Пуассона μ (динамические значения) определяют по измеренным значениям скорости распространения v_p (мм/мкс) в цилиндрическом породном образце диаметром 36–110 мм и длиной в 2–3 раза большей диаметра, продольных упругих колебаний с частотой, превышающей $(1,5–2) \times v_p/d$, и скорости v_R (мм/мкс) распространения по боковой поверхности этого образца волн Релея. Для генерирования и индикации колебаний используют ультразвуковой сейсмоскоп с пьезоэлементами (датчиком и приемником колебаний) и осциллографической разверткой, например, типа ИПА59, УКБ и др. Для пропуска и индикации колебаний, после включения и прогрева сейсмоскопа, пьезоэлементы плотно прижимают к отшлифованным торцам образца. Время прохождения по образцу продольных колебаний измеряют по осциллограмме, прижимая пьезоэлементы к центральным частям торцов, а волн Релея – к краям торцов у общей образующей.

Определение динамических показателей производят по табл. 13, где в числителе дана величина модуля упругости (кгс/см^2), уменьшенная в 10^5 раз, а в знаменателе – коэффициент Пуассона (динамические значения). Таблица составлена для пород объемным весом 2,5 г/см^3. При испытаниях пород с иным объемным весом табличные величины модуля упругости пересчитывают пропорционально фактическому объемному весу. Испытания каждого образца повторяют 2–3 раза, а всего испытывают 2–3 образца. За окончательные принимают результаты, различающиеся между собой не более чем на 15–20%.

Таблица 13

Скорость поверхностных колебаний, мм/мкс	Скорость продольных колебаний, мм/мкс								
	3,0	3,5	4,0	4,5	5, 0	5,5	6,0	6,5	7,0
1,5	1,80	1,81	1,82	1,83	1,84	1,86	1,88	1,90	1,92
	0,28	0,36	0,41	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,48
2,0		2,92	3,07	3,17	3,24	3,32	3,35	3,37	3,38
		0,16	0,30	0,35	0,39	0,41	0,43	0,44	0,45
2,5				4,58	4,79	4,94	5,03	5,10	5,15
				0,20	0,30	0,34	0,38	0,40	0,42
3,0						6,65	6,91	7,09	
						0,22	0,30	0,34	
3,5							8,75	9,12	
							0,13	0,29	

б. Модуль упругости и коэффициент Пуассона (динамические значения) вычисляют по величинам измеренных значений скорости v_p (мм/мкс) распространения в цилиндрическом или призматическом породном образце поперечным размером 36–110 мм и толщиной, в 4–5 раз превышающей длину применяемых волн, продольных упругих колебаний, а также скорости v_s (мм/мкс) поперечных колебаний. При этом образец, закрепленный в поворотном устройстве, помещают в ванну с иммерсионной жидкостью. Для генерирования и индикации времени прохождения колебаний используют ультразвуковой сейсмоскоп типа ИПА59 или УКБ с осциллографической разверткой, пьезодатчиками и устройством типа ЕЖД2, включающим держатели, иммерсионную ванну и отсчетное устройство.

Вычисление модуля упругости (динамического) производят по формуле:

$$E = K\gamma v_p^2,$$

где γ – объемный вес породы, г/см^3, К – коэффициент, зависящий от значения отношения $v_p : v_s$, находимый по табл. 14. По этой таблице находят также величину коэффициента Пуассона.

Таблица 14

$v_p : v_s$	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
К . . .	0,97	0,92	0,86	0,79	0,67	0,57	0,50	0,42	0,36	0,32
Коэффициент Пуассона	0,10	0,18	0,24	0,28	0,33	0,37	0,39	0,41	0,43	0,44

Для определения показателей упругости испытаниям подвергают 3–4 образца породы, причем в качестве окончательных принимают значения, отличающиеся друг от друга не более чем на 25–30%.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

I. Объемы и состав работ по определению механических свойств горных пород при геологическом изучении угольных месторождений и полей шахт. 8

II. Общие сведения о механических свойствах горных пород и их показателях 14

III. Общие требования к определению механических свойств горных пород 32

IУ. Методы и средства лабораторных испытаний прочности горных пород при одноосном сжатии (общие методические требования) 42

У. Методы и средства лабораторных испытаний прочности горных пород при одноосном сжатии (нормативы) . . . 58

УI. Методы и средства лабораторных испытаний прочности горных пород при растяжении 77

УII. Методы и средства оценки показателей объемной прочности горных пород 86

УIII. Методы и средства лабораторных испытаний деформируемости горных пород. 95

Составители:

кандидаты техн. наук Б. В. МАТВЕЕВ, Ю. М. КАРТАШОВ

Редактор Е. М. Платонова
Техн. редактор С. В. Иванова
Корректор И. И. Мороз

Подписано к печати 9.10.80 г. М-33431.
Формат бумаги 60x90/16. Объем 6,5 п. л.
Тираж 500. Заказ 116. Бесплатно.
Печатный цех ВНИМИ

УДК 622.023:(550.812+622.22+622.12)553.94/96(083.75)

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОМПЛЕКСУ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД (для инженерных расчетов горного давления). Л., 1980, 105 с. (М-во угольной пром-сти СССР. Всесоюз. ордена Трудового Красного Знамени науч.-исслед. ин-т горн. геомех. и маркшейд. дела).

РЕКОМЕНДАЦИИ, ГОРНЫЕ ПОРОДЫ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ, РАСЧЕТЫ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В Рекомендациях изложены методы и приемы определения механических свойств горных пород при геологическом изучении шахтных полей с целью получения исходных данных для проектирования и ведения горных работ.

Ил. 53, табл. 14.

gost.e-ecolog.ru